

N° 2501

ASSEMBLÉE NATIONALE

CONSTITUTION DU 4 OCTOBRE 1958

Neuvième Législature

PREMIÈRE SESSION ORDINAIRE DE 1991-1992

Enregistré à la Présidence de l'Assemblée nationale
le 18 décembre 1991.

N° 213

SÉNAT

PREMIÈRE SESSION ORDINAIRE DE 1991-1992

Annexe au procès-verbal de la séance
du 18 décembre 1991.

**OFFICE PARLEMENTAIRE D'ÉVALUATION
DES CHOIX SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES**

RAPPORT

**SUR LES ORIENTATIONS DE LA POLITIQUE SPATIALE
FRANÇAISE ET EUROPÉENNE**

par **M. Paul LORIDANT**, Sénateur.

TOME II : CONTRIBUTIONS DES EXPERTS.

Déposé sur le Bureau de l'Assemblée nationale

par **M. Jean-Yves LE DÉAUT**,

Président de l'Office,

Déposé sur le Bureau du Sénat

par **M. Jean FAURE**

Vice-président de l'Office

OFFICE PARLEMENTAIRE
D'ÉVALUATION DES CHOIX
SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES

PREAMBULE

ELEMENTS DE TECHNIQUE SPATIALE

(Extraits d'un cours enseigné aux élèves du Conservatoire National des Arts et Métiers avec
l'aimable autorisation des auteurs)

Alain GAUBERT

André LEBEAU

ELEMENTS DE TECHNIQUE SPATIALE

-AVANT-PROPOS

1- ORBITES ET TRAJECTOIRES	1
- généralités	1
- l'approximation Képlérienne.....	1
- les orbites Képlériennes.....	2
- le repérage des orbites.....	4
- traces des satellites.....	8
- les orbites de satellites d'application	9
- les perturbations.....	13
- les trajectoires - missions interplanétaires.....	15
- bibliographie.....	17
2- LE SYSTEME SPATIAL.....	18
- les installations de lancement.....	19
- le réseau de télémessure, de télécommande et d'orbitographie.....	20
- le satellite.....	21
3- CONCEPTION DES SATELLITES.....	23
- l'environnement orbital du satellite.....	23
- l'environnement su satellite pendant le lancement.....	26
- architecture générale des satellites.....	27
notion de sous-système.....	27
- système de contrôle d'altitude et d'orbite.....	28
- alimentation en énergie de bord.....	32
- télémessure et télécommande.....	33
- gestion de bord.....	33
- structure.....	34
- contrôle thermique.....	35

Alain GAUBERT

ÉTUDES

Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM)

DIPLÔMES

Ingénieur CNAM, Paris, 1972, Physique dans ses rapports avec l'Industrie.

CARRIÈRE

1968-1970	CNES (Centre National d'Etudes Spatiales), Division Satellites.
1970-1971	Service National dans la Marine Nationale, affecté scientifique du contingent à la Direction des Poudres.
1971-1974	CNES, division Mathématiques et traitement.
1974-1982	CNES, division Politique Industrielle de la Direction Générale des programmes puis de la Direction des Affaires Internationales et Industrielles.
1982-1990	Administrateur-Gérant du G.I.E. PROSPACE (filiale du CNES).
depuis 1990	CNES, chef de la division Politique industrielle à la Direction Générale Adjointe chargée de la Stratégie.

ACTIVITÉS DIVERSES

Membre de plusieurs comités de Programme de colloques internationaux.

ACTIVITÉS D'ENSEIGNEMENT

Membre du Conseil interacadémique de l'Education Nationale pour l'Ile-de-France.

1987-1990	Professeur associé au CNAM.
Depuis 1990	Chargé du Cours "Aspects socio-économiques de la Technique spatiale" (Chaire de M. le Professeur A. LEBEAU).

PUBLICATIONS

Études et réalisation d'un magnétomètre à noyau saturable (Thèse CNAM, Paris, 1972).
 Editeur de 1974 à 1990 de la revue "News from Prospace".
 Rapports sur l'industrie spatiale internationale en coopération avec l'Industrie Spatiale Française.
 Articles dans la presse spécialisée.

DÉCORATION

Chevalier dans l'Ordre National du Mérite.

ANDRE LEBEAU

ETUDES

Lycée Saint-louis

Ecole Normale Supérieure de la rue d'Ulm (Promotion Sciences 1952)

DIPLOMES

Agrégé de l'Université (Sciences physiques 1956)

Docteur ès Sciences (1956)

CARRIERE

1956-1958 Membre de la deuxième expédition Antarctique française de l'année géographique internationale (Construction de la station Dumont d'Urville: Terre Adélie)
1958-1960 Service national dans la Marine Nationale en qualité d'ingénieur de l'armement (ingénieur en chef de l'armement de réserve)
1961-1964 Créateur et Directeur du groupe de recherche ionosphériques (jouissant du double statut de laboratoire propre du CNRS et du département du CNET)
1965-1975 Directeur des programmes et du plan puis Directeur Général Adjoint chargé des programmes de politique industrielle (1972) au Centre National d'Etudes Spatiales.
1975-1980 Directeur Général Adjoint et Directeur des programmes futurs et des plans de l'Agence Spatiale Européenne.
1980-1983 Directeur de la mission du Musée des Sciences et de l'Industrie de la Vilette.
Depuis 1980 Professeur titulaire au Conservatoire National des Arts et Métiers, Chaire de Techniques et programmes Spatiaux. Président du Département Economie et Gestion
Depuis 1986 Directeur de la Météorologie Nationale
1987-1990 Président des Expéditions polaires Française (Missions Paul-Emile VICTOR)
Depuis juin 1990 Président du Conseil d'EUMETSAT.

ACTIVITES

Membre de l'Académie Astronautique Internationale et de l'Académie Nationale de l'Air et de l'Espace.
 Membre du Conseil Consultatif des terres Australes et Antarctiques Françaises et Président (1980-1986) du Comité Scientifique des TAAF.

OEUVRES

Les courants électriques dans l'ionosphère des régions polaires (Thèse 1965)
 L'espace en héritage, Ed O.Jacob, 1986
 Choix stratégiques et grands programmes civils (avec Patrick Cohendet) Economica 1987
 L'écrivain public et l'ordinateur (avec Jean-Jacques SALOMON)

DECORATIONS

Chevalier de la Légion d'Honneur
 Commandeur de l'Ordre National du Mérite

DISTINCTIONS

Médaille d'Argent de la jeunesse et des Sports
 Médaille Franck Malina de la Fédération Astronautique Internationale.

AVANT-PROPOS

Ces éléments de technique spatiale, enseignés aux étudiants du Conservatoire National des Arts et Métiers, offrent sous une forme assez concise, un aperçu des concepts techniques et des technologies, extrêmement diverses, qui sont mis en oeuvre.

Il n'est pas nécessaire au lecteur de posséder un niveau mathématiques supérieur à celui exigé au Baccalauréat. Seules quelques formules sont utilisées essentiellement pour montrer quelles lois physiques et quels paramètres jouent un rôle dans l'obtention d'un résultat.

1- ORBITES ET TRAJECTOIRES

- généralités

L'orbite d'un véhicule spatial est sa trajectoire après sa séparation d'avec le lanceur, c'est-à-dire après son injection. Elle résulte des forces d'attraction exercées sur lui par les corps célestes les plus proches auxquelles s'ajoutent les effets, généralement du second ordre, du milieu environnant : freinage par l'atmosphère résiduelle, pression de radiation, etc.

Vis-à-vis de l'ensemble de ces forces, le satellite se comporte comme un objet inerte sauf pendant les périodes, le plus souvent brèves par rapport à sa durée de vie utile, où il fait usage de son système de correction d'orbite ou de trajectoire. (La plupart des satellites d'application sont dotés d'un tel système).

En toute rigueur, l'orbite est la trajectoire du centre de gravité du véhicule spatial. L'orientation du véhicule dans l'espace est appelée attitude. Cette attitude peut se caractériser par rapport à un trièdre de référence. Elle est contrôlée pendant toute la vie du satellite ou de l'engin spatial.

- l'approximation Képlérienne

La détermination d'une trajectoire tenant compte des forces d'attraction de plusieurs corps célestes (Terre, Lune, Soleil, etc..) est un problème complexe que l'on ne sait pas résoudre de façon analytique et qui n'est accessible que par l'intégration numérique des équations différentielles qui gouvernent le mouvement.

Cependant, le problème se simplifie lorsque l'on considère :

- qu'un seul corps céleste, dont la masse est bien évidemment très élevée vis-à-vis de l'engin, agit,
- que ce corps est assimilable à une masse ponctuelle¹.

C'est l'approximation Képlérienne. Elle peut s'appliquer aux orbites proches de la plupart des planètes. Le plus souvent, les trajectoires et les orbites seront déterminées de façon analytique grâce à cette simplification et l'on calculera leurs déformations en fonction des perturbations dues aux autres forces agissantes :

¹ On démontre que cette seconde condition est encore satisfaite lorsque la masse ponctuelle est remplacée par une sphère isotrope.

- autres corps célestes,
- irrégularités du champ gravitationnel, freinage atmosphérique, pression de radiation solaire, etc...

- les orbites Képlériennes

La force attractive qui s'exerce entre 2 corps est donnée par la loi de Newton qui dit que deux points matériels de masse m_1 et m_2 s'attirent avec une force égale à :

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

dirigée selon la droite qui les joint ;

r est la distance qui sépare les deux points ;

G est la constante de la gravitation universelle qui vaut $6,664 \cdot 10^{-11}$ dans le système international.

On dit que le champ de gravité est un champ Newtonien.

L'équation du mouvement s'obtient en écrivant :

- que l'énergie mécanique du satellite et
- que son moment cinétique

se conservent. Sa résolution est donnée dans les "compléments au chapitre 1".

On en tire de très importantes conséquences.

Tout d'abord, l'orbite est une courbe plane et le plan de l'orbite est fixe dans un repère lié aux étoiles ; le mouvement diurne de la Terre (s'il s'agit d'une orbite terrestre) et le mouvement orbital de la Terre autour du soleil ne modifient donc pas l'orientation du plan de l'orbite et sa géométrie ;

Dans le cas général, les orbites Képlériennes sont des coniques (hyperboles, paraboles, ou ellipses). La forme de la trajectoire dépend de l'énergie communiquée à l'engin (énergie mécanique totale = énergie potentielle (fonction de l'altitude) + énergie cinétique (fonction de la vitesse)).

Si la vitesse d'injection est très élevée, l'engin échappera, à l'infini, à l'attraction de la planète. Sa trajectoire est alors une hyperbole. La vitesse à partir de laquelle ceci se produit s'appelle vitesse de libération (ou seconde vitesse cosmique). Elle est, en lançant depuis la surface de la Terre, de 11,18 km/s. Sur la lune, dont la masse est plus faible, donc l'attraction moins élevée, cette vitesse n'est que de 2,38 km/s.

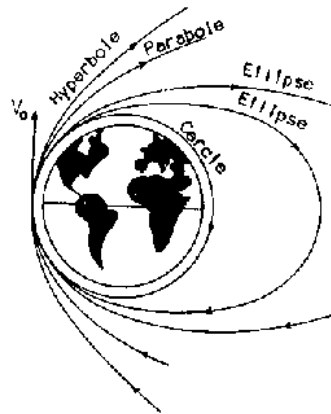


Fig. 1. Trajectoires obtenues en fonction de la vitesse d'injection

En dessous de la vitesse de libération², les trajectoires sont des ellipses dont l'un des foyers est au centre de la planète. La vitesse de satellisation (ou première vitesse cosmique), est la plus petite vitesse permettant à un engin, lancé parallèlement à la surface de la planète, de ne pas retomber au sol³. Elle correspond à donc une orbite circulaire d'altitude minimale. Elle est donnée par la relation:

$$v = \sqrt{\frac{G \cdot M}{R + h_m}}$$

où R est le rayon terrestre, soit $6378 \cdot 10^3$ m

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11}$$

$$M = 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$$

h_m est l'altitude à l'injection

Le calcul montre que la vitesse de satellisation autour de la Terre pour une altitude de 380 km (altitude à laquelle le freinage atmosphérique devient, en première approximation, négligeable), est de 7,729 km/s. Elle est de 1,683 km/s à la surface de la lune.

On remarquera également que la vitesse d'orbitation circulaire décroît avec l'altitude. Cependant, il faut élever l'engin à cette altitude, et, y étant parvenu, lui communiquer la vitesse horizontale nécessaire. Il est globalement plus coûteux en énergie d'y parvenir.

² La parabole est uniquement obtenue dans le cas d'une vitesse égale à la vitesse de libération. Elle n'est jamais obtenue en pratique car la vitesse est toujours légèrement inférieure ou supérieure à cette vitesse théorique.

³ En réalité, si la vitesse d'injection est inférieure à la vitesse de satellisation, l'orbite est toujours une ellipse, mais qui recoupe la sphère terrestre.

Les orbites sont parcourues d'un mouvement périodique caractérisé par leur période:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{G.M}}$$

où a est la longueur du demi-grand axe de l'ellipse ; on constate que la période ne dépend pas de l'excentricité de l'ellipse mais croît seulement avec la longueur du demi-grand axe.

Pour une orbite circulaire à 380 km d'altitude,
 $a = R + h$, soit $(6378+380)10^3$ m, $T=92$ minutes.

et pour une orbite circulaire à 35786 km, $T= 86164,1$ s soit 23h 56mn 4,1s
 (1 jour sidéral)

- le repérage des orbites

Nous nous placerons dans le cadre de l'approximation Képlérienne. Pour repérer complètement une orbite, il faut disposer de paramètres qui caractérisent:

- sa forme,
- la position du plan dans lequel elle se trouve,
- la position de l'orbite dans ce plan.

Un paramètre supplémentaire, fonction du temps, est nécessaire si l'on veut savoir où se trouve le satellite à un instant donné.

a) forme de l'orbite

Dans les cas qui nous intéressent, l'orbite Képlérienne est une ellipse, le cercle constituant un cas limite ; le point le plus près de la Terre s'appelle le périgée et le point le plus élevé l'apogée. Ces deux points déterminent la ligne des apsides. La forme et la dimension de l'orbite sont déterminées par 2 paramètres, par exemple :

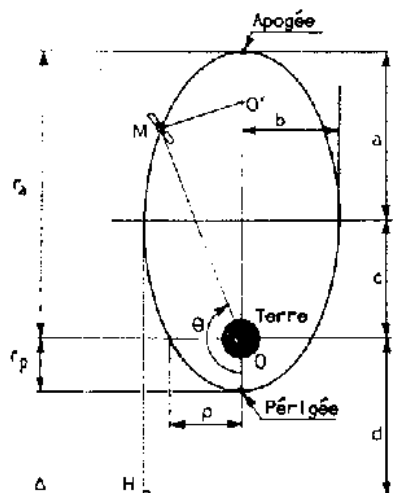


Fig. 2

le grand axe $2a$ et l'excentricité e
 ou le grand axe $2a$ et le petit axe $2b$
 ou le rayon à l'apogée r_a et le rayon au périégée r_p , etc.

Dans le cas de l'orbite circulaire, $a=b=r_a=r_p$ et $c=e=0$.

b) repérage du plan de l'orbite

Rappelons que ce plan est fixe dans un repère lié aux étoiles et qu'il passe par le centre de la planète, la Terre par exemple.

La Terre tourne par rapport à ce plan d'un tour complet en un jour sidéral (23h 56mn 4,1s).

On repère le plan de l'orbite par 2 angles :

- l'inclinaison i
- la longitude du noeud ascendant Ω .

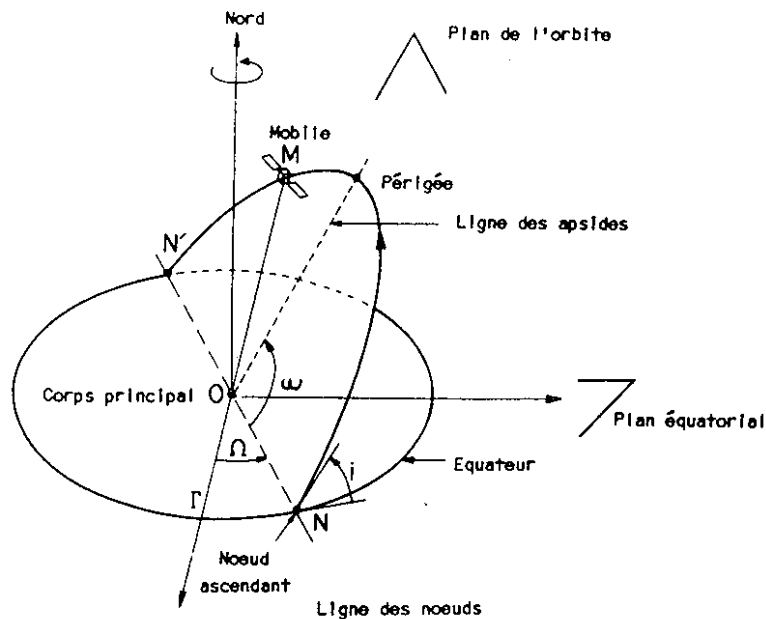


Fig. 3

L'inclinaison i est l'angle entre le plan de l'orbite et le plan de l'équateur terrestre (fixe lui aussi), c'est-à-dire l'angle entre l'axe géographique Nord-Sud du globe terrestre et la normale au plan de l'orbite avec la convention que l'orbite est parcourue dans le sens direct (sens inverse des aiguilles d'une montre).
 i est compris entre 0 et 180° .

$i=0^\circ$ correspond à une orbite contenue dans le plan équatorial terrestre. On l'appelle orbite équatoriale.

$0 < i < 90^\circ$ correspond aux orbites directes, c'est-à-dire décrites dans le sens de la rotation terrestre.

$90^\circ < i < 180^\circ$ correspond aux orbites dites rétrogrades.

si i est voisin de 90° , les orbites correspondantes sont appelées orbites polaires ou quasi-polaires

La longitude Ω du noeud ascendant est l'angle entre deux directions fixes.

La première est la ligne des noeuds. Les noeuds sont les points où l'orbite traverse le plan de l'équateur terrestre. Le noeud ascendant correspond au passage du satellite de l'hémisphère Sud dans l'hémisphère Nord, le noeud descendant, une demi-orbite plus tard, lorsque le satellite passe de l'hémisphère Nord dans l'hémisphère Sud.

⁴ Le terme longitude pour désigner Ω ne se réfère pas à une longitude terrestre. Il serait préférable d'utiliser l'appellation "ascension droite".

La seconde direction, fixe dans un repère lié aux étoiles, est la direction du point vernal Γ . Celle-ci est définie par l'intersection du plan équatorial terrestre (fixe) avec le plan de l'écliptique (fixe). Cette droite, par convention, est orientée dans la direction Terre \rightarrow Soleil à l'équinoxe de printemps.

Ω est compté de 0 à 360° à partir du point Γ dans le sens de la rotation de la Terre.

c) position de l'orbite dans son plan

L'un des foyers de l'ellipse coïncide avec le centre de la Terre. Il suffit donc de spécifier l'orientation du grand axe pour déterminer l'orientation de l'orbite dans son plan. Un paramètre suffit. Par convention, on choisit l'argument du périhélie, qui est l'angle balayé par le rayon vecteur partant du noeud ascendant jusqu'au périhélie, dans le sens parcouru par le satellite.

ω est compté de 0 à 360°.

Cas particuliers :

ω n'est pas défini pour une orbite circulaire.

Dans le cas d'orbites équatoriales quelconques, le plan de l'orbite et celui de l'équateur coïncident. La ligne des noeuds et par conséquent ni Ω ni ω ne sont définis, mais leur somme $\Omega + \omega$ l'est. On définit alors la position de l'orbite par la longitude du périhélie π . $\pi = \Omega + \omega$ compté à partir de la direction du point vernal.

En résumé, il convient de retenir que 5 paramètres sont nécessaires pour définir une orbite :

- 2 pour sa forme : a et e par exemple,
- 2 pour la position du plan de l'orbite : i et Ω
- 1 pour la position de l'ellipse dans son plan : ω

En l'absence de perturbations, ces 5 paramètres demeurent constants.

Un 6ème paramètre est nécessaire si l'on veut définir la position du satellite sur son orbite. On prend par exemple la date de passage en un point remarquable qui peut être la date de passage au périhélie ou encore un paramètre appelé anomalie (cf Compléments au chapitre 1).

- traces des satellites

L'échange d'informations avec le sol étant un aspect fondamental de la mission d'un satellite, sa position par rapport à un observateur terrestre revêt un intérêt essentiel.

Le mouvement apparent du satellite résulte de la combinaison du mouvement orbital du satellite et du mouvement de rotation de la Terre sur elle-même.

On le caractérise par le lieu des points survolés à la verticale du satellite, appelé trace et par l'altitude du survol.

La détermination de la trace est complexe dans le cas général. Si la Terre ne tournait pas, la trace serait un grand cercle de latitudes extrêmes $+i$ et $-i$ coupant l'équateur terrestre en 2 points de longitude Ω et $\Omega+180^\circ$ (par rapport à la longitude du point vernal prise comme origine).

Cependant la Terre tourne et les points de passage au dessus de l'équateur doivent être corrigés de l'angle dont la Terre a tourné pendant le temps mis par le satellite pour parcourir le segment d'orbite. Mais la rotation de la Terre n'affecte pas la latitude de la trace ; il en résulte que la trace sera contenue dans une bande de latitude $\pm i$. La combinaison de ces deux mouvements donne des résultats extrêmement variés.

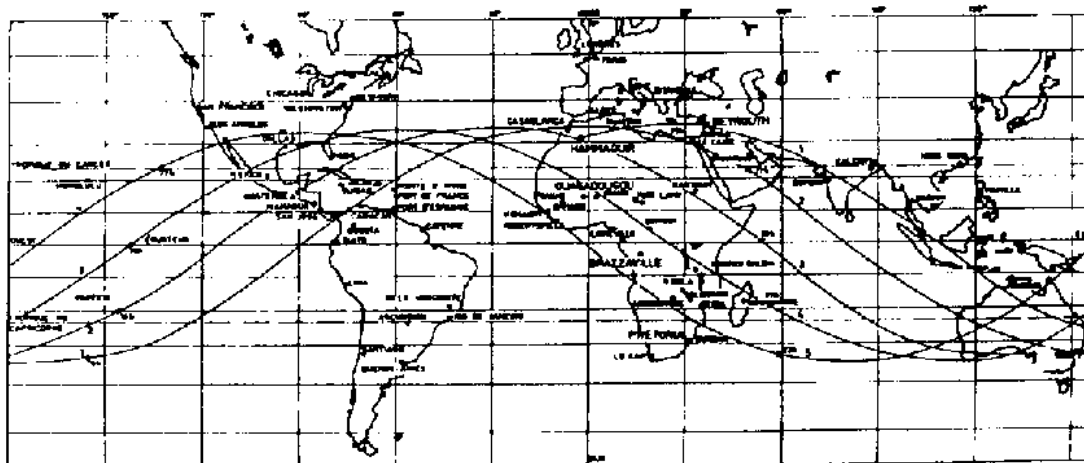


Fig. 4 Premières orbites de A1

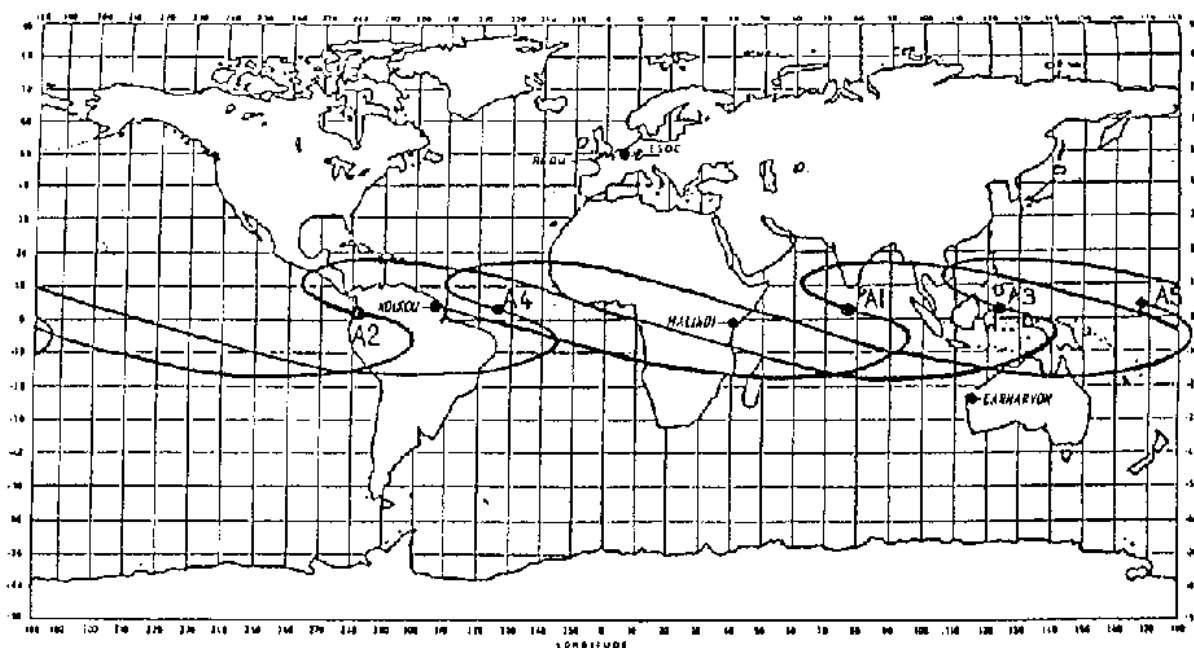


Fig. 5 Premières traces d'une orbite 200–36 000 km d'un satellite lancé de Kourou

- les orbites des satellites d'application

A quelques exceptions près, les orbites utilisées par les satellites d'applications relèvent de deux grandes catégories :

- des orbites utilisées par des satellites d'observation de l'ensemble de la Terre et qui doivent donc survoler toute la surface du globe,
- une orbite particulière, l'orbite **géostationnaire** ou **géosynchrone** pour laquelle le satellite paraît immobile dans le ciel pour un observateur terrestre. Cette orbite est utilisée par la quasi-totalité des satellites de télécommunications et par certains satellites météorologiques (METEOSAT, GOES, etc.).

a) les orbites des satellites d'observation de la Terre

Ce sont des orbites circulaires. La surface terrestre peut ainsi être observée à une altitude constante. Elles sont d'autre part polaires ou quasi-polaires ($i \approx 90^\circ$) afin, en particulier, de couvrir la totalité du globe.

Ces orbites sont le plus souvent **héliosynchrones**. On se souvient que le plan d'une orbite reste fixe dans un repère lié aux étoiles. Ainsi, sans autre précaution, l'angle θ entre la droite Terre-soleil et le plan de l'orbite évoluerait au cours de l'année ce qui aurait pour conséquence de faire

varier l'éclairement de la surface du globe au moment de l'observation (heure solaire de passage du satellite).

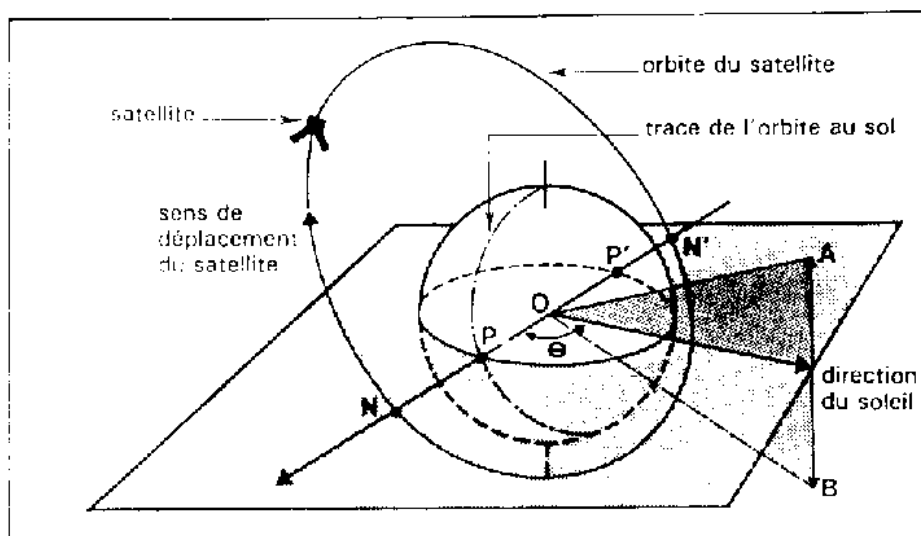


Fig. 6 Une orbite est dite héliosynchrone lorsque l'angle θ est constant. La direction du soleil varie selon la saison entre les deux directions extrêmes OA et OB.

Pour que l'heure de passage du satellite au dessus d'un point donné soit toujours la même afin d'effectuer des observations comparatives, il faut que le plan de l'orbite tourne de 360° en un an. C'est ce que l'on appelle l'héliosynchronisme. Celui-ci est obtenu grâce à une perturbation heureuse de l'orbite due, dans certaines conditions (orbites rétrogrades ⁵), à l'aplatissement de la sphère terrestre. Elles sont par ailleurs phasées (c'est-à-dire que leurs traces sont identiques après un nombre fini d'orbites).

Lorsque la période T d'un satellite est dans un rapport rationnel simple avec la période de rotation synodique de la Terre J, ce que l'on exprime par la relation :

$$\frac{T}{J} = \frac{p}{q}$$

où p et q sont 2 entiers, la trace du satellite se referme sur elle-même. En effet, pendant que la Terre effectue p rotations, le satellite effectue q orbites complètes. (On prendrait $J=J_s$, période de rotation sidérale, si l'orbite était képlérienne).

Cette particularité est très intéressante pour l'observation de la Terre car elle permet de retrouver exactement la même position d'observation après un délai que fixent p et q. Pour le satellite SPOT, on a $p=26$ et $q=369$. Ce satellite retrouve les mêmes traces tous les 26 jours.

⁵ Encore proche de 90° , l'orbite est dite quasi-polaire. Voir le détail de calcul dans les "compléments au chapitre 1".

b) l'orbite géostationnaire

Considérons un satellite placé sur une orbite circulaire d'inclinaison nulle $i = 0$. La trace de cette orbite est l'équateur terrestre. Elle est parcourue d'un mouvement uniforme. Si l'on fixe le rayon de l'orbite de telle sorte que le satellite parcourt une orbite en 1 jour sidéral, sa trace est un point et il paraît fixe pour un observateur terrestre. L'orbite géostationnaire ou géosynchrone est donc une orbite circulaire, d'inclinaison nulle et dont l'altitude, voisine de 36 000 km, se déduit de la relation:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{a^3}{GM}} = \text{Js} = 86\,164,1 \text{ s, soit } 23\text{h } 56\text{mn } 4,1\text{s}$$

On trouve alors $a = 42\,164 \text{ km}$ d'où $h = 35\,786 \text{ km}$ pour un rayon terrestre moyen = $6\,378,12 \text{ km}$.

La vitesse du satellite sur cette orbite est de $3\,075 \text{ m/s}$.

L'orbite géostationnaire est utilisée de façon à peu près exclusive pour les satellites de télécommunication. Elle sert cependant aussi à des satellites d'observation météorologiques qui fournissent des images globales de la Terre.

Les lanceurs classiques ne sont pas conçus pour injecter directement un satellite sur une orbite géostationnaire. Il délivrent le satellite sur une orbite de transfert (en anglais GTO Geostationary Transfer Orbit) qui n'est autre qu'une orbite très elliptique dont le périhélie est à 200 km et l'apogée à $36\,000 \text{ km}$. Après quelques orbites, on allumera un moteur dit d'apogée lors d'un passage à l'apogée pour rendre l'orbite circulaire et géostationnaire

Le terme d'éclipse est utilisé lorsque le satellite passe dans le cône d'ombre de la Terre. L'angle entre le plan équatorial et le plan de l'écliptique limite ce phénomène à 2 périodes de l'année. Les éclipses sont importantes pour deux raisons :

- le générateur solaire ne peut fonctionner pendant la durée de l'éclipse,
- le passage de la lumière à l'ombre et inversement produit un choc thermique auquel le satellite doit résister.

Les périodes de l'année où se produisent les éclipses sont centrées sur les équinoxes et durent environ 43 jours (du 27 février au 12 avril et du 31 août au 16 octobre).

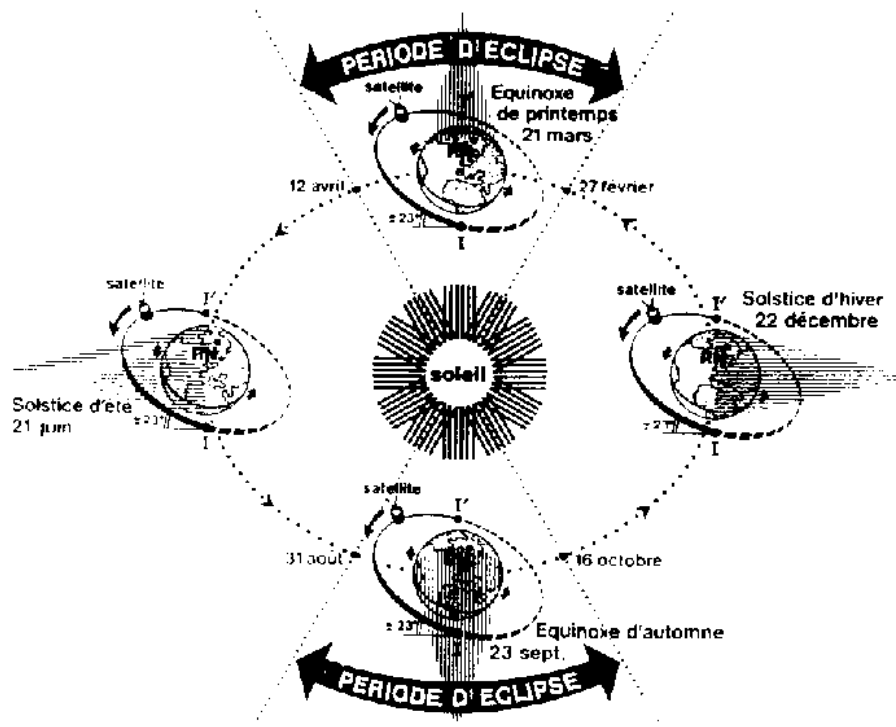


Fig. 7 Les deux périodes d'éclipse

Sa durée est au maximum de 72 mn aux équinoxes. L'heure de l'éclipse est centrée sur le minuit solaire pour la longitude terrestre du satellite. On peut donc l'ajuster (lorsque les possibilités laissées par les zones de couverture le permettent). L'affectation de deux satellites identiques à la même mission, décalés de $17^{\circ}24'$ permet de disposer en permanence d'au moins un satellite non-éclipsé.

c) l'orbite Molnya

L'Union Soviétique a utilisé pour les satellites du système Molnya une orbite⁶ elliptique, phasée, de période 12h et inclinée à $63,5^{\circ}$. L'orbite Molnya permet d'avoir une visibilité du satellite longue à l'apogée au dessus d'une région donnée.

⁶ Une perturbation, la précession apsidale, (que nous étudierons plus loin) due à l'irrégularité du champ gravitationnel de la Terre modifierait lentement la position de l'orbite dans son plan si ses effets n'étaient pas annulés par le choix judicieux de $i = 63,5^{\circ}$.

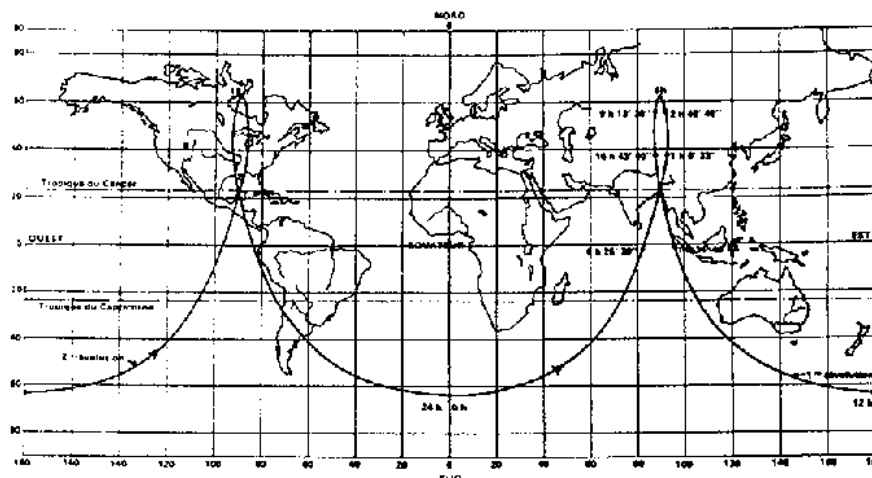


Fig. 8 Trace de l'orbite Molnya

- les perturbations

Les perturbations des orbites Képlériennes résultent des effets des forces qui ont été négligées dans l'approximation Képlérienne. Ces forces sont suffisamment faibles pour qu'on puisse à tout instant définir une orbite Képlérienne qui décrit correctement le mouvement du satellite ; mais les paramètres de cette orbite varient lentement avec le temps. Les principales forces perturbatrices ont pour origine :

- les irrégularités du champ gravitationnel terrestre,
- les champs gravitationnels de la lune et du soleil,
- l'atmosphère résiduelle,
- le rayonnement solaire.

Elles sont souvent corrigées par les systèmes propulsifs du satellite.

a) Irrégularités du champ gravitationnel terrestre

Le champ gravitationnel de la Terre (et des planètes) n'est pas exactement celui d'un point matériel (ou d'une sphère isotrope). C'est d'ailleurs l'étude des perturbations des orbites qui a permis de le connaître avec une très-bonne précision. Les termes principaux de l'écart proviennent de ce que la Terre est un ellipsoïde aplati et non une sphère.

On démontre que les irrégularités du champ gravitationnel ne provoquent pas de dérive permanente de a , e et i .

Elles provoquent en revanche :

- une variation séculaire de la longitude du noeud ascendant (Ω) appelée aussi précession nodale (rotation du plan de l'orbite) dont la valeur dépend de a , e et i . C'est cet effet que l'on utilise pour obtenir l'héliosynchronisme des satellites d'observation de la Terre.
- une variation séculaire de l'argument du périégée (ω) appelée aussi précession apsidale (rotation de l'orbite dans son plan) dont la valeur dépend également de a , e et i .

b) perturbations luni-solaires

La lune et le soleil exercent des forces d'attraction de grandeur comparable (au voisinage de la Terre, l'influence de la lune est environ double de celle du soleil ; celle des autres planètes est négligeable).

Les perturbations correspondantes sont caractérisées par une dérive de i , de e sauf pour une orbite circulaire et une absence de dérive de a .

Les orbites basses sont peu affectées. En revanche, la dérive de i perturbe l'orbite géostationnaire.

c) freinage atmosphérique⁷

La densité atmosphérique diminue rapidement avec l'altitude. Pour une orbite elliptique, le freinage se produit donc pour l'essentiel au voisinage du périégée. Il en résulte une diminution de vitesse, qui a pour première conséquence une diminution de la valeur de a . L'altitude de l'apogée diminue, l'orbite a tendance à se circulariser et le processus va s'accroissant jusqu'à la rentrée dans l'atmosphère qui entraîne en général la destruction du satellite.

d) pression de radiation solaire

L'énergie des photons solaires produit une force perturbatrice qui peut affecter l'orbite selon sa géométrie. Souvent négligeable, elle peut se manifester sur les satellites géostationnaires dotés de panneaux solaires de très grande surface.

Perturbations de l'orbite géostationnaire :

Leur connaissance précise est importante car le maintien à poste c'est à dire le maintien au voisinage immédiat du point est alloué au satellite sur l'orbite géostationnaire, nécessitera que soit dimensionné de manière optimale un système de propulsion et définit une stratégie d'utilisation de ce système.

⁷ Lorsque l'altitude est inférieure à 200 km, la densité atmosphérique est trop élevée pour que l'on puisse traiter le freinage atmosphérique comme une simple perturbation et il convient d'appliquer les lois de l'aérodynamique hypersonique qui régissent les conditions de ré-entrée.

– l'inclinaison de l'orbite évolue principalement sous l'effet de l'attraction luni-solaire ; il se produit une rotation lente du plan de l'orbite avec une vitesse de l'ordre de $1^\circ/\text{an}$. La trace du satellite au sol devient une courbe en forme de 8. On se dispense souvent de corriger cette évolution de l'orbite du satellite.

– la longitude du satellite évolue principalement sous l'effet des irrégularités du champ gravitationnel terrestre. Cette dérive de la longitude doit être corrigée car elle éloigne le satellite du point qui lui avait été assigné. Elle amènerait le satellite à proximité d'autres satellites, risquant d'engendrer des brouillages radio-électriques.

On montre qu'il existe sur l'orbite géostationnaire deux points d'équilibre stable, de longitude 105° O et 75° E . Un satellite placé en ces points ne subit pas de dérive. Placé ailleurs, il oscille autour du point d'équilibre stable le plus proche avec une période qui varie entre 2 et plusieurs années selon la distance angulaire et qui atteint théoriquement une valeur infinie aux points d'équilibre instable situés à 15° O et 165° E . Les satellites utilisés par l'Europe se situent au voisinage d'un point d'équilibre instable.

– les trajectoires – missions interplanétaires

Nous avons vu qu'il n'est pas possible de résoudre de manière analytique le problème de la trajectoire d'un mobile soumis à l'influence de plusieurs corps et que l'on doit faire appel aux méthodes numériques. Cependant, pour une étude analytique de première approximation, on utilise une méthode consistant, comme pour la détermination des orbites, à ne considérer qu'un seul corps agit, et à calculer les déformations de la trajectoire dues aux autres forces.

On traite donc le problème comme une succession de problèmes à deux corps. On définit, pour ce faire, la notion de sphère d'influence d'un corps qui représente la partie de l'espace où prédomine l'attraction de ce corps. On prend par exemple pour rayon de la sphère d'influence la distance à laquelle la force d'attraction d'un corps est égale à celle des autres corps. Pour un trajet Terre-lune par exemple, le calcul se fera en considérant que seule la Terre agit jusqu'à 348 000 km autour de son centre et qu'ensuite, seule la Lune agit, dans une sphère de 38 000 km centrée sur celle-ci.

Bien que cela ne soit pas le cas, on considère également dans les études approchées que les orbites des planètes sont circulaires et co-planaires⁸.

⁸ Le plan de l'orbite lunaire, par exemple, fait un angle de $5,1^\circ$ avec le plan de l'écliptique et un angle de $6,7^\circ$ avec le plan équatorial lunaire.

On peut diviser en trois parties la mission interplanétaire :

- le lancement, où seule la planète de départ agit,
- le transfert où seul le soleil exerce une attraction notable,
- la mise en orbite autour de (et éventuellement l'atterrissage sur) la planète objet de la mission.

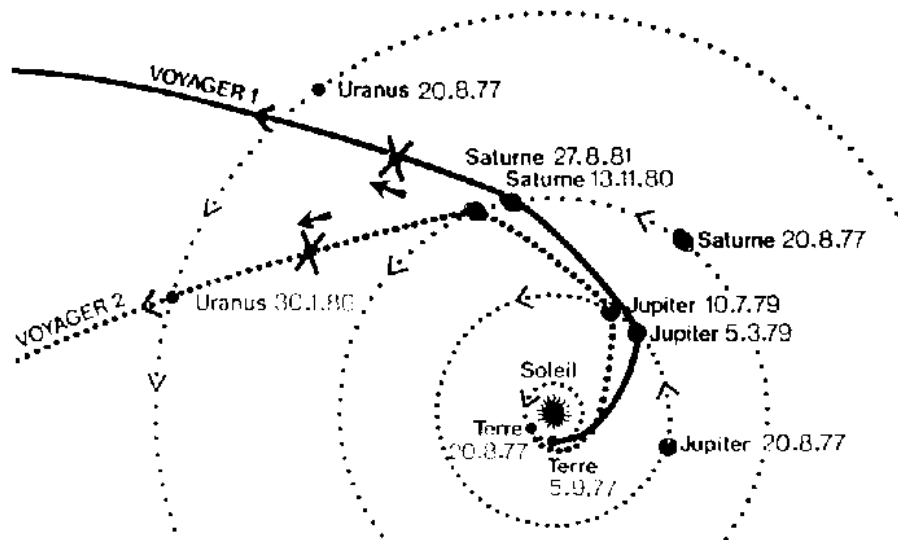


Fig. 9 Les missions VOYAGER

Pour la première phase, on communique à l'engin, au moment de la séparation, une vitesse supérieure à la vitesse de libération. Sa trajectoire est donc une hyperbole.

Durant la seconde phase, sa trajectoire est soit une ellipse, soit une hyperbole, selon sa vitesse par rapport au soleil (il convient de prendre en compte la somme géométrique de la vitesse de l'engin et de la vitesse orbitale⁹ de la Terre puisque le véhicule possède déjà sur la Terre cette vitesse par rapport au soleil). La trajectoire hyperbolique permet par exemple de "couder" une trajectoire.

Lors de la troisième phase, la vitesse sera réduite à l'aide de rétro-fusées, soit jusqu'à la vitesse de satellisation pour la planète considérée, soit jusqu'à une vitesse nulle par rapport à sa surface pour un "atterrissage".

Pour une mission lunaire, on peut négliger en première approximation l'influence de l'attraction du soleil. La trajectoire se décompose alors en :

- une ellipse ou une hyperbole selon que la vitesse communiquée à l'engin est inférieure ou non à 11,2 km/s,
- une hyperbole lors de l'approche lunaire au cours de laquelle il faudra réduire la vitesse pour satelliser et obtenir une orbite elliptique.

⁹ 29,75 km/s.

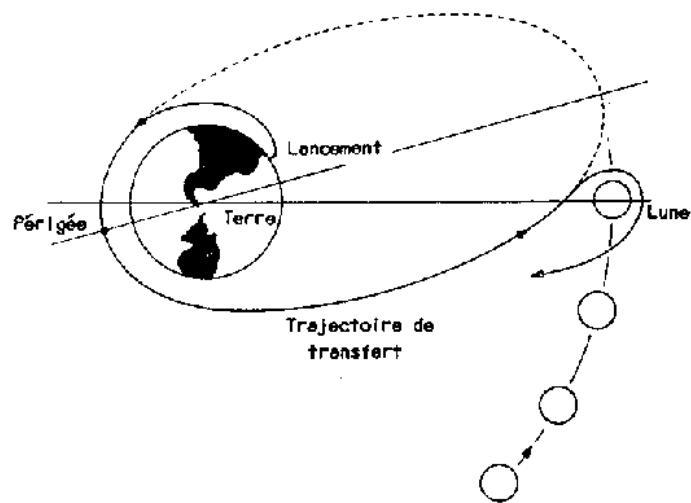


Fig. 10 Exemple de trajectoire Terre-Lune

- bibliographie

- Conception générale des systèmes spatiaux, conception des fusées porteuses. F.DURET et JP.FROUARD. Cours de l'École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace. 1980.
- Le mouvement du véhicule spatial en orbite. Cours de technologie spatiale. Centre National d'Études Spatiales. 1980.
- Conception des véhicules spatiaux. D.MARTY. Masson, éditeur. Paris, 1986.

2 - LE SYSTEME SPATIAL

Un satellite en orbite a été conçu et fonctionne en relation étroite avec d'autres éléments qui forment avec lui un système dont il est inséparable.

Ce système spatial se compose de 3 éléments:

- le (ou les) satellite(s), que l'on désigne par le terme segment spatial,
- le lanceur et les installations de lancement qui n'ont, dans la vie de la mission, qu'un rôle éphémère,
- les installations au sol, que l'on appelle segment terrien, constitués par :
 - la (ou les) station(s) de réception qui maintiennent la liaison avec le satellite et lui permettent d'accomplir la mission pour laquelle il a été prévu,
 - la (ou les) station(s) de contrôle qui reçoivent la télémessure, c'est-à-dire les informations sur le comportement du satellite, élaborent les ordres de télécommande et les émettent vers le satellite,
 - les installations de trajectographie (ou d'orbitographie).

La notion de "système" souligne l'étroite imbrication de l'ensemble de ces éléments.

L'analyse de ces imbrications, et notamment la prise en compte des contraintes qui résultent du fait que certains éléments sont définis (situation du site de lancement, position des stations de télémessure, etc...) est un préalable indispensable à la conception d'une mission spatiale.

Il n'est en général pas possible de modifier l'un des éléments du système sans avoir à modifier les autres. C'est ainsi que, lorsque les satellites Symphonie, conçus pour être lancés sur Europa 2 depuis la Guyane française, furent réassignés à un lancement sur Thor Delta depuis la Floride, il fallut modifier substantiellement, à un stade tardif du projet, le système bord d'acquisition de l'orbite géostationnaire.

- les installations de lancement

Elles comprennent :

- l'aire de lancement qui permet de :
 - . recevoir, assembler et contrôler les éléments du lanceur et sa charge utile,
 - . amener le lanceur en configuration de lancement : avitaillement en fluides, etc...
 - . effectuer l'ensemble des contrôles qui précèdent le tir,

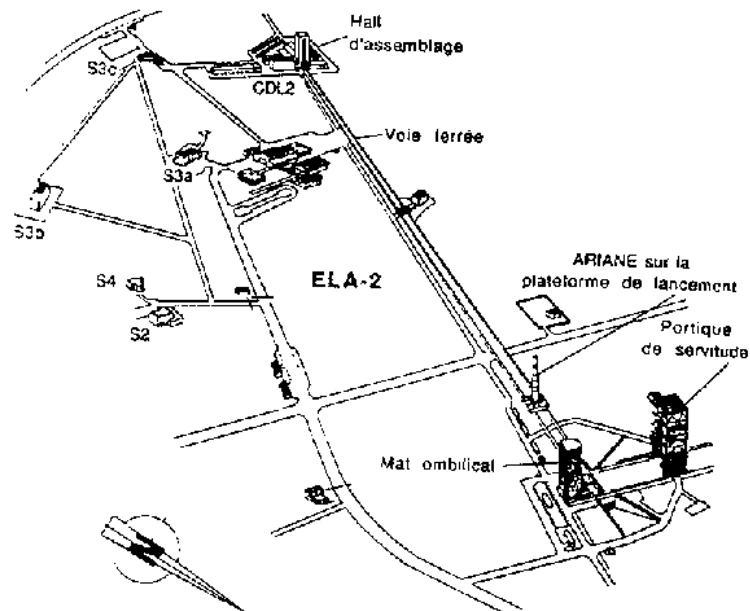


Fig 1.
La base de lancement utilisée par Arianespace, l'ESA et le CNES.

- . effectuer le tir.
- les moyens qui permettent de suivre et de contrôler la trajectoire pendant le vol et généralement jusqu'à l'injection :
 - . caméras de rampe,
 - . cinéthéodolites à poursuite infra-rouge,
 - . radars,
 - . stations situées en aval de la trajectoire.

Ces moyens ne sont en général pas propres à la mission.

Ils permettent également d'assurer la sécurité du champ de tir et des zones à risques en cas de défaillance du lanceur (il est possible de télécommander sa destruction).

– le réseau de télémessure, de télécommande et d'orbitographie

On distingue généralement deux types de stations :

– celles qui permettent la réception des données de la charge utile.

Elles peuvent être spécifiques à la mission.

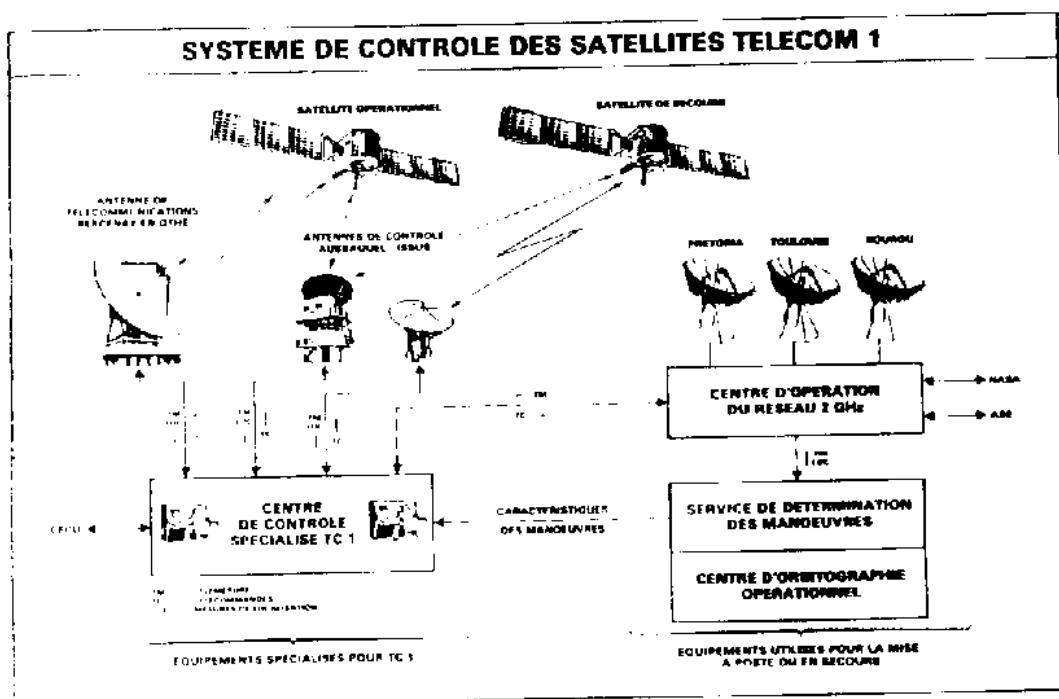


Fig 2.

– celles, dites de contrôle, qui assurent les fonctions de :

- . surveillance du bon fonctionnement du satellite (**housekeeping**),
- . détermination de la position du satellite en fonction du temps (**éphémérides**),
- . élaboration et acheminement des ordres de télécommande.

Ces fonctions tendent peu à peu à se normaliser. La télémesure et la télécommande s'opèrent le plus souvent dans la bande S allouée par l'UIT¹ (fréquences proche de 2 GHz), des recommandations sont faites par des groupes de travail internationaux pour établir des normes de transmission des télémesures, etc...

Visibilité d'un satellite par une station :

Pour qu'une liaison puisse s'établir entre une station à la surface de la Terre et le satellite, ou pour que le satellite puisse observer un point, il faut qu'il soit en vue directe de cette station ou de ce point. Davantage, il faut, pour que la liaison soit de qualité suffisante, que la hauteur sous laquelle est vu le satellite au dessus de l'horizon soit suffisante. Le satellite doit donc se trouver à l'intérieur d'un cône dont le sommet coïncide avec la station et dont le demi-angle au sommet est en général inférieur à 85°.

Il n'existe pas de solution analytique au problème général de la visibilité et l'on recourt au calcul numérique.

On retiendra seulement que, pour un satellite en orbite circulaire à une altitude de 800 km, la zone dans laquelle il peut être vu est un cercle dont le rayon est d'environ 2000 km. Le temps pendant lequel le satellite est en visibilité est au maximum de 10 mn.

De même, pour un satellite en orbite géostationnaire, il n'est guère possible de couvrir les zones de latitudes supérieures à 70° en admettant un angle de site acceptable.

– le satellite

On peut y distinguer une charge utile, spécifique de la mission et un ensemble, souvent appelé plate-forme ou bus qui assure les fonctions nécessaires à la vie de la charge utile:

- alimentation en énergie,
- stabilisation (maintien de l'attitude),
- contrôle de l'orbite,
- contrôle thermique,
- etc.

La plate-forme, dans de nombreux cas, n'est pas spécifique de la mission et sa conception a été faite pour qu'elle puisse être accouplée à différentes charges utiles requérant des modes de fonctionnement proches : même type d'orbite, de précision de stabilisation sur un repère donné, même gamme de consommation d'énergie électrique, etc.... Ainsi, la plate-forme des satellites Spot est également utilisée pour le satellite d'observations militaires Hélios ou la "plate-forme polaire" du programme européen. Dans le domaine des télécommunications, la plate-forme Eurostar de Matra est utilisée pour Télécom 2, Hispasat et Locstar.

Il est cependant fréquent, en particulier pour les satellites scientifiques que charge utile et plate-forme soit physiquement imbriquées.

¹ Union Internationale des Télécommunications. En anglais IUT.

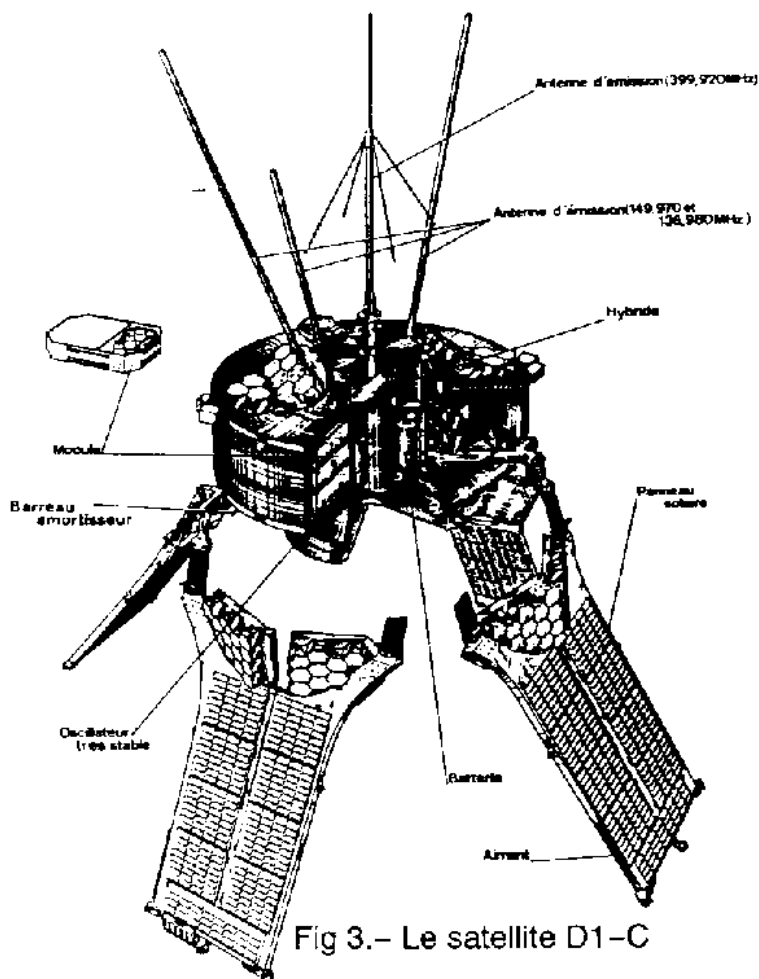


Fig 3.- Le satellite D1-C

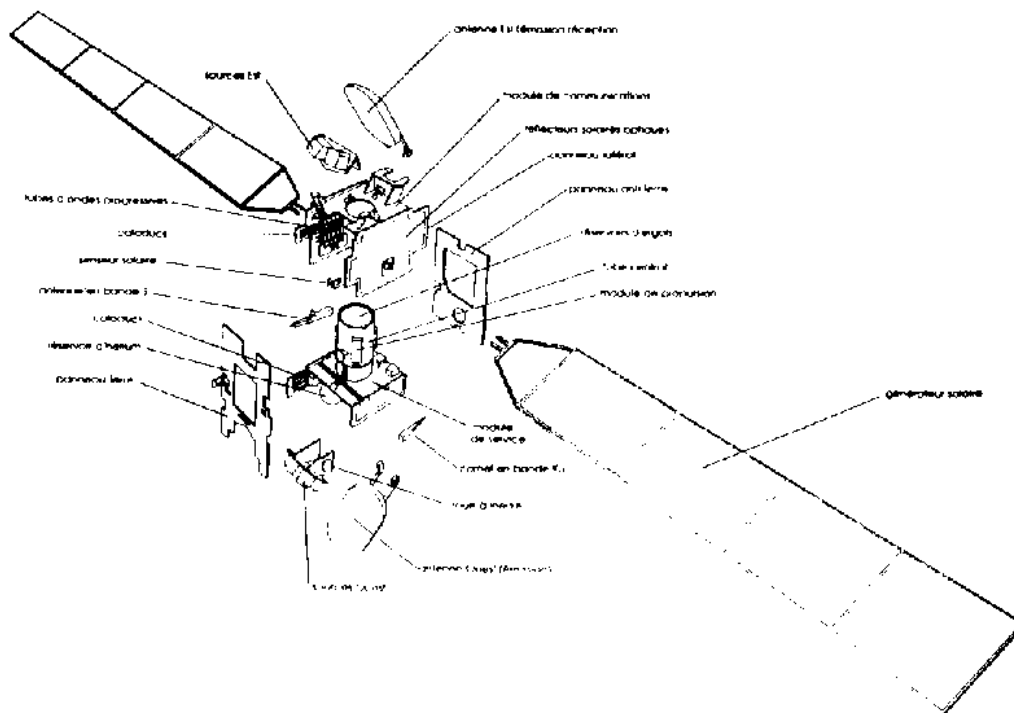


Fig 4
 Vue éclatée du satellite EUTELSAT 2.
 La charge-utile et la plateforme sont clairement dissociées.

3 - CONCEPTION DES SATELLITES

On se bornera, dans ce chapitre, à des généralités qui seront davantage orientées vers les problèmes qui sont rencontrés dans la conception d'un satellite, que vers les solutions, toujours très liées à un problème donné, et faisant l'objet de compromis spécifiques.

L'architecture d'un satellite est gouvernée par trois types de contraintes :

- les contraintes liées à l'environnement du satellite au cours de sa vie en orbite,
- les contraintes liées à sa mise en orbite qui dépendent de l'orbite choisie et du lanceur choisi.
- les contraintes liées à la mission du satellite,

Le premier type de contraintes change relativement peu d'un projet à l'autre.

- l'environnement orbital du satellite

On peut caractériser l'environnement du satellite en orbite par les éléments suivants :

- le champ gravitationnel,
- le vide,
- le rayonnement photonique,
- le rayonnement particulaire,
- le champ magnétique terrestre,
- les météorites.

a) le champ gravitationnel

L'absence de champ gravitationnel dans un système lié au satellite (impesanteur¹) oblige à contrôler par divers procédés mécaniques les liquides embarqués à bord (il en va de même pour un lanceur en phase balistique). Par ailleurs, il n'y a pas de convection dans les fluides.

¹ on préférera le terme *impesanteur* au terme *apesanteur*, bien qu'ils soient équivalents. En effet, phonétiquement, *l'apesanteur* risque d'être confondue avec *la pesanteur*.

Le gradient du champ gravitationnel exerce un effet perturbateur sur l'attitude du satellite. Toutefois, cet effet peut être utilisé pour contrôler l'attitude du satellite selon la géocentrique (stabilisation par gradient de gravité).

Les conditions d'impesanteur permettraient d'alléger la structure du satellite si celui-ci ne devait pas être conçu pour supporter les efforts pendant la phase de lancement (accélération \gg g, vibrations, chocs, etc...). Cependant, les structures exclusivement assemblées dans l'espace (structures des stations orbitales) peuvent tirer partie de cet avantage.

b) *le vide*

Le vide est une caractéristique essentielle de l'environnement spatial. Il s'agit d'un vide de très haute "qualité" par rapport à celui obtenu en laboratoire. Dans la technologie occidentale, l'ensemble des systèmes du satellite fonctionne dans le vide. Les satellites soviétiques ont presque toujours été pressurisés, c'est à dire que leurs équipements sont placés dans une enveloppe métallique contenant un gaz neutre. Cette technique est plus simple mais conduit à des masses beaucoup plus élevées.

Le vide "dur" de l'espace pose divers problèmes.

- les systèmes mécaniques grippent (évaporation des substances lubrifiantes et véritable soudage des matériaux en contact dès lors que rien ne les sépare). Ce qui est mécanique fonctionne mal dans l'espace.
- les équilibres thermiques sont affectés par le vide puisqu'il n'y a plus de conduction gazeuse. Les simulations portant sur l'équilibre thermique doivent donc se faire dans des chambres à vide.
- le vide spatial est un bon isolant électrique; il convient cependant d'attendre que le satellite ait complètement "dégazé" avant de mettre en fonctionnement les équipements utilisant une très haute tension.

c) *le rayonnement photonique*

C'est essentiellement le rayonnement solaire. Il transporte un flux d'énergie de $1,4 \text{ kW/m}^2$ au niveau de l'orbite terrestre. Sa répartition spectrale est approximativement celle d'un corps noir à 6000°K et comporte donc une forte composante UV.

Le rayonnement d'albédo² de la Terre représente environ 40W/m^2 en orbite géostationnaire. Ses effets sont souvent négligeables (sauf en période d'éclipse). C'est le rayonnement solaire qui contrôle l'équilibre thermique du satellite lorsqu'il est éclairé.

La face du satellite qui n'est pas éclairée voit le fond du ciel, corps noir très froid (4°K). Le passage en phase éclipse représente une forte modification de l'équilibre thermique.

² rayonnement réfléchi par une planète.

Les essais thermiques des satellites exigent l'emploi de chambres de simulation qui reproduisent les conditions de l'espace. On y réalise un vide aussi poussé que possible; un faisceau émis par des arcs au krypton simule le rayonnement solaire; les parois, noires, refroidies à l'azote liquide simulent le fond de ciel. Il s'agit d'installations importantes et coûteuses en investissement et en fonctionnement. Il est des cas, de plus en plus nombreux, dans lesquels les structures sont trop importantes pour que des essais d'ensemble puissent être réalisés. Des modélisations numériques remplacent alors une partie des essais avec une bonne précision.

d) le rayonnement particulaire

Il provient pour l'essentiel, en orbite terrestre, des particules piégées dans le champ magnétique (ceintures de Van Allen).

Les orbites circulaires basses (satellites d'observation de la Terre) sont très en dessous du maximum des ceintures de Van Allen et les orbites géosynchrones très au dessus. Cependant, elles sont encore importantes pour ces dernières et l'orbite de transfert les traverse deux fois par orbite.

L'effet principal de ces radiations est une dégradation des semi-conducteurs par création de défaut dans la maille cristalline. Il en résulte en particulier une dégradation progressive du rendement des générateurs solaires. Cet effet est bien connu et prévisible avec une bonne précision.

Les ions lourds peuvent également déterminer l'apparition de pannes dans certains composants, en particulier les composants fortement intégrés tels que les microprocesseurs. On se prémunit contre ce risque en étudiant et en testant les composants et en éliminant ceux qui présentent un risque.

e) le champ magnétique terrestre

Son seul effet important est la création, soit par le magnétisme résiduel du satellite, soit par les boucles de courant continu, de couples qui tendent à perturber l'attitude du satellite. L'énergie de rotation peut être dissipée par des matériaux magnétiques à hystérésis. Le champ magnétique peut éventuellement être utilisé pour stabiliser le satellite.

Rappelons que le champ magnétique terrestre est assimilable à celui d'un aimant court (dipôle) placé en son centre, incliné de 11° sur l'axe de rotation de la Terre et dont l'intensité vaut $8,06 \cdot 10^{22}$ Ampère-tour/m². Il diminue en $1/r^3$.

f) les météorites

Le risque de destruction ou d'endommagement d'un satellite terrestre par des météorites est très faible (probabilité annuelle d'impact : 10^{-2} sur 1 m² pour des particules de 0,1 gramme et décroissance exponentielle avec la masse). Cependant, les nombreux "déchets" (éléments de satellites et de lanceurs) peuvent encombrer certaines orbites et pourraient, à terme, être préoccupants.

- l'environnement du satellite pendant le lancement

L'environnement du satellite pendant la phase de lancement est caractérisée par des contraintes spécifiques. Les éléments les plus importants sont :

- l'accélération longitudinale
- les vibrations
- les effets atmosphériques et thermiques après l'éjection de la coiffe.

a) *l'accélération longitudinale*

Elle est caractéristique du lanceur et de sa mission. Elle est parfaitement connue et atteint typiquement 7g ³.

b) *les vibrations*

Elles sont également caractéristiques du lanceur. Elles sont transmises par les structures du lanceur et par voie acoustique pendant les premiers instants du décollage.

Accélération et vibrations dimensionnent les structures du satellite.

c) *les effets atmosphériques et thermiques après l'éjection de la coiffe*

La coiffe protège le satellite pendant la première partie du vol propulsé. L'instant du largage de la coiffe est optimisé et ne doit se produire ni trop tôt pour que l'atmosphère résiduelle n'endommage pas le satellite, ni trop tard pour ne pas alourdir inutilement le lanceur.

Le contrôle thermique en orbite de transfert géostationnaire doit faire l'objet d'une analyse spécifique. En effet,

- la configuration du satellite est différente de sa configuration finale (les panneaux solaires ainsi que certaines antennes sont repliés ou partiellement déployés),
- les caractéristiques de l'orbite vis-à-vis du bilan thermique sont différentes de celles de l'orbite géostationnaire.

En conclusion, nous soulignerons l'interdépendance entre le satellite, son lanceur et le site de lancement. Si l'on veut disposer d'une compatibilité avec plusieurs moyens de lancement, celle-ci doit être prévue dès l'origine du projet.

³ Ariane 4 pour une mise en orbite de transfert géostationnaire en fin de combustion du 3ème étage xxx

- architecture générale des satellites

La qualité des solutions retenues s'apprécie (toutes choses égales par ailleurs) en fonction de deux paramètres principaux :

- le coût,
- la fiabilité.

A coût égal (d'une solution, d'un équipement, d'un satellite, d'un système complet), l'amélioration de la fiabilité diminue le coût d'exploitation du service. On voit donc que la solution retenue sera l'objet de compromis dont chacun des termes est quelquefois délicat à apprécier.

La définition du coût elle-même doit faire l'objet de quelques précautions. Si l'objet est un exemplaire unique, le problème est simple : le coût est celui du développement et de la réalisation. Mais si celui-ci doit être construit en plusieurs exemplaires (le nombre de ces exemplaires n'étant pas nécessairement connu avec certitude), il y aura lieu de distinguer les coûts non récurrents, c'est à dire ceux qui s'attachent au développement du premier exemplaire, du coût marginal de réalisation des exemplaires supplémentaires.

Notion de sous-système

L'usage est de décomposer le satellite en éléments ayant chacun une fonction particulière appelés sous-systèmes.

La liste des sous-systèmes d'un satellite d'application s'établit classiquement comme suit :

1. Acquisition de l'orbite et correction de l'orbite

Il s'agit de systèmes de mesure et de systèmes de propulsion qui permettent la mise et le maintien à poste des satellites géostationnaires ou le maintien du phasage pour les satellites d'observation.

2. Stabilisation

C'est le contrôle actif ou passif de l'attitude du satellite.

3. Energie de bord

C'est la production, le stockage et la distribution de l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement du satellite.

4. Télémesure et télécommande

5. Gestion bord

Il s'agit de la gestion de l'information à bord du satellite.

6. Structure

Elle supporte mécaniquement et maintient solidaires les différents éléments du satellite.

7. Contrôle thermique

Le contrôle thermique assure le maintien de l'ensemble des éléments d'un satellite dans des limites définies acceptables pour leur bon fonctionnement.

8. Charge utile

C'est elle qui remplit la fonction pour laquelle on lance un satellite.

Ces sous-systèmes ne sont pas indépendants. Ils ont deux-à-deux une interface. n sous-systèmes créent ainsi $n(n-1)/2$ interfaces.

Le satellite décrit ici possède 28 interfaces qui doivent s'analyser sous les aspects :

- mécanique,
- thermique,
- électrique,
- magnétique,
- électromagnétique,
- informatique.

Dans la conception des sous-systèmes, une notion importante est la redondance de certaines fonctions jugées suffisamment importantes pour la mission pour que l'organe soit doublé.

- système de contrôle d'attitude et d'orbite

1. acquisition de l'orbite finale

Le lanceur, aussi précis soit il, injecte le satellite sur une orbite qui n'est pas tout à fait celle qui est souhaitée. Dans le cas d'un satellite destiné à l'orbite géostationnaire, le lanceur délivre généralement celui-ci sur une orbite de transfert (200-36000 km). Dans tous les cas il est nécessaire d'apporter des corrections, à la fois sur la forme de l'orbite et sur l'inclinaison de cette orbite. Le satellite doit donc disposer d'un système propulsif qui sera mis à feu sur ordre de télécommande à partir du sol.

Dans le cas de la mise en orbite géostationnaire, le satellite devra disposer d'un moteur dit d'apogée qui assurera une double fonction :

- circulariser l'orbite de transfert,
- annuler l'inclinaison.

Cette double opération s'exécute en une ou plusieurs fois selon la technologie utilisée pour ce moteur (une seule fois pour un moteur à poudre).

On s'arrange dans tous les cas pour faire coïncider l'apogée avec l'un des noeuds (traversée du plan équatorial). La valeur du ΔV propulsif nécessaire est bien évidemment largement dépendante de l'inclinaison de l'orbite de transfert et vaut :

$$\Delta V = \sqrt{v_{\text{finale}}^2 + v_{\text{initiale}}^2 - 2 \cdot v_{\text{finale}} \cdot v_{\text{initiale}} \cdot \cos i}$$

avec i inclinaison à annuler.

avec $v_{\text{initiale}} = 1\,600$ m/s (vitesse à l'apogée d'une orbite 200–36 000 km),

$v_{\text{finale}} = 3\,070$ m/s (vitesse sur une orbite circulaire à 35 800 km),
on obtient :

- $\Delta V = 1\,470$ m/s pour $i = 0$,
- $1\,483$ m/s pour $i = 5^\circ$ (Kourou),
- $1\,820$ m/s pour $i = 28^\circ$ (Cape Kennedy),
- $2\,245$ m/s pour $i = 45^\circ$ (Tyura Taur, URSS).

Il en résulte un accroissement de la masse des ergols et de la structure du moteur d'apogée préjudiciable au coût du projet lorsque la latitude du champ de tir s'élève.

Il existe deux technologies pour les moteurs d'apogée. D'une part les moteurs à poudre, d'autre part les moteurs à ergols liquides. Les premiers offrent une précision moins bonne sur le ΔV que les seconds. Rien n'empêche avec ces derniers de concevoir des systèmes dans lesquels les ergols liquides de la mise à poste sont utilisés également pour la correction d'orbite et le contrôle de l'attitude. Le sous-système SCAO 4 est alors appelé à propulsion unifiée.

Les ergols utilisés sont le MMH⁵ et le N₂O₄⁶.

2. correction d'orbite

L'orbite initiale subit des perturbations dont nous avons vu les origines qui doivent, pendant toute la vie du satellite, être corrigées. En particulier, les satellites d'observation doivent garder leur phasage et les satellites en orbite géostationnaire maintenir la position orbitale qui leur a été assignée. Les satellites disposent donc pour ce faire d'un système de propulsion, intégré ou non.

Le maintien en position d'un satellite géostationnaire requiert un ΔV de 5 m/s par an pour la correction de longitude et de 50 m/s pour la correction de latitude⁷.

Un satellite de 2,9 tonnes à propulsion unifiée prévu pour une durée de vie de 12 ans embarque une masse d'ergols de près de 1 600 kg. La masse du réservoir est d'environ 60 kg.

⁴ *Système de Contrôle d'Attitude et d'Orbite. En anglais AOCS, Attitude and Orbit Control System.*

⁵ *MonoMethylHydrazine.*

⁶ *Péroxyde d'azote.*

⁷ *en anglais North-South station keeping.*

3. stabilisation (contrôle d'attitude)

Il existe, pour les satellites d'application deux types de stabilisation couramment utilisés :

- la stabilisation par rotation (ou spin).
- la stabilisation 3 axes.

D'autres types de stabilisation sont employés, essentiellement pour des satellites scientifiques et faisant éventuellement appel à un référentiel particulier. Citons la stabilisation par gradient de gravité, la stabilisation magnétique, etc.

a) la stabilisation par rotation

Elle est utilisée sur de nombreux satellites de télécommunications fabriqués par la société Hughes (USA), et sur les satellites géostationnaires météorologiques (Météosat, GOES, ...).

Le satellite est animé d'un mouvement de rotation rapide sur son axe (2 t/s par exemple) perpendiculaire au plan équatorial. Il se comporte donc comme un gyroscope. Les couples perturbateurs tendent à lui donner un mouvement de précession et à ralentir sa rotation. On utilise de petits propulseurs pour entretenir sa rotation et corriger le dépointage.

L'avantage de ce principe est la simplicité, mais ses inconvénients sont de deux ordres :

- nécessité d'un système contrarotatif (mécanisme délicat) pour maintenir une partie du satellite pointé vers la Terre (partie dé-spinnée), les antennes par exemple.
- exposition partielle équivalente à 1/3 de la surface totale des cellules solaires qui, en général, recouvrent la surface du satellite. En particulier, les fortes puissances électriques demandées par les satellites modernes ne peuvent être satisfaites (l'augmentation de surface exposée ne pouvant être obtenue, in fine, que par l'augmentation du diamètre du satellite, lui-même limité par le diamètre de la coiffe du lanceur).

b) la stabilisation "3 axes"

C'est celle qui est adoptée pour la plupart des satellites de télécommunication et par les satellites d'observation.

Elle consiste à maintenir l'orientation du trièdre de référence du satellite par rapport à un repère donné, le centre de la Terre par exemple.

Quel que soit le principe de stabilisation, on peut distinguer :

- un ensemble de détecteurs qui fournissent des grandeurs à partir desquelles on détermine l'attitude du satellite,
- un système de commande qui compare les mesures fournies par les détecteurs à des valeurs de référence et qui détermine les corrections nécessaires,
- un ensemble d'actuateurs qui appliquent ces corrections.

Les détecteurs les plus utilisés sont les détecteurs optiques :

- les senseurs solaires qui mesurent la direction du soleil,
- les senseurs d'horizon qui détectent les contours du globe dans l'infra-rouge,
- les senseurs stellaires qui mesurent la position d'une étoile de référence avec une grande précision.

Ces senseurs optiques sont associés à des senseurs inertiels :

- accéléromètres,
- gyromètres.

Les actuateurs relèvent de deux grandes catégories :

- a) les actuateurs inertiels tels que les roues à inertie qui constituent des réserves de moment cinétique. En accélérant la rotation de ces roues, on crée un couple dont le moment est opposé à la vitesse de rotation de la roue, cependant qu'en la freinant, on crée un couple de même sens. Il convient toutefois que la vitesse de rotation de la roue reste dans certaines limites. Si celles-ci sont atteintes, il faut dé-saturer la roue en appliquant à l'aide d'autres actuateurs des couples permettant de ramener sa vitesse de rotation à une valeur moyenne.
- b) les propulseurs qui fonctionnent par éjection de gaz, avec un monoergol (décomposition catalytique de l'hydrazine), ou un diergol qu'ils fassent ou non partie du système de propulsion unifié.

Des bobines magnétiques peuvent être utilisées en orbite basse. Elles engendrent un couple par interaction avec le champ magnétique terrestre.

Enfin, la propulsion électrique, ou propulsion ionique, offre d'intéressantes performances par son impulsion spécifique élevée (qui peut atteindre 25 000 secondes), mais ne délivre que des poussées très faibles (quelques mN). Elle n'a pas encore été utilisée sur des satellites opérationnels.

- alimentation en énergie de bord

Hormis les véhicules requérant une puissance électrique importante et supérieure à 10 kW, (tels Gemini, Apollo, le module lunaire, Nimbus II, et des satellites soviétiques, notamment ceux d'observation militaires) qui ont utilisé des piles à combustibles ou des générateurs nucléaires, la majorité des satellites obtiennent leur énergie électrique à partir d'un générateur photovoltaïque utilisant des cellules au silicium.

Les missions scientifiques lointaines qui s'éloignent beaucoup du soleil exigent un autre type d'alimentation car le flux du rayonnement solaire ($1,4 \text{ kW/m}^2$ au niveau de l'orbite terrestre) décroît en $1/r^2$.

Une cellule solaire est typiquement une tranche mince monocristalline de silicium d'une surface de $2 \times 2 \text{ cm}^2$ environ. Son rendement à 27°C est de l'ordre de 10 à 12%. Ainsi, un panneau de 1 m^2 orienté perpendiculairement au rayonnement solaire fournit, au dessus de l'atmosphère, une puissance d'environ 100W; Le rendement décroît sous l'effet des radiations (30% en 5 ans). Le calcul du générateur solaire (GS) doit donc être fait pour la fin de vie utile du satellite. En début de vie, le surplus d'énergie sera évacué dans des dissipateurs (surface radiative orientée vers le fond du ciel).

Les cellules sont disposées sur des panneaux et associées en des ensembles série-parallèle pour délivrer des tensions de l'ordre de quelques dizaines de volts (typiquement de 25 à 100 volts).

Les configurations de générateurs solaires sont très diverses :

- générateurs cylindriques sur les satellites stabilisés par spin,
- panneaux fixes (Symphonie),
- panneaux orientables grâce à un mécanisme d'orientation du générateur solaire.

Outre le générateur solaire, le sous-système d'alimentation comporte des batteries d'accumulateurs qui assurent le fonctionnement du satellite en éclipse, un ensemble de régulateurs, de convertisseurs et de circuits de protection. Les accumulateurs utilisent le plus souvent le couple Nickel-Cadmium. L'utilisation du couple Nickel-Hydrogène est de plus en plus courante car il offre une énergie massique environ 50 % supérieure à celui du Ni-Cd.

- télémessure et télécommande

Le sous-système de télémessure et de télécommande (TM/TC) assure deux fonctions :

- la réception d'ordres (mise en route d'une fonction par exemple) venant de la Terre. C'est la télécommande.
- la transmission vers le sol de mesures réalisées à bord et rendant compte de la vie du satellite. C'est la télémessure.

Cette dernière fonction ne doit pas être confondue avec l'émission d'informations qu'assure la charge utile et qui constitue sa mission même.

Par ailleurs, on rencontre dans la pratique des cas où la charge utile dispose de son propre sous-système de TM/TC. C'est souvent le cas pour des satellites où la charge utile et la plateforme constitue deux ensembles physiquement et fonctionnellement séparés (satellite SPOT p.ex.).

Les techniques utilisées sont celles, relativement classiques des télécommunications. On utilise de plus en plus les modulations PCM (de l'anglais Pulse Coded Modulation) et les techniques digitales de préférence à la modulation de fréquence. Les bandes de fréquences utilisées, allouées par l'Union Internationale des Télécommunications⁸, sont souvent la bande S (2GHz).

- gestion de bord

Il s'agit d'un ensemble de fonctions de traitement de l'information à bord qui est devenu un sous-système à part entière.

Il fait appel aux techniques informatiques. On y trouve donc des calculateurs de bord, éventuellement reconfigurables⁹ automatiquement en cas de panne partielle, des micro-processeurs, des mémoires, des coupleurs de bus, etc...

La TM/TC est souvent considérée comme faisant partie du sous-système "gestion de bord".

⁸ en anglais IUT.

⁹ en anglais fault tolerant computers

- structure

La structure principale est un support matériel qui permet la fixation et le positionnement relatif des divers équipements composant le satellite et qui assure l'assemblage avec le système de lancement.

On considère généralement comme relevant des structures des éléments qui ne font pas partie intégrante du sous-système structure proprement dit, mais dans laquelle la fonction mécanique est primordiale :

- structure du générateur solaire,
- structures d'antennes,
- structures d'instruments (structure de télescope p.ex.) ou porteuses d'instruments,
- etc.

Les contraintes qui s'attachent à la définition des structures sont considérables :

- la résistance aux efforts subits pendant le lancement (typiquement 7g auxquels s'ajoutent les vibrations),
- le positionnement des divers éléments qui doit rester précis pendant toute la vie utile du satellite,
- les nécessités d'équilibrage statique et dynamique, rendues compliquées par la recherche d'un aménagement assurant la compatibilité entre chaque sous-système,
- les exigences de conductance thermique et de référence du potentiel électrique,
- le repliement sous coiffe, le déploiement en orbite, la liaison avec le système de lancement,
- la masse et le coût.

La conception d'une structure et sa réalisation est un problème difficile qui met en oeuvre des technologies dérivées des secteurs avancés de la technique aéronautique (Béryllium, Magnésium, fibres de Carbone, nid d'abeille, etc...).

On arrive ainsi à des masses de structures représentant moins de 6% de la masse totale du véhicule spatial.

- contrôle thermique

Le contrôle thermique a pour rôle d'assurer que tous les éléments constitutifs du satellite demeurent, pendant toute la durée de la mission, dans la plage de température pour laquelle ils ont été qualifiés.

Il s'agit d'une technique complexe qui combine :

- la modélisation mathématique : l'absence de transfert de chaleur par l'intermédiaire de convection et de conduction gazeuse la simplifie; seuls sont à prendre en compte les transferts radiatifs et la conduction solide. Néanmoins, l'établissement d'un modèle thermique de satellite est une opération complexe ;
- les essais sur maquette en simulateur spatial qui permettent de vérifier les prévisions du modèle thermique.

Cette combinaison permet de prévoir des températures en orbite avec des précisions de quelques degrés.

Deux sortes de technologies sont combinées. Les technologies passives consistent en l'utilisation de matériaux isolants, réfléchissants, absorbants, dont les propriétés radiatives ou transmissives sont bien connues et doivent demeurer stables pendant toute la vie de la mission. Les technologies actives utilisent des caloducs¹⁰, des volets mobiles¹¹ commandés par des bilames et, le cas échéant, des résistances chauffantes.

La disponibilité de trois sources de température très différentes (soleil 6 000°K, Terre 280°K, fond du ciel 4°K) permet d'ajuster les températures de fonctionnement dans une vaste gamme (-180°C pour le détecteur infra-rouge de Météosat, 18°C ±2°C pour les batteries d'accumulateurs de Spot, etc..).

Rappelons que pour les satellites en orbite géostationnaire, le contrôle thermique doit être assuré également en orbite de transfert où il se présente dans une configuration très différente (panneaux non ou partiellement déployés, attitude différente, etc..)

¹⁰ en anglais *heat pipes*.

¹¹ en anglais *louvers*.

EXPERTISE n°1

ACCES A L'ESPACE

(Contribution au rapport présenté par Paul LORIDANT, Sénateur de l'Essonne,
sur les ORIENTATIONS DE LA POLITIQUE SPATIALE FRANCAISE ET EUROPEENNE)

Jean-Charles POGGI

Jean-Charles POGGI

ETUDES

Ancien élève de l'Ecole Polytechnique

Master of Science (Aeronautics) California Institute of Technology, EUA

Membre de l'Académie Internationale d'Astronautique

CARRIERE

1957 Bureau des Plans à Long Terme (Sud - Aviation), participation aux premières études de missiles balistiques

Muté en 1960 à la Société pour l'Etude et la réalisation d'Engins Balistiques (SEREB)
Participation aux programmes de véhicules expérimentaux (Topaze, Saphir, Emeraude...).

Nommé en 1965 chef du programme DIOGENE. DIOGENE était un lanceur de satellites destiné à succéder à DIAMANT. Programme interrompu au profit des projets européens.

Devient en 1967 Directeur Technique puis Directeur Général de la Société Européenne pour l'Etude et l'Intégration des Systèmes Spatiaux (SETIS). Cette société avait pour mission d'assister les agences européennes de l'époque (ELDO et ESRO) dans la conduite de leurs programmes (EUROPA, Satellites...).

1972 Directeur des Programmes du GIE franco - allemand EUROMISSILE

1975 Directeur Commercial de la Division Avions d'AEROSPATIALE

1977 Directeur de Cabinet du Président d'AEROSPATIALE, le Général J.Mitterrand

1982 Directeur Général Adjoint d'AEROSPATIALE, chargé des Plans, Programmes et Budgets

Devient en 1986, Directeur de la Division Systèmes Balistiques et Spatiaux d'AEROSPATIALE

Cette division est le maître d'oeuvre industriel des grands programmes de la FNS (SSBS, MSBS et HADES)

Dans le domaine spatial, elle est:

architecte industriel d'ARIANE (ARIANE 1,2,3,4 et ARIANE 5)

Maître d'oeuvre industriel d'HERMES

Maître d'oeuvre ou partenaire industriel de nombreux programmes de satellites.

Est nommé en 1990 Chargé de Mission auprès du Président d'AEROSPATIALE.

AUTRES ACTIVITES PROFESSIONNELLES

Depuis 1983, Président Directeur Général de CORSE COMPOSANTES AERONAUTIQUES

Depuis 1987, Président Directeur Général de PYROSPACE

(PYROSPACE développe et réalise des matériels pyrotechniques installés, en particulier, sur les lanceurs Ariane et des satellites).

ACTIVITES LIEES A L'ENSEIGNEMENT

1958 - 1971 Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace (Sup'Aéro)

Depuis 1984 Président de Polytechnique féminine

Depuis 1987 Président du Conseil d'Administration de l'ENSMA (Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique) à Poitiers

L'ACCES A L'ESPACE

RESUME

1. Les **MISSIONS SPATIALES** s'exécutent selon un même schéma :

- le véhicule spatial chargé de la mission est placé sur un lanceur qui, décollant depuis une base à la surface de la Terre, l'accélère en quelques minutes jusqu'à un point au-dessus de l'atmosphère terrestre où il l'abandonne avec une grande vitesse.
- à partir de là, animé de ce seul élan, le véhicule parcourt une trajectoire balistique entièrement gouvernée par l'attraction des corps célestes naturels. Cette trajectoire est déterminée une fois pour toutes par les conditions initiales acquises en fin de lancement : position du véhicule, grandeur et orientation de sa vitesse.

Les **vitesse initiales** requises dépassent largement les normes habituelles des mobiles terrestres ou aériens :

- 7800 m/s, soit 28000 km/h, pour la mission spatiale minimum, c'est-à-dire pour placer un satellite sur une orbite à basse altitude,
- 10250 m/s, soit 37000 km/h pour lancer un satellite sur une orbite de transfert conduisant à l'altitude d'une position géostationnaire (36000 km),
- 10900 m/s, soit près de 40000 km/h pour approcher la Lune,
- 11500 m/s, soit 41400 km/h pour des voyages vers Vénus et Mars.

2. Les **LANCEURS**, qui ont la tâche de produire l'élan initial, sont la véritable clef de l'accès à l'espace.

Ils doivent être **puissants** pour fournir au véhicule spatial - dont la masse peut atteindre plusieurs tonnes - altitude et vitesse.

Ils doivent être **précis** : toute erreur sur les conditions en fin de lancement se traduit, sur la trajectoire balistique, par un écart qui croît avec le temps.

Ils doivent enfin être **fiables**.

L'énorme quantité d'énergie que le lanceur communique au véhicule spatial (énergie "potentielle" liée à l'altitude et énergie "cinétique" proportionnelle au carré de la vitesse) est apportée par la **propulsion**. Les étages du lanceur, mis à feu successivement, sont équipés de moteurs-fusées qui brûlent, dans leur chambre de combustion, un comburant et un carburant. Comburant et carburant, appelés propergols ou ergols, sont stockés à bord dans des réservoirs qui constituent l'essentiel du volume des étages. Les propergols peuvent être liquides (stockables ou cryotechniques) ou solides (blocs de poudres durcies par un liant).

La maîtrise des techniques et des technologies de la propulsion (propergols, systèmes d'alimentation, chambres de combustion, tuyères,...) est l'une des conditions essentielles de la réalisation d'un lanceur. La France possède complètement cette maîtrise, dont bénéficie l'ensemble de l'Europe.

S'il revient à la propulsion d'apporter la puissance, il incombe au système de **guidage-pilotage** d'apporter la précision.

Le guidage a pour rôle de déterminer à chaque instant la position et la vitesse du lanceur, de calculer, à partir de ces données, la trajectoire à suivre pour qu'en fin de propulsion les conditions requises soient atteintes et d'ordonner les manoeuvres correspondant au pilotage. Il repose essentiellement sur le fonctionnement de deux équipements principaux : une centrale inertielle autonome et un ordinateur puissant.

Le pilotage, qui a pour tâche d'orienter le lanceur autour de son centre de gravité, agit par le braquage de la tuyère des moteurs ou en animant des petites fusées latérales spécialisées.

Les missiles balistiques, qui fonctionnent sur le même principe, ont permis à la France - comme à la Grande-Bretagne - d'acquérir l'expérience théorique et pratique de ces systèmes.

La conception générale d'un lanceur, la définition de son architecture, la conduite de son développement, le management de sa production, la préparation des missions, la conduite des opérations de lancement,... sont aussi des "spécialités" françaises qui ont été mises à la disposition de l'Europe.

3. Les **PROGRAMMES EUROPEENS D'ACCES A L'ESPACE** se classent en deux catégories :

3.1. la première famille **ARIANE**

Après l'échec du projet EUROPA, la première famille ARIANE, constituée des ARIANE 1, 2, 3 et 4 (ARIANE 4 étant elle-même une panoplie de six lanceurs), a donné à l'Europe un accès indépendant à l'espace. Elle a même permis, à travers l'action d'Arianespace, de pénétrer à 50% le marché international civil des lancements de satellites, marché où, cependant, la concurrence est sévère. Il faut noter toutefois que ce marché ouvert est petit en comparaison de celui des lancements militaires (ou gouvernementaux) américains et soviétiques dont ARIANE est exclue. Il est bon de dire aussi que les prix pratiqués sur le marché ne tiennent pas compte, chez aucun des concurrents, de l'amortissement des dépenses de développement : la construction de lanceurs reste une activité de souveraineté des Etats, pas encore une activité économique normale.

3.2. les programmes en cours de développement

Il s'agit des deux volets liés à la décision européenne, prise à La Haye en 1987, d'aborder l'étape de l'**homme dans l'espace** : ARIANE 5 et l'avion spatial HERMES.

ARIANE 5 a pour mission de placer sur orbite des éléments de la station orbitale COLUMBUS (en vol automatique), de lancer HERMES, et de prendre la relève d'ARIANE 4 pour le lancement de satellites commerciaux.

Elle est essentiellement constituée d'un étage cryotechnique (oxygène liquide + hydrogène liquide), contenant 155 tonnes d'ergols, flanqué de deux gros propulseurs solides contenant chacun un bloc de 230 tonnes.

Bien que s'appuyant sur des technologies éprouvées, ARIANE 5 représente, en regard de ce qui s'est fait avant elle, un saut d'un ordre de grandeur (facteur 10) dans la dimension des étages et dans l'objectif de fiabilité visé.

L'avion spatial HERMES a pour mission de base de desservir le laboratoire autonome de la station COLUMBUS. Il doit être aussi capable de visiter la station internationale américaine FREEDOM et les stations soviétiques MIR 1 et MIR 2. Il peut enfin être utilisé en vol libre pour réaliser des expériences à son bord.

Il emporte un équipage de 3 hommes et un fret pouvant atteindre 3 tonnes. Lancé par ARIANE 5, il évolue dans l'espace et manoeuvre pour réaliser les rendez-vous prévus avec les stations. Il revient ensuite sur Terre en freinant à travers les couches atmosphériques avant de se poser au sol, comme un avion, sur une piste d'atterrissage normale. Il peut renouveler sa mission après une remise en état légère.

La présence d'un équipage et la rentrée atmosphérique posent aux Européens des problèmes techniques et technologiques nouveaux. C'est pourquoi le programme HERMES a été entrepris en deux phases :

- une phase préparatoire, de 1987 à 1991, destinée à vérifier en détails la faisabilité du projet en termes techniques, calendaires et financiers,
- une phase de développement proprement dit, dont le démarrage est suspendu à une nouvelle décision des Ministres européens de l'espace qui se réunissent à Munich en novembre 1991.

Le dossier établi pour cette conférence de Munich démontre la capacité de l'industrie européenne à traiter, avec le risque minimum, les problèmes nouveaux qui sont posés, en particulier :

- la sécurité de l'équipage pendant le vol,
- l'appréhension des phénomènes aérodynamiques hypersoniques intervenant pendant la rentrée atmosphérique,
- la réalisation d'une protection thermique efficace de l'avion à la rentrée.

Le développement d'HERMES permettra à l'Europe d'acquérir la maîtrise de ces sujets, transposable à d'autres projets comme, par exemple, l'avion de transport hypersonique ou la génération future de lanceurs spatiaux.

Un regard vers l'avenir montre, en effet, qu'à l'horizon d'une vingtaine d'années, le transport spatial - habité ou automatique - abandonnera les lanceurs conventionnels actuels, qui ne servent qu'une fois, au profit de lanceurs réutilisables dont les différents étages reviendront à leur base à la façon d'avions, après avoir fonctionné.

SOMMAIRE

	<i>Page</i>
• AVANT-PROPOS	1
• CHAPITRE 1 - Rappel de quelques notions de mécanique spatiale	
1.1. Attraction universelle et champs de gravitation	2
1.2. Mouvements keplériens	3
1.3. Champs de gravitation multiples	6
• CHAPITRE 2 - Les missions spatiales	
2.1. Schéma général d'une mission spatiale	7
2.2. Satellites terrestres	
2.2.1. Caractéristiques de la Terre	9
2.2.2. Orbite des satellites	9
2.2.3. Orbites circulaires	11
2.2.4. L'orbite géostationnaire	12
2.2.5. Mise sur orbite d'un satellite géostationnaire	13
2.3. Mission lunaire	15
2.4. Missions interplanétaires	16
• CHAPITRE 3 - Les lanceurs	
3.1. Fonctionnement d'un lanceur	
3.1.1. Propulsion	20
3.1.2. Etages propulsifs	22
3.1.3. Guidage-Pilotage	23
3.1.4. Architecture générale	25
3.2. Principaux choix techniques et technologiques	
3.2.1. Les propergols	27
3.2.2. Les moteurs	29
• CHAPITRE 4 - Les programmes européens d'accès à l'espace	
4.1. Rappel historique	34
4.2. La première famille ARIANE	
4.2.1. Constitution de la famille	37
4.2.2. Commercialisation ARIANE	38
4.3. Programmes en cours de développement	
4.3.1. ARIANE 5	41
4.3.2. HERMES	44
4.4. Regards vers l'avenir	
4.4.1. Lanceurs futurs	52
4.4.2. Missions futures	55

AVANT-PROPOS

La soif de connaître, le désir de comprendre et le besoin d'explorer sont des traits caractéristiques de la nature profonde de l'homme. Ils ont été les moteurs de sa prodigieuse évolution.

Au cours des âges, l'homme s'est ingénié à construire des instruments pour étendre la faculté de perception de ses sens ; à bâtir des sciences pour expliquer les relations de causes à effets ; à concevoir des moyens de transport et de survie pour partir à la découverte de son monde.

Pendant des millénaires, les déplacements ont été limités à la surface de la Terre, comme ceux d'une fourmi à la surface d'un ballon. La pesanteur terrestre interdisait les tentatives d'éloignement vertical : l'homme est ainsi resté longtemps contraint à vivre dans un univers bi-dimensionnel.

Notre vingtième siècle marquera, à cet égard, une étape capitale dans l'histoire de l'humanité : en ouvrant l'accès à l'espace, il aura offert à l'homme la possibilité de se mouvoir dans la troisième dimension.

Cette nouvelle liberté a été acquise grâce au degré de maturité qu'ont atteint les connaissances scientifiques, techniques et technologiques de quelques pays avancés. Elle commence à peine à être exploitée. Elle le sera certainement bien davantage dans les années et les siècles futurs, dans des domaines que l'imagination d'aujourd'hui ne sait pas - ou n'ose pas - encore situer.

Les Français et leurs partenaires européens ont la chance d'être des acteurs de cette révolution. Leur savoir-faire leur a déjà permis de concevoir et de construire, dans le cadre de programmes sagement et efficacement menés, les premiers outils de l'accès à l'espace. Ils ont, vis-à-vis de l'humanité, le devoir de poursuivre ce chemin.

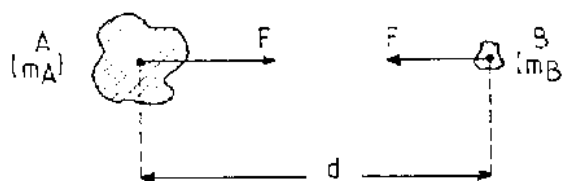
CHAPITRE I

RAPPEL DE QUELQUES NOTIONS DE MECANIQUE SPATIALE

1.1. ATTRACTION UNIVERSELLE ET CHAMPS DE GRAVITATION

- Dans l'univers, la matière possède une étonnante propriété :

Lorsque deux corps matériels A et B, de masses respectives m_A et m_B , sont mis en présence, il apparaît entre eux une force d'attraction réciproque.



La force F qui s'exerce sur le corps A a strictement la même intensité que celle qui s'exerce, en sens opposé, sur le corps B.

Sans connaître la nature, ni la cause, de cette force, **Isaac NEWTON** (1642-1727) a établi, de façon purement intuitive, que son intensité était seulement :

- proportionnelle aux masses m_A et m_B ,
- inversement proportionnelle au carré de la distance d ce qui sépare les centres des deux corps,

ce qui s'exprime sous la forme :

$$F = G \frac{m_A \times m_B}{d^2}$$

où G est une **constante universelle**, indépendante des corps en présence.

Cette formule simple est à la base de tous les calculs de mécanique spatiale.

- Selon le principe fondamental de la mécanique, lorsqu'un corps de masse m est soumis à une force F , il se met en mouvement avec une accélération γ , dirigée dans la même direction que F , telle que :

$$F = m \gamma$$

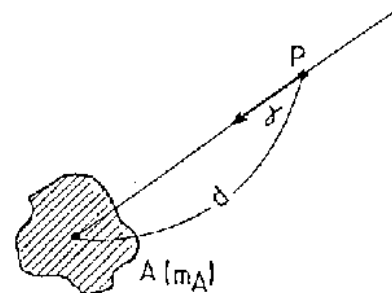
.../...

En appliquant ce principe au corps B soumis à la force d'attraction F donnée par la formule de Newton, on trouve que B prend une accélération γ_B , dirigée vers le centre de A, dont la valeur est égale à :

$$\gamma_B = \frac{F}{m_B} = \frac{1}{m_B} \times G \frac{m_A \times m_B}{d^2} = G \frac{m_A}{d^2}$$

On constate que cette accélération est **indépendante de la masse m_B** . Si donc un autre corps quelconque - de masse plus petite ou plus grande - occupait la même position que B, il prendrait, en présence de A, une **accélération identique**.

En généralisant ce résultat, on peut dire qu'à chaque point P de l'espace, autour du corps A, est associée une **accélération γ** que prendrait un corps matériel quelconque situé en ce point. Cette accélération est parfaitement déterminée :



- en direction : elle est orientée vers le centre de A
- en grandeur : elle est égale à $G \frac{m_A}{d^2}$, d étant la distance de P au centre de A.

L'ensemble des accélérations lié à l'ensemble des points P autour de A constitue, au sens mathématique, un **champ**, appelé **champ de gravitation** du corps A.

Tout corps matériel possède son champ de gravitation. Son intensité est d'autant plus forte que la masse du corps est grande et qu'on se situe plus près de son centre.

La Terre, par exemple, est un corps matériel dont le champ de gravitation nous est familier. Tout objet au voisinage de sa surface subit une accélération verticale (dirigée vers le centre de la Terre) dont la grandeur a la valeur bien connue de $9,8 \text{ m/s}^2$: c'est l'**accélération de la pesanteur**.

1.2. MOUVEMENTS KEPLERIENS

- Revenons aux deux corps A et B en présence. Soumis aux accélérations respectives :

$$g_A = G \frac{m_B}{d^2} \quad \text{et} \quad g_B = G \frac{m_A}{d^2}$$

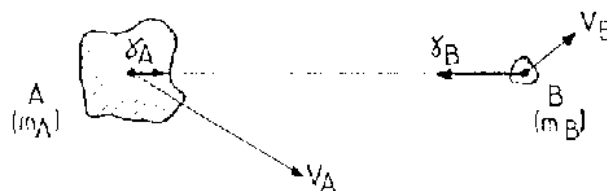
A et B vont se mettre en mouvement.

.../...

- a) Dans le **cas simple** où, à l'origine, A et B sont au repos (ou, ce qui est équivalent, si aucun d'eux n'est animé d'une vitesse relative vis-à-vis de l'autre), les deux corps se rapprochent dans un mouvement rectiligne accéléré jusqu'à ce que leurs surfaces entrent en contact. Le corps le plus léger étant soumis à l'accélération la plus forte, c'est lui qui effectue la part la plus grande du trajet de rapprochement. Ce cas est illustré par la **chute verticale des corps** sur la Terre : on dit d'ailleurs que c'est en observant la chute d'un gland de chêne que Newton aurait eu l'intuition de sa formule.

Une fois les surfaces de A et de B en contact, le mouvement s'arrête : la force d'attraction mutuelle, toujours présente, est alors équilibrée par la pression entre les surfaces. Tout objet à la surface de la Terre, par exemple, n'y reste au repos que lorsque la force d'attraction (qu'on appelle son poids) est équilibrée par une pression verticale du sol.

- b) Dans le cas général où les corps A et B sont initialement animés de vitesses quelconques, V_A et V_B ,



A et B vont décrire des trajectoires qui ont été étudiées par les mathématiciens sur le thème, devenu classique, du "**problème des deux corps**". Ce problème a reçu une solution analytique complète dans l'hypothèse où chacun des corps peut être assimilé à un point.

En mécanique spatiale, cette hypothèse simplificatrice est proche de la réalité :

- les corps célestes naturels ont tous une forme très voisine d'une **sphère** (soit homogène, soit formée de couches concentriques homogènes). On démontre aisément que ces corps ont, à l'extérieur de la sphère, le même champ de gravitation que si leur masse était concentrée en leur centre ;
- les objets spatiaux artificiels ont des dimensions si petites en regard de leur distance aux centres des corps célestes naturels, qu'il est légitime de les assimiler à des points.

La résolution du "**problème des deux corps**" permet de définir aussi bien les mouvements **absolus** de A et B que les mouvements **relatifs** de l'un vis-à-vis de l'autre.

Si on considère, par exemple, le mouvement relatif de B vis-à-vis de A - c'est-à-dire le mouvement de B tel qu'il serait perçu par un observateur situé sur A - les calculs donnent les **résultats** suivants :

- la trajectoire de B est une courbe **plane simple**, dite "conique" (**ellipse, parabole ou hyperbole**) dont le centre de A constitue l'un des foyers.

La nature de la conique dépend uniquement de la grandeur de la vitesse relative initiale de B.

Si la vitesse initiale est inférieure à une certaine valeur critique **VL** la trajectoire est une **ellipse**, c'est-à-dire une courbe **fermée** décrite indéfiniment : B reste alors un "**satellite**" de A et sa trajectoire est appelée "**orbite**".

Si la vitesse initiale est égale à **VL**, la trajectoire de B est une **parabole** : B s'éloigne à "l'infini" de A. A partir d'une distance suffisamment grande, le champ de gravitation de A devient si faible qu'il peut être tenu pour nul.

On peut considérer que B s'est ainsi "libéré" de l'attraction de A. C'est pour cette raison que la vitesse critique **VL** est appelée "**vitesse de libération**".

Sur une trajectoire parabolique, on démontre que la vitesse de B tend vers zéro lorsque la distance à A tend vers l'infini.

Si la vitesse initiale est supérieure à la vitesse de libération **VL**, la trajectoire de B est une **hyperbole** qui, elle aussi, l'éloigne à l'infini de A. Mais, à la différence du cas précédent, la vitesse relative de B, au lieu de tendre vers zéro, tend vers une valeur "asymptotique" non nulle : lorsque B sort du champ de gravitation de A, il reste encore animé d'une vitesse résiduelle par rapport à A.

- la trajectoire de B est parcourue selon la "**loi des aires**" : au cours du mouvement, la surface balayée par le segment de droite qui joint le centre de A au centre de B, reste toujours le même pendant un intervalle de temps donné. On en déduit, en particulier, que la vitesse sur la trajectoire augmente quand B se rapproche de A, et diminue lorsqu'il s'en éloigne.
- dans le cas d'une trajectoire elliptique, la durée de parcours d'une orbite (**durée de révolution**) est simplement liée à la grandeur du "grand axe" de l'ellipse : le carré de la durée de révolution est proportionnel au cube de ce grand axe.

En donnant au Soleil le rôle du corps A et à chacune des planètes du système solaire le rôle d'un corps B, on peut déterminer par cette méthode les caractéristiques du mouvement des planètes vis-à-vis du Soleil.

Bien avant qu'ait été résolu le "problème des deux corps", l'astronome **Johannes KEPLER** (1571-1630) avait déjà établi, à partir de pures observations, les lois auxquelles semblait obéir le mouvement des planètes : ces lois, nées de l'intuition, sont parfaitement conformes aux résultats des calculs modernes, tels qu'ils ont été énoncés ci-dessus.

C'est en hommage à Kepler que les mouvements dans le champ de gravitation d'un corps matériel sont appelés "**mouvements keplériens**".

1.3. CHAMPS DE GRAVITATION MULTIPLES

Dans l'espace, même limité au système solaire, les corps célestes sont nombreux. Ils échantent, deux à deux, leurs forces d'attraction. En toute rigueur, les mouvements qui en résultent doivent être étudiés en résolvant non pas le "problème des deux corps", mais le problème plus général de "N corps".

Cette question a passionné longtemps les mathématiciens. Si le cas des "trois corps" a pu être partiellement traité, il a fallu renoncer à trouver une solution mathématique au cas des N corps, qui ne peut être approché que par une méthode de résolution numérique à base d'ordinateurs puissants.

L'étude du mouvement d'un objet artificiel lancé dans l'espace (satellite, sonde, ..), introduit comme un (N + 1)ème corps dans le système, justifierait, en principe, le même traitement numérique complet. Deux considérations viennent heureusement simplifier le problème :

- La masse de l'objet artificiel, - infiniment petite en regard de celle des corps célestes naturels, - ne crée pas un champ de gravitation suffisant pour modifier le mouvement établi des corps célestes. Ce mouvement est consigné dans des éphémérides qui donnent, en fonction du temps, la position des corps dans le ciel et, en conséquence, la disposition des divers champs de gravitation qui agissent sur l'objet : sa trajectoire peut être alors calculée par intégration numérique à partir de ces données.
- Lorsque le corps artificiel B se trouve dans le voisinage immédiat d'un corps naturel A (Terre, Lune, planète, ...), A et B se situent - vis-à-vis des autres corps beaucoup plus éloignés - dans une même région de l'espace. On peut donc considérer que le champ de gravitation des autres corps exerce, en première approximation, une action identique sur A et sur B et n'affecte donc pas le **mouvement relatif** de B par rapport à A.

Ce mouvement relatif peut être ainsi étudié comme un mouvement képlérien pur autour de A, au moins tant que le **différentiel** des accélérations, subies respectivement par A et B de la part des autres corps célestes, reste négligeable devant l'accélération principale imposée à B par le corps A. Tant que cette hypothèse est vérifiée, on dit que B reste dans la "**sphère d'influence**" de A.

Dans le système solaire, la sphère d'influence du Soleil englobe les orbites de toutes les planètes. Chaque planète dispose de sa propre sphère d'influence, qui forme comme une "bulle" au sein de celle du Soleil. Les satellites naturels d'une planète (la Lune pour la Terre, par exemple) orbitent dans cette bulle, au sein de laquelle ils possèdent eux-mêmes une sphère d'influence de plus petite dimension. Ces considérations amènent à définir une trajectoire interplanétaire (de la Terre vers Vénus, par exemple) comme formée de trois arcs képlériens :

- au départ, un premier arc "géocentrique" dans la sphère d'influence de la Terre,
- ensuite, un arc "héliocentrique" vis-à-vis du Soleil,
- à l'arrivée, un troisième arc "vénérocentrique" dans la sphère d'influence de Vénus.

Ce schéma simplifié permet de se faire une première idée de la forme de la trajectoire et d'en calculer, avec une assez bonne approximation, les paramètres principaux.

.../...

CHAPITRE 2

LES MISSIONS SPATIALES

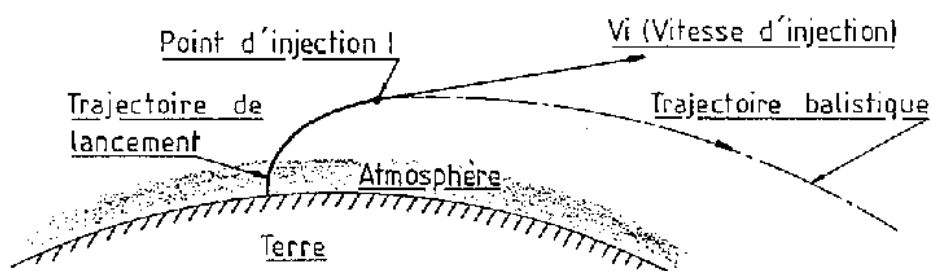
2.1. SCHEMA GENERAL D'UNE MISSION SPATIALE

Les missions spatiales, telles qu'elles sont réalisées aujourd'hui, se déroulent toutes selon un même schéma.

Le véhicule qui contient les instruments chargés de la mission (satellite, capsule habitée, sonde d'exploration, ...) est disposé à bord d'un lanceur dont il constitue la "charge utile".

Le lanceur décolle verticalement de son "pas de tir" à la surface de la Terre. Ses différents étages propulsifs, fonctionnant successivement, conduisent le véhicule - après un vol qui ne dure que quelques minutes - jusqu'à un point *i* au-dessus de l'atmosphère terrestre. En ce point *i* (appelé "point d'injection"), le véhicule a atteint une vitesse V_i . Il est alors séparé du dernier étage du lanceur.

A partir de là, le mouvement du véhicule est uniquement gouverné par les forces d'attraction des corps célestes naturels (Terre, Lune, Soleil, planètes). Ces forces d'attraction lui communiquent des accélérations indépendantes de sa masse (cf Chapitre 1).



Ainsi, quelle que soit sa masse - quelques kilos ou quelques tonnes - le véhicule parcourra la même trajectoire, complètement définie par la donnée des conditions initiales :

- la date t_i de passage de *i*, qui détermine la position qu'occupent dans le ciel les corps célestes naturels et, par là, la disposition des champs de gravitation qui vont agir.
- la position du point *i*,
- la vitesse V_i , en grandeur et en direction.

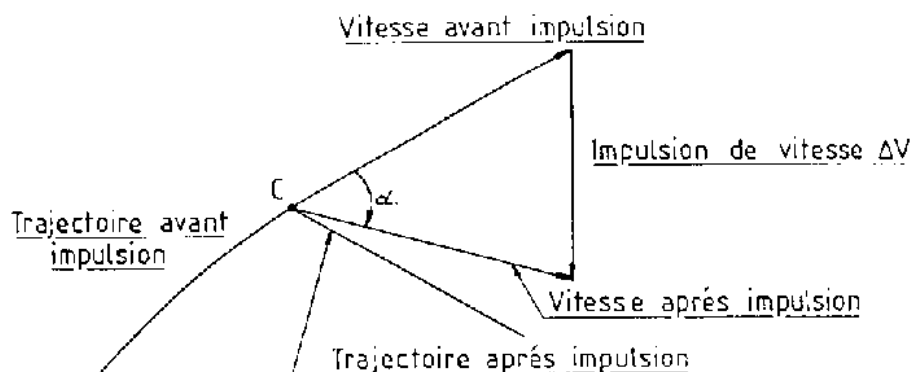
.../...

Le parcours de cette trajectoire - purement "ballistique", et le long de laquelle le véhicule est en "chute libre" dans l'espace - constitue l'essentiel, en durée et en distance, de la mission spatiale.

Si la trajectoire a besoin, en cours de route, d'être modifiée :

- soit pour corriger les écarts par rapport à la trajectoire souhaitée,
- soit parce que la mission le demande : changement de plan ou de forme d'orbite pour un satellite ; transformation de la trajectoire des orbites autour d'une planète ; atterrissage sur une autre planète, etc.

les modifications ne peuvent être obtenues qu'en agissant, à des moments précis sur la vitesse du véhicule (en grandeur et en direction), grâce au fonctionnement d'un système propulsif embarqué. Ce système est mis à feu pendant un intervalle de temps généralement court. Sa poussée, convenablement orientée, communique une "impulsion de vitesse" ΔV qui s'ajoute géométriquement à la vitesse acquise sur la trajectoire initiale selon la loi classique du "triangle de composition des vitesses" :



L'impulsion de vitesse ΔV , appliquée au point de correction C, permet au véhicule d'amorcer une nouvelle trajectoire balistique définie par d'autres conditions initiales :

- la position du point C,
- une nouvelle vitesse, différente - en grandeur comme en direction - de la vitesse acquise en C sur la trajectoire antérieure.

Lorsque la modification demandée se réduit simplement à une accélération ou à un freinage de la vitesse, sans changement d'orientation (angle α nul), l'impulsion ΔV est bien entendu donnée, soit dans le sens de la vitesse, soit en sens opposé.

Si la mission comporte un atterrissage sur une planète pourvue d'atmosphère, le véhicule peut économiser, en partie, l'usage de son système propulsif embarqué en se servant du freinage atmosphérique. A noter que cette manœuvre impose une protection particulière du véhicule contre les fortes pressions aérodynamiques et l'échauffement, phénomènes qui accompagnent inévitablement la traversée rapide des couches atmosphériques.

Au total, le schéma général actuel d'une mission spatiale comporte donc :

- une **phase de lancement**, de courte durée, qui donne au véhicule un **élan initial**, comme un canon donne sa vitesse initiale à un obus,
- une longue phase de vol purement **balistique**, éventuellement entrecoupée de **courtes phases propulsées**,
- dans certains cas, une phase terminale de **freinage atmosphérique**.

2.2. SATELLITES TERRESTRES

Les missions les plus nombreuses sont consacrées aujourd'hui au lancement de satellites autour de la Terre.

2.2.1. Quelques caractéristiques de la Terre

- La Terre a une **forme** voisine de celle d'une sphère de près de 6 400 km de rayon.
- Sa **masse** (6×10^{21} tonnes = 6 000 milliards de milliards de tonnes) est infiniment supérieure à celle de tout satellite artificiel, même de grandes dimensions.
- La Terre est entourée d'une **mince couche d'atmosphère**, dont la densité décroît très rapidement avec l'altitude : la densité de l'air à 16 km d'altitude n'est déjà plus que le dixième de ce qu'elle est au niveau de la mer ; à 100 km, elle est un million de fois plus petite.

Au-delà de 100 km, l'atmosphère n'est plus constituée que de molécules et d'atomes épars, essentiellement ionisés, dont la densité - extrêmement faible - varie en fonction de la latitude et du niveau de l'activité solaire.

- La Terre **tourne sur elle-même**, autour de l'axe des pôles, à raison d'un tour par 24 heures. C'est grâce à cette rotation que l'axe des pôles conserve, par stabilisation gyroscopique, une **direction fixe** dans l'espace.

Les points de la surface terrestre, entraînés par la rotation, sont animés d'une vitesse vers l'Est, qui atteint sa valeur maximale à l'équateur, soit 460 m/s (ou 1 667 km/h).

- La Terre décrit autour du Soleil une **orbite** presque circulaire dont le rayon moyen est voisin de 150 millions de km, avec un temps de parcours de 365 jours 1/4. A noter que le plan de cette orbite ("plan de l'écliptique") n'est pas confondu avec le plan de l'équateur terrestre (l'angle entre ces deux plans est de $23^{\circ} 27'$). Sur son orbite, la vitesse de la Terre est de 29 800 m/s (soit plus de 107 000 km/h).

2.2.2. Orbite des satellites

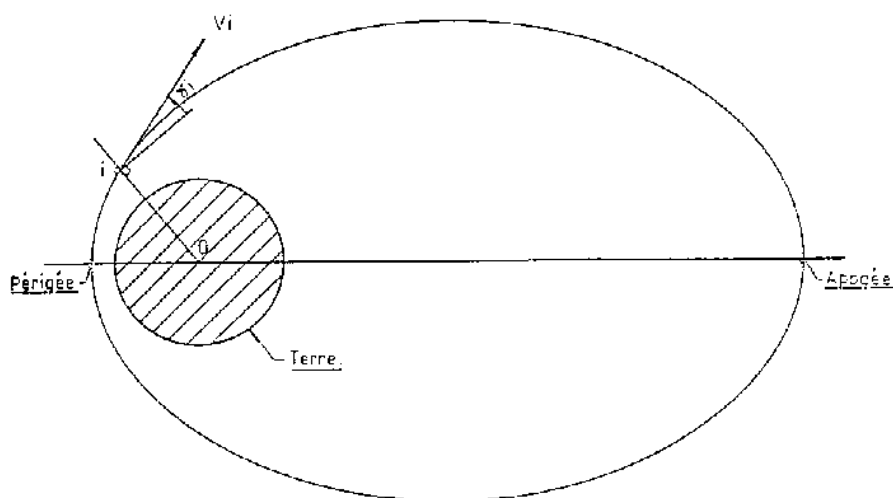
On démontre (cf chapitre 1) que lorsqu'un objet est abandonné au voisinage de la Terre, en un point i avec une vitesse V_i , il décrit un mouvement dit "**keplérien**", dont la trajectoire est une courbe plane simple dite "**conique**" (ellipse, parabole ou hyperbole). Le centre de la Terre constitue l'un des foyers de ces coniques.

.../...

A condition que la grandeur de la vitesse V_i soit inférieure à une certaine valeur critique, dite "**vitesse de libération**", la trajectoire est une **ellipse**, courbe fermée, parcourue indéfiniment. Pour une vitesse V_i égale ou supérieure à la vitesse de libération, l'objet s'éloigne à l'infini de la Terre : son mouvement n'est plus périodique. La valeur de la vitesse de libération ne dépend que de l'altitude du point i :

Altitude de i	Vitesse de libération
200 km	11 010 m/s
500 km	10 770 m/s
1 000 km	10 390 m/s

Pour placer un satellite sur une orbite de la Terre, il faut donc lui donner une vitesse d'injection inférieure à la vitesse de libération. Il décrit alors une orbite elliptique :



Le centre O de la Terre est l'un des foyers de l'ellipse. Le satellite atteint l'altitude maximum à l'**apogée** de la trajectoire, et l'altitude minimum à son **périgée**. La ligne apogée-périgée passe par le centre O .

Les vitesses du satellite à l'apogée et au périgée sont dans le rapport inverse des distances au centre O : la vitesse au périgée est la plus rapide de la trajectoire, celle à l'apogée en est la plus lente.

La ligne Oi est la **verticale** du point d'injection. Dans le plan de la trajectoire, la vitesse V_i est inclinée de l'angle γ_i sur l'horizontale de i .

Il est clair que les conditions d'injection (**i**, **Vi** et **oi**) doivent être telles que la distance du périhélie au centre de la Terre soit au moins supérieure au rayon de la sphère terrestre, faute de quoi le satellite percuterait le sol. En réalité, l'altitude du périhélie doit être suffisamment élevée (au moins 150 km) pour éviter le freinage de sa vitesse par l'atmosphère.

Nota :

Lorsque les satellites restent - ou passent souvent - dans la zone d'altitude entre 150 km et 300 km, l'effet cumulé des impacts contre les rares molécules de la très haute atmosphère finit, à la longue, par réduire progressivement leur vitesse. Ils perdent alors de l'altitude et, ce faisant, rencontrent des couches de plus en plus denses qui les freinent de plus en plus. Ce processus divergent les amène à terminer leur vie, la plupart en brûlant sous l'effet de l'échauffement aérodynamique, quelques-uns en retournant vers le sol. L'atmosphère a ainsi la propriété de "s'auto-nettoyer" lentement des objets (satellites périmés ou débris) qui l'encombrent.

2.2.3. Cas particulier des orbites circulaires

L'orbite circulaire est une orbite elliptique particulière, pour laquelle périhélie ou apogée sont à la même altitude. C'est une orbite recherchée pour de nombreuses applications (observation, télécommunications,...).

Pour l'obtenir, deux conditions doivent être réunies pour la vitesse **Vi** :

- au point **i** d'injection, elle doit être horizontale (angle γ_i nul)
- sa grandeur doit atteindre une vitesse spécifique dite "vitesse d'orbitation circulaire".

La **vitesse d'orbitation circulaire** dépend de l'altitude de **i**, comme l'indique le tableau suivant, qui donne en outre la période de révolution (temps de parcours d'une orbite) correspondante.

Altitude	Vitesse d'Orbitation Circulaire	Période
200 km	7 789 m/s	88,3 mn
500 km	7 613 m/s	94,6 mn
1 000 km	7 350 m/s	105,1 mn
35 786 km	3 070 m/s	23 h 56 mn

On constate que :

- la vitesse exigée pour placer un satellite sur orbite basse est très élevée : de l'ordre de 7 800 m/s, soit plus de 28 000 km/h.

La plus modeste des missions spatiales - l'installation d'un satellite dans la proche banlieue de la Terre - demande la mobilisation d'une grande quantité d'énergie : le lanceur doit en effet, non seulement amener sa charge utile à l'altitude d'injection (et lui fournir ainsi une énergie "potentielle" d'autant plus grande que l'altitude est plus haute), mais encore lui communiquer une énorme énergie "cinétique" proportionnelle au carré de la vitesse d'injection.

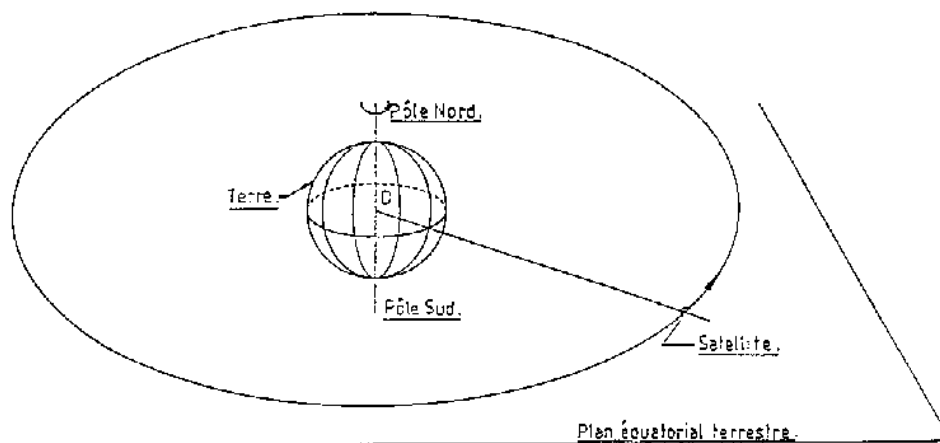
- Quand l'altitude d'orbite croît, la vitesse exigée diminue. Il ne faut pas en déduire que l'effort demandé au lanceur en est pour autant réduit : l'énergie supplémentaire qu'il doit dépenser pour conduire le satellite à une altitude plus élevée dépasse largement l'économie qu'il fait sur l'énergie cinétique, comme on le verra plus loin.
- La période de révolution augmente quand l'altitude d'orbitation s'accroît. A basse altitude, cette période est de l'ordre de 1 h 30 mn.

A une altitude très spécifique, voisine de 36 000 km, la période de révolution est exactement égale à la période de révolution sidérale (23 h 56 mn) de la Terre sur elle-même. Cette orbite mérite une attention toute particulière.

2.2.4. L'orbite géostationnaire

Imaginons qu'un satellite S soit placé sur une orbite circulaire, à 36 000 km d'altitude, situé dans le plan de l'équateur terrestre. Si, de plus, le satellite parcourt cette orbite d'Ouest en Est, c'est-à-dire dans le sens de rotation de la Terre sur elle-même, il bouclera chaque révolution dans le même temps qu'il faut à la Terre pour accomplir un tour autour de son axe des pôles. Ainsi le mouvement du satellite sur son orbite paraît comme entraîné par la rotation terrestre.

Pour un observateur à la surface de la Terre, le satellite semble immobile dans l'espace : on dit qu'il est géostationnaire.



Cette propriété est largement utilisée pour les satellites de télécommunications. Les stations d'émission et de réception qui, depuis la surface de la Terre, sont en liaison avec un satellite géostationnaire, peuvent en effet opérer de façon permanente, dans une direction fixe, comme elles le feraient avec un relais terrestre. La plupart des satellites de télécommunications en service aujourd'hui sont situés sur cette orbite privilégiée.

.../...

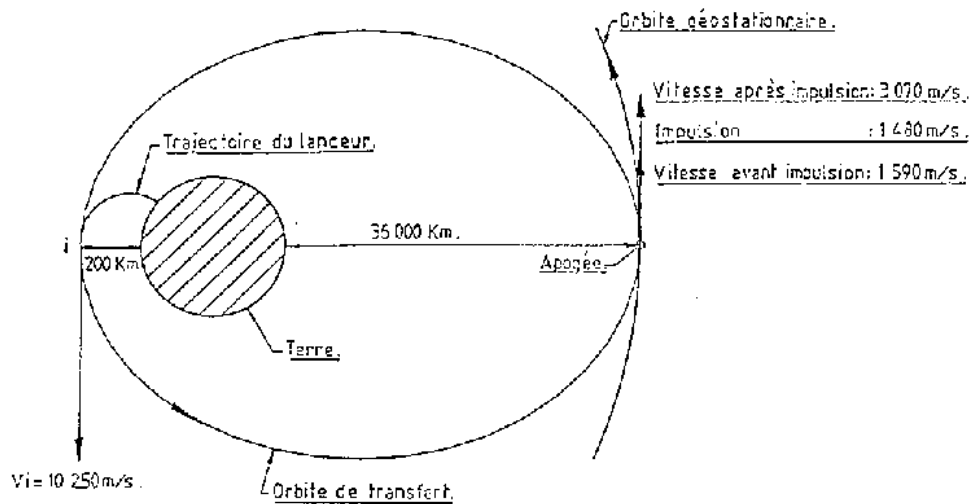
2.2.5. Mise sur orbite d'un satellite géostationnaire

Compte tenu de l'altitude élevée de l'orbite géostationnaire, il est exclu que les lanceurs y placent leurs satellites d'un seul élan.

Deux types de procédures sont actuellement pratiqués :

a) Procédure de type ARIANE

Le lanceur accélère le satellite jusqu'à un point i d'altitude relativement basse (de l'ordre de 200 km), atteint avec une vitesse horizontale de 10 250 m/s, telle que la trajectoire au-delà de i soit une ellipse dont l'apogée se situe à 36 000 km d'altitude. Cette ellipse est appelée "orbite de transfert". Lorsque le satellite passe à l'apogée de l'orbite de transfert, un système de propulsion embarqué ajoute à sa vitesse une impulsion de 1480 m/s, qui lui permet d'atteindre la vitesse d'orbitation circulaire en ce point.



Remarques :

- Cette procédure peut être généralisée au lancement de tout satellite à placer sur orbite haute. Il s'agit d'une procédure à "double impulsion". La première impulsion est fournie par le lanceur qui place le satellite, après l'avoir emmené au-delà de l'atmosphère, sur une orbite de transfert culminant à l'altitude finale recherchée. Une seconde impulsion, appliquée à l'apogée de l'orbite de transfert, permet d'atteindre la vitesse d'orbitation circulaire demandée. On peut démontrer que cette procédure est optimale, c'est-à-dire la moins coûteuse en énergie.
- On peut laisser le satellite parcourir plusieurs fois l'orbite de transfert avant d'appliquer la deuxième impulsion, ce qui permet - si nécessaire, d'attendre de meilleures conditions (éclairage du satellite par le Soleil, visibilité depuis certaines stations, ...) au moment de l'installation sur l'orbite finale.

- On constate que le "coût" total de la mise sur orbite géostationnaire, mesuré par la somme des impulsions de vitesse à donner au satellite, atteint :

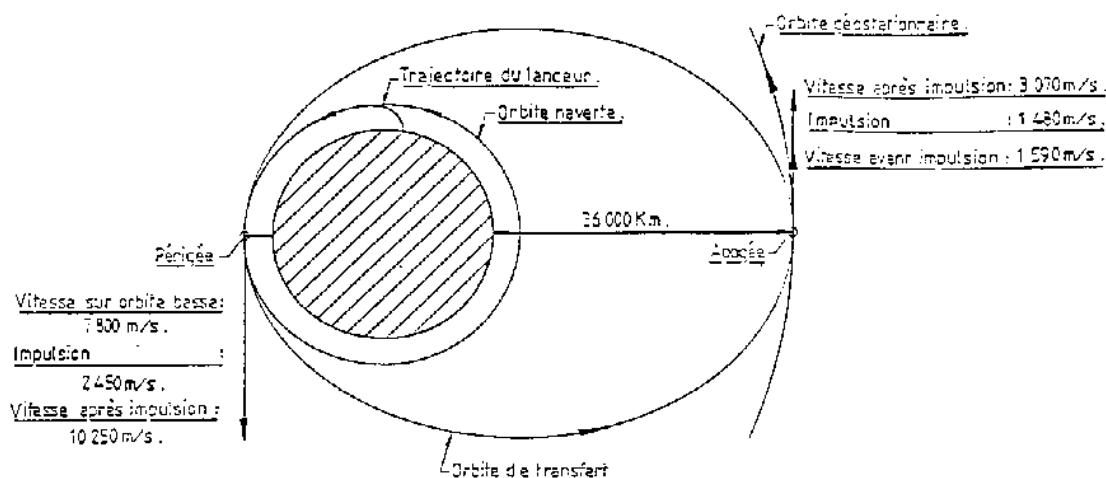
$$10\,250\text{ m/s} + 1\,480\text{ m/s} = 11\,730\text{ m/s}$$

niveau bien supérieur au "coût" du lancement d'un satellite sur orbite basse (soit 7 800 m/s)

b) Procédure utilisée par la navette américaine

La navette emporte le satellite dans sa soute et se place, avec lui, sur une orbite circulaire à basse altitude (200 km par exemple), parcourue à la vitesse de 7 800 m/s. Le satellite est alors sorti de la soute, et un premier système propulsif ("moteur de périgée") lui donne une impulsion de 2 450 m/s qui, ajoutée à la vitesse déjà acquise, lui permet de se placer sur une orbite de transfert culminant à 36 000 km d'altitude.

A l'un des apogées de l'orbite de transfert, un second système propulsif lui communique - comme dans le cas Ariane - une autre impulsion de 1 480 m/s pour l'amener à la vitesse d'orbitation circulaire finale.



Il est clair que la procédure de type ARIANE - qui est aussi celle des lanceurs conventionnels américains - est plus simple à mettre en oeuvre que celle de la navette (qui demande des manipulations du satellite et un moteur supplémentaire au périgée).

La navette, que les Américains avaient décidé de retenir comme leur **unique** moyen de lancement, apparaît comme mal adaptée à la mise sur orbite des satellites géostationnaires, lesquels représentent pourtant l'un des plus importants segments du marché spatial actuel. Au plan commercial, ARIANE a su profiter de cette situation.

Il faut noter enfin que, l'orbite géostationnaire recherchée se situant dans le plan de l'équateur terrestre, les schémas présentés (et les vitesses qui sont données) faisaient l'hypothèse que toutes les manoeuvres de mise sur orbite se déroulaient dans ce plan.

Cette hypothèse est vérifiée dans le cas d'un tir d'ARIANE réalisé depuis Kourou (Guyane) ; en effet, Kourou est pratiquement situé sur l'équateur. Les lancements américains ne bénéficient pas de ce privilège. La navette, par exemple, lancée depuis Cap Kennedy, en Floride, se place sur une orbite basse dont l'inclinaison sur l'équateur est au minimum de 29°. Les deux impulsions qu'il faut donner ensuite au satellite doivent être **supérieures** aux valeurs nominales données ici pour pouvoir corriger cet angle.

2.3. MISSION LUNAIRE

La **Lune**, satellite naturel de la Terre, est le corps céleste le plus proche de nous. Elle a naturellement été très vite (dès 1958) considérée comme une cible prioritaire.

Il peut être utile de rappeler quelques-unes des caractéristiques de la Lune :

- sa **forme** est celle d'une sphère de 3 470 km de rayon,
- sa **masse** représente 1,2 % seulement de la masse de la Terre,
- elle décrit autour de la Terre une **orbite** qu'on peut, en première approximation, assimiler à un cercle de 384 000 km de rayon. Le plan de cette orbite est incliné de 5° sur le plan de l'écliptique.
La période de ce mouvement est de 27,3 jours.
La vitesse de la Lune sur son orbite est de 1 km/s.
- la Lune est animée d'une **rotation** sur elle-même, autour d'un axe perpendiculaire au plan de son orbite, à raison d'un tour tous les 27,3 jours (période identique à celle de son mouvement autour de la Terre) : elle présente donc toujours la même face vers la Terre. L'observation de la face arrière de la Lune (sa face "cachée") n'avait jamais pu être faite par les astronomes avant l'ère spatiale ; l'envie de percer ce mystère a conduit à donner très tôt une forte motivation aux missions circumlunaires.

Un schéma approché d'une mission lunaire peut se décrire de la façon suivante : le lanceur injecte le véhicule spatial à une altitude de 200 km par exemple, sur une orbite de transfert dont l'apogée se situe à une altitude supérieure à l'altitude d'orbitation de la Lune, de telle sorte que l'orbite de transfert **intersecte** la trajectoire lunaire; l'instant t_i de l'injection doit être bien entendu choisi de façon que la Lune soit au **rendez-vous** du véhicule au passage de l'intersection.

La vitesse **minimale** requise est celle qui correspond à une orbite de transfert qui culmine à l'altitude d'orbitation lunaire, le rendez-vous se réalisant à l'apogée de cette orbite. Sa valeur est de **10 900 m/s**, à peine inférieure à la vitesse de libération (11 000 m/s).

A cette vitesse minimale est associé un temps de parcours maximal, de l'ordre de 5 jours. Pour réduire le temps de parcours, il suffit d'accroître la vitesse initiale. Le calcul montre qu'en ajoutant 50 m/s seulement à la vitesse d'injection (soit moins de 0,5%), on divise par deux la durée du trajet (2,5 jours). On note ainsi la grande sensibilité de la trajectoire à de petites variations de la vitesse initiale.

A l'approche de la Lune, le champ de gravitation lunaire, dont l'action pouvait être négligée pendant une grande partie du trajet sur l'orbite de transfert, devient prépondérant. Le mouvement du véhicule doit alors être étudié dans un système de référence lié à la Lune. Dans ce système, la trajectoire est une conique keplérienne dont le centre de la Lune constitue l'un des foyers.

On peut montrer que la vitesse du véhicule à l'entrée de ce système (vitesse relative par rapport à la Lune) est toujours supérieure à la vitesse de libération lunaire ; aucun véhicule lancé depuis la Terre ne peut, sans freiner sa vitesse, être "capturé" par la Lune et devenir un satellite lunaire.

Pour orbiter autour de la Lune, se poser à sa surface et, éventuellement, décoller pour un retour vers la Terre, le véhicule devra disposer de systèmes propulsifs embarqués. C'est ainsi qu'étaient équipés les engins américains et soviétiques qui ont réalisé leurs spectaculaires missions.

2.4. MISSIONS INTERPLANETAIRES

L'exploration du système solaire - à des fins, aujourd'hui encore, purement scientifiques - est un autre volet des missions spatiales.

On appelle système solaire l'ensemble composé :

- du **Soleil**, étoile centrale de forte masse (plus de 300 000 fois celle de la Terre),
- de neuf planètes qui décrivent des trajectoires keplériennes elliptiques autour du Soleil,
- des satellites naturels des planètes,
- de divers objets célestes plus petits (astéroïdes, comètes,...) qui orbitent aussi autour du Soleil.

Les planètes - et, plus particulièrement, les planètes "internes" ou "telluriques" (Mercure, Vénus et Mars) - sont des cibles qui excitent la curiosité des astronomes et astrophysiciens.

Le tableau de la page suivante donne quelques caractéristiques des neuf planètes du système solaire.

On constate dans le tableau que, à l'exception de Mercure et Pluton (planètes qui sont respectivement la plus proche et la plus éloignée du Soleil), des planètes décrivent des orbites :

- de très faibles excentricités, très voisines de cercles,
- dont le plan est très peu incliné sur l'écliptique.

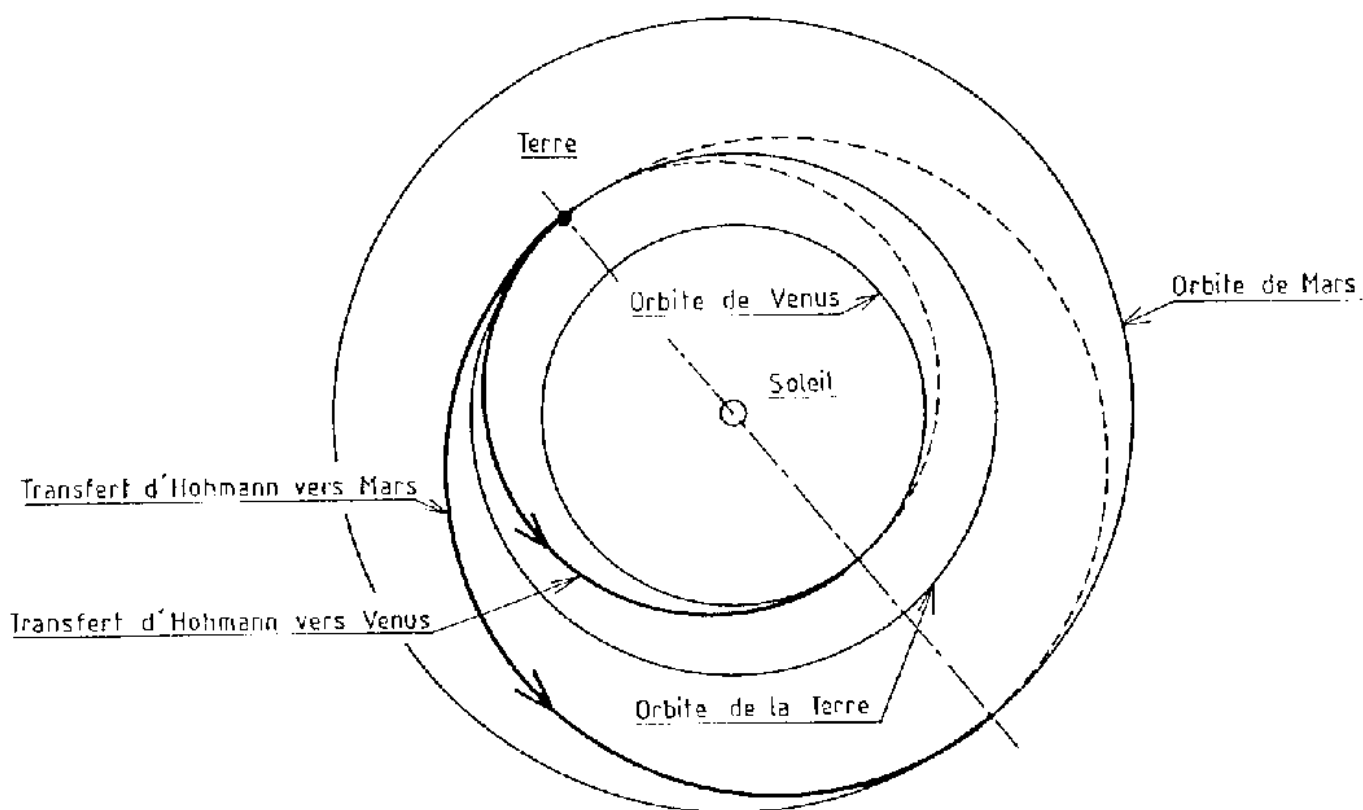
Il se trouve, en outre, que ces orbites sont parcourues dans le même sens de giration autour du Soleil.

En première approximation, on peut donc représenter des orbites des planètes, de Vénus à Neptune, selon le modèle simple de **cercles concentriques**, centrés sur le Soleil, et situés **dans un même plan**, ces cercles étant décrits dans le même sens giratoire.

.../...

	Planètes internes (telluriques)				Planètes externes				
	Mercure	Vénus	Terre	Mars	Jupiter	Saturne	Mars	Neptune	Pluton
Masse par rapport à la Terre	0,05	0,8	1	0,1	318	95	14,5	17,2	-
Densité moyenne	5,4	5,2	5,5	3,9	1,3	0,7	1,3	1,8	-
Diamètre moyen (km)	5 150	12 500	12 750	6 880	143 000	120 700	53 800	49 700	-
Distance moyenne au Soleil (millions de km)	57,9	108,2	149,6	227,9	778,4	1423,6	2867	4488,4	5909,6
Excentricité de l'orbite	0,206	0,007	0,017	0,09	0,05	0,05	0,05	0,01	0,25
Période de révolution (en jours terrestres)	87,97	224,7	365,25	686,98	4332,6	10759,2	30668,4	60181,3	90469,7
Vitesse moyenne sur orbite (km/s)	47,89	35,03	29,79	24,13	13,06	9,64	6,81	5,43	4,74
Inclinaison par l'écliptique (degrés)	7,004	3,394	0	1,85	1,308	2,488	0,774	1,774	17,148

Dans ce modèle, on démontre que les trajectoires qui permettent de passer de la Terre à une autre planète (Mars et Vénus, par exemple), avec le **minimum d'énergie**, sont des ellipses keplériennes par rapport au Soleil (c'est-à-dire dont le Soleil constitue l'un des foyers), tangentes au départ à l'orbite de la Terre, et tangentes à l'arrivée à l'orbite de la planète visée. Les trajectoires sont appelées "**ellipses de transfert d'Hohmann**".



Dans le cas d'un voyage vers Mars (dont la distance au Soleil est supérieure à celle de la Terre), la vitesse initiale du transfert d'Hohmann, par rapport au Soleil, doit être de 32,6 km/s.

La Terre se déplaçant sur son orbite avec une vitesse linéaire de 29,8 km/s, il faut donc que le véhicule interplanétaire reçoive au départ, dans le sens du déplacement de la Terre, un supplément de vitesse de 2,8 km/s.

Mais le lanceur à qui incombe la tâche de donner cette vitesse aura, en fait, à fournir un effort bien plus grand. On a vu en effet que tant que la vitesse d'injection, par rapport à la Terre, reste inférieure à la vitesse de libération, les véhicules lancés parcourent des orbites elliptiques autour de la Terre et restent donc, en moyenne, solidaires de la Terre dans son parcours autour du Soleil.

Pour permettre au véhicule de sortir du "puits" du champ de gravitation terrestre, le lanceur devra lui donner une vitesse supérieure à la vitesse de libération, de telle sorte que, une fois suffisamment éloigné du voisinage de la Terre, sa vitesse résiduelle soit :

- orientée dans le sens de l'avancée de la Terre sur son orbite,
- égale, en grandeur, à 2,8 km/s.

Le calcul montre qu'à basse altitude, la vitesse d'injection nécessaire pour satisfaire ces conditions est voisine de **11500 m/s**.

La durée du transfert, égale à la demi-période de révolution sur l'ellipse d'Hohmann, est alors de 258 jours terrestres.

Pour un voyage vers Vénus, - qui orbite plus près du Soleil que la Terre - la vitesse initiale du transfert d'Hohmann, par rapport au Soleil, est de 27,15 km/s, inférieure de 2,65 km/s à la vitesse de la Terre. Le véhicule spatial doit donc recevoir une impulsion de vitesse, dans le sens **opposé** au mouvement de la Terre, de valeur 2,65 km/s. La vitesse d'injection correspondante, donnée à basse altitude, devra atteindre **11400 m/s** (valeur voisine de celle qui était nécessaire pour un voyage vers Mars).

La durée de transfert, dans ce cas, est de 145 jours terrestres.

Remarque :

Pour que les transferts d'Hohmann soient réalisables, il faut que les planètes occupent des positions particulières : la position de la Terre au moment du départ et celle de la planète cible au moment de l'arrivée doivent être en opposition par rapport au Soleil. Cette configuration favorable n'est pas fréquente : elle ne se présente que tous les 19 mois pour Vénus et tous les 25 mois pour Mars. Elle est beaucoup plus rare encore pour les planètes supérieures, dont les périodes de révolution sont très longues.

Dans la pratique, pour élargir le champ des créneaux de tir possibles, on sera conduit à choisir des trajectoires qui "intersectent" (au lieu de "tangenter") l'orbite des planètes cibles. Ces trajectoires sont plus coûteuses en énergie (elles demandent au lanceur des vitesses d'injection plus élevées), mais correspondant à des durées de trajet plus courtes, ce qui peut être un avantage pour certaines missions (vols habités par exemple).

A l'arrivée dans le champ de gravitation de la planète visée, les mouvements du véhicule peuvent être étudiés comme des mouvements képlériens par rapport au centre de la planète. Si des manoeuvres sont prévues par la mission (survol à une altitude commandée, orbitation, atterrissage, ...), le véhicule doit disposer à son bord d'un système propulsif pour les réaliser.

CHAPITRE 3

LES LANCEURS

Comme on vient de le voir, la réalisation de toute mission spatiale repose d'abord sur la performance d'un lanceur, véritable **clef** de l'accès à l'espace.

Ce lanceur doit être **puissant**. Il a la tâche de conduire hors de l'atmosphère une charge utile pouvant atteindre plusieurs tonnes et de l'accélérer jusqu'à des vitesses qui dépassent largement les normes habituelles des mobiles terrestres ou aériens :

- 28 000 km/h pour la mission spatiale minimale (mise en orbite basse d'un satellite de la Terre),
- 37 000 km/h pour un satellite géostationnaire,
- plus de 40 000 km/h pour atteindre les corps célestes les plus proches (Lune, Mars, Vénus).

Ce lanceur doit être **précis**. La trajectoire des véhicules spatiaux étant définie par les paramètres d'injection (position, grandeur et orientation de la vitesse) atteints en fin de phase de lancement, toute imprécision sur ces paramètres entraîne un écart de la trajectoire. Cet écart doit rester aussi faible que possible pour pouvoir être corrigé, au cours du vol spatial, par des dispositifs de propulsion embarqués raisonnablement dimensionnés.

Ce lanceur, enfin, doit être **fiable**. Les véhicules spatiaux emportés, généralement construits en un petit nombre d'exemplaires, sont précieux et coûteux. L'échec d'un lancement est toujours lourd de conséquences pour un programme.

Pour réunir ces trois qualités - puissance, précision et fiabilité - la réalisation d'un lanceur exige, aux stades de la conception, du développement, de la fabrication et de la mise en oeuvre :

- la maîtrise de nombreuses techniques et technologies, touchant à une grande variété de disciplines,
- un outil industriel performant,
- des équipes d'hommes compétentes, bien organisées et motivées.

Peu de pays, dans le monde, sont capables de rassembler ces conditions. Après les Etats Unis et l'Union Soviétique, l'Europe fait aujourd'hui partie de ces "happy few", essentiellement grâce à l'action de la France.

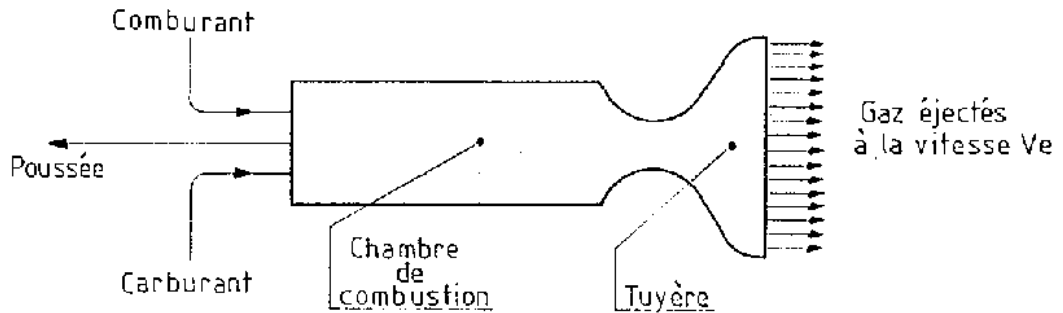
3.1. PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT D'UN LANCEUR

3.1.1. Propulsion

Le lanceur propulse sa charge utile par l'action d'une force de **poussée** produite par des **moteurs**. La poussée demandée est en général élevée : il faut en effet, pour gagner de l'altitude, que sa composante verticale soit supérieure au poids du lanceur. Dans l'état actuel de la technique, la propulsion **chimique** est la seule qui permette de remplir cette condition.

Les moteurs (moteurs-fusées) fonctionnent selon le schéma suivant.

Un "comburant" et un "carburant", stockés tous deux à bord du lanceur, sont amenés à brûler ensemble dans une **chambre de combustion**. La combustion, réaction chimique d'oxydo-réduction qui dégage une grande chaleur, produit des gaz à haute température. Ces gaz sont éjectés vers l'arrière de la chambre à travers une **tuyère**. En vertu du principe "de l'action et de la réaction", leur éjection crée une force de **poussée** vers l'avant.



La poussée produite est proportionnelle :

- au débit des gaz éjectés, qui est exactement égal au débit d'entrée du carburant et du comburant dans la chambre,
- à la vitesse d'éjection V_e des gaz à la sortie de la tuyère, vitesse qui dépend de la chaleur dégagée par la combustion (plus elle est grande, plus V_e est élevée) et du "taux de détente" des gaz dans la tuyère.

Comburant et carburant sont appelés du nom générique d'**ergols** et de **propergols**.

Les propergols peuvent être de deux grands types :

a) **Propergols liquides**

Il s'agit de produits chimiques stockés à l'état liquide dans des réservoirs de bord séparés. Ils sont amenés vers la chambre de combustion :

- soit poussés par une pression supérieure créée dans les réservoirs,
- soit puisés par des pompes, généralement entraînées par des turbines (turbopompes).

Les régulateurs permettent d'ajuster les débits des deux ergols, de façon à contrôler à la fois le débit global (et par là, la poussée) et le rapport de mélange.

b) **Propergols solides**

Comburant et carburant, produits chimiques solides, sont intimement mélangés sous forme de poudre, puis mêlés à un "liant" organique qui, en polymérisant, durcit l'ensemble. On constitue ainsi un **bloc solide**, renfermé dans un réservoir unique qui sert, en même temps, de chambre de combustion. Dans les conditions de stockage normal, comburant et carburant doivent rester insensibles l'un à l'autre. La combustion ne se produit que lorsqu'ils sont portés à haute température par un **allumeur**.

Après allumage, le bloc brûle seulement à sa surface, le débit des gaz produits étant alors proportionnel à la surface de combustion. En pratiquant à l'intérieur du bloc une cavité de forme étoilée, on peut faire en sorte que cette surface reste quasiment constante pendant la durée de la combustion, ce qui assure la constance de la force de poussée.

Sous l'action de la poussée, le lanceur est mis en mouvement. La performance du système de propulsion est mesurée par l'**impulsion de vitesse équivalente** qu'il est capable de fournir, impulsion donnée par la formule simple :

$$\Delta V = v_e L \frac{m_i}{m_f}$$

où : v_e est la vitesse d'éjection des gaz

$L \frac{m_i}{m_f}$ est le logarithme népérien du rapport des masses :

m_i : masse initiale du lanceur, en début de propulsion

m_f : masse finale du lanceur, une fois les ergols épuisés

L'impulsion ΔV ainsi définie est la traduction, en terme de vitesse, de l'énergie produite par la propulsion. En réalité, sur la trajectoire, une partie de cette énergie est dépensée pour gagner de l'altitude, une autre partie sert à vaincre les forces de résistance aérodynamique au cours de la traversée de l'atmosphère. La vitesse acquise en fin de propulsion n'est donc que la fraction restante du ΔV fourni.

3.1.2. Etages propulsifs

La masse des réservoirs qui contiennent les ergols fait partie de la masse finale m_f du lanceur. Cette masse est donc accélérée par la propulsion au même titre que la charge utile, ce qui exige la dépense d'une énergie supplémentaire.

Or, si la masse des réservoirs est justifiée, au départ, par le volume total des ergols emportés, elle devient inutilement surdimensionnée au fur et à mesure que les ergols sont consommés. Pour minimiser l'énergie supplémentaire consacrée à l'accélérer, il faudrait que cette masse soit en permanence ajustée au volume des ergols restant à bord : l'idéal serait que les réservoirs soient consommés au même rythme que leur contenu. Cet idéal n'est pas réalisable. Il peut cependant être approché par la segmentation du lanceur en étages.

Dans la pratique, un lanceur est constitué de plusieurs étages propulsifs. Chaque étage est formé d'un système de propulsion (moteur unique ou assemblage de moteurs) et des réservoirs associés. Lorsqu'il a épuisé ses ergols, il est séparé du lanceur. L'étage suivant, alors mis à feu, a une tâche plus facile puisqu'il n'a plus à accélérer la masse vide de son prédécesseur.

Cette formule est avantageuse au plan des performances. Elle implique, en contrepartie, une plus grande complexité du lanceur due :

- à la nécessité d'équiper chaque étage d'un système propulsif indépendant,
- à la multiplication des événements dans la séquence de vol (découpes, séparations, mises à feu successives, ...) qui demande la mise en oeuvre d'équipements spécifiques variés et tend à réduire la fiabilité de l'ensemble.

L'analyse montre qu'il n'y a pas intérêt à empiler un trop grand nombre d'étages. Le meilleurs compromis se situe souvent autour de 3 à 4.

C'est au stade de la conception qu'est définie la contribution (en termes de ΔV individuels) que chaque étage doit apporter à la performance globale, en tenant compte :

- des technologies utilisées sur les différents étages,
- des contraintes imposées par la trajectoire,

de façon à rendre minimale la masse du lanceur au décollage.

3.1.3. Guidage - Pilotage

Alors que la propulsion apporte au lanceur sa puissance, il incombe au guidage-pilotage d'apporter la précision.

Tout au long du vol propulsé, le guidage a pour rôle :

- de déterminer à chaque instant les coordonnées de la position et de la vitesse du lanceur,
- de calculer, à partir de ces données, la trajectoire à suivre pour atteindre les conditions d'injection recherchées en fin de vol propulsé,
- d'ordonner les manoeuvres correspondantes au pilotage.

Le pilotage :

- contrôle la position du lanceur autour de son centre de gravité,
- exécute les ordres élaborés par le guidage.

A l'instar des missiles balistiques, les lanceurs sont équipés d'un système de **guidage inertiel** opérant selon les principes suivants :

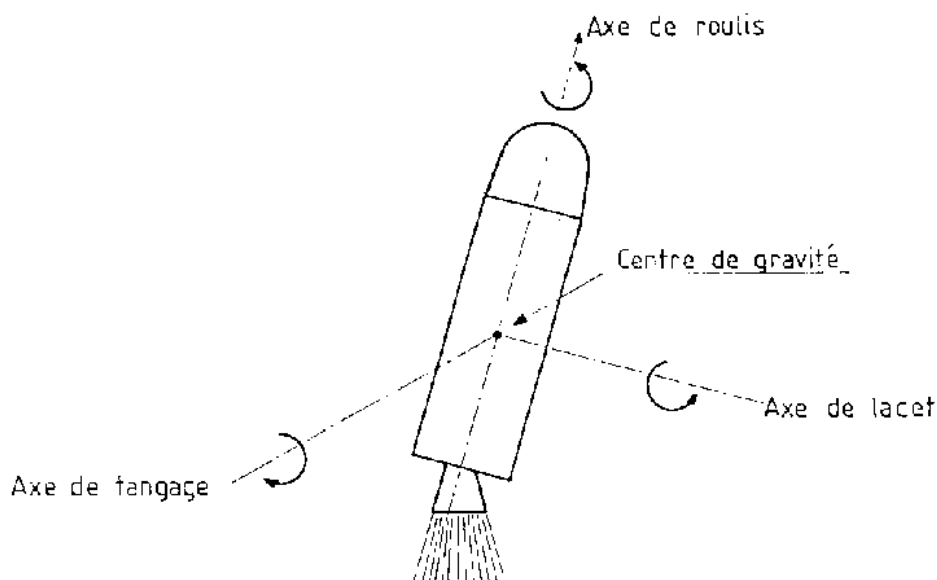
Une **plateforme** est montée sur des supports mobiles (cardans) à bord du lanceur. Des **gyroscopes**, associés à des moteurs-couples électriques, imposent à la plateforme de garder une **direction fixe** dans l'espace, quels que soient les mouvements du lanceur. Sur la plateforme ainsi stabilisée sont fixés trois **accéléromètres**, disposés selon les axes d'un trièdre trirectangle. Les accéléromètres mesurent les accélérations subies à chaque instant par le lanceur : un **calculateur de bord** effectue une première intégration mathématique de ces mesures pour obtenir les coordonnées de la **vitesse** ; une seconde intégration fournit les coordonnées de la **position**.

En réalité, les accéléromètres sont insensibles à l'accélération de la pesanteur. Ils ne mesurent que l'accélération produite par la poussée et, quand elles existent, par les forces aérodynamiques. Ainsi le "point" (entendu au sens des navigateurs) calculé à partir de leurs indications est d'abord faux. Pour le corriger, le calculateur dispose, dans une mémoire, d'une table donnant les composantes de l'accélération de la pesanteur pour chaque position dans l'espace. En ajoutant aux mesures les informations puisées dans cette table, le calculateur peut rétablir - après quelques rapides itérations - les coordonnées exactes du point et de la vitesse.

Sur la base de ces données réelles, le même calculateur définit les paramètres de la trajectoire restant à parcourir pour que, en fin de propulsion, l'ensemble position/vitesse atteigne la valeur correspondant à la mission programmée.

Le système de guidage inertiel fonctionne de façon **autonome**, sans besoin de liaisons avec le sol.

Le pilotage du lanceur contrôle les mouvements en **tangage, lacet et roulis**.



Les mouvements en **tangage/lacet** s'obtiennent par **déviations** des forces de poussée.

Pour les étages utilisant des **propulseurs liquides**, la réalisation en est simple : l'ensemble chambre de combustion/tuyère est monté "à la cardan" sur un bâti, avec la possibilité d'osciller de quelques degrés dans deux directions perpendiculaires, sous la sollicitation de vérins. Les ordres de pilotage sont transmis aux vérins qui "braquent" ainsi le jet de la tuyère dans la direction souhaitée, de la quantité angulaire voulue.

Pour les étages à **propulsion solide**, cette procédure n'est pas praticable puisque le réservoir, qui constitue le corps même de l'étage, fait office de chambre de combustion : il faut agir alors sur le jet de la tuyère. Plusieurs types de dispositifs peuvent être mis en oeuvre, les deux plus fréquents étant :

- l'injection de fluide extérieur dans le divergent de la tuyère, qui crée une dissymétrie commandée dans l'éjection des gaz,
- le débattement de la tuyère vis-à-vis du corps du propulseur.
Ce débattement peut être rendu possible en montant la tuyère sur le fond arrière du propulseur par l'intermédiaire d'une articulation flexible autorisant des mouvements angulaires de quelques degrés sous la sollicitation de vérins.

.../...

Les mouvements en **roulis** s'obtiennent :

- par braquage différentiel des moteurs, si l'étage est équipé de plusieurs moteurs,
- par l'utilisation d'un dispositif spécifique, constitué de petites tuyères alimentées par gaz, pour les étages monomoteurs.

3.1.4. Architecture générale

Tous les lanceurs "conventionnels" sont bâtis selon le même type d'architecture.

a) Ils sont d'abord formés d'un **empilage d'étages propulsifs**.

Chaque étage à propergols liquides est constitué :

- de réservoirs cylindriques, fermés par des fonds de forme sphérique ou ellipsoïdique. Les deux réservoirs (carburant et comburant) sont :
 - soit distincts : ils sont alors disposés l'un au-dessus de l'autre et reliés par une structure cylindrique de même diamètre dite "jupe inter-réservoirs",
 - soit intégrés, avec un fond commun séparant les ergols.

Les réservoirs font partie de la structure "travaillante" de l'étage. Ils contribuent à la tenue mécanique de l'ensemble du lanceur.

- d'un bâti moteur à l'arrière, accroché sur une structure ("jupe arrière"), sur lequel sont montés :
 - les moteurs (chambre de combustion, tuyère, système d'alimentation, ...)
 - les organes de pilotage (vérins,...)
 - des accessoires divers.

Les étages à propulsion solide sont constitués d'un réservoir cylindrique unique fermé par des fonds. Sur le fond arrière est disposée la tuyère, avec ses organes de pilotage.

Le premier étage du lanceur est souvent flanqué de **propulseurs d'appoint**, à propergols liquides ou solides, qui permettent d'accroître la poussée au décollage en même temps qu'ils apportent leur propre contribution d'impulsion de vitesse.

Les divers étages propulsifs sont reliés entre eux par des structures (cylindriques s'ils sont de même diamètre, tronconiques si les diamètres sont différents) appelées "jupes interétages". Sur ces jupes sont fixés les systèmes de séparation (cordeaux pyrotechniques de découpe, rétrofusées,...).

b) Au-dessus de l'ensemble des étages propulsifs est placée une "case à équipements" qui abrite en particulier :

- la centrale de guidage inertiel,
- le calculateur associé, qui joue en outre le rôle de séquenceur pour ordonner les événements successifs du vol (séparations, allumages des moteurs, ...),

- des équipements d'alimentation électrique,
 - un répondeur radar pour permettre une trajectographie à partir des stations sol,
 - un système de télémessure qui transmet au sol l'évolution au cours du vol d'un certain nombre de paramètres,
 - un récepteur de télécommande de destruction éventuelle en vol,
 - divers autres équipements.
- c) La charge utile est disposée sur un support au-dessus de la case à équipements. Ce support, plus ou moins complexe selon que le lanceur réalise des lancements simples ou multiples, est équipé d'un système de langage qui permet la séparation en fin de propulsion du dernier étage.
- d) La charge utile est protégée, pendant la traversée de l'atmosphère, par une coiffe qui est larguée dès que la pression dynamique est devenue négligeable (aux environs de 100 km d'altitude).

Ainsi construits, les lanceurs sont installés en position verticale sur leur "pas de tir". Leur premier étage est mis à feu dans cette position : ils entament alors le parcours de leur trajectoire à travers l'atmosphère.

Pour un lanceur conventionnel, la présence de l'atmosphère est la source de nombreux problèmes :

- elle induit des **forces aérodynamiques** qui se traduisent par :
 - une résistance à l'avancement (trainée aérodynamique), que le lanceur doit vaincre en produisant un surcroît d'énergie ;
 - une "portance", force latérale qui naît dès que l'axe du lanceur s'écarte d'un angle α (angle d'incidence) de la direction de la vitesse par rapport à l'air. Cette portance crée des efforts latéraux importants qui menacent de rompre les structures (en particulier au niveau des jupes). Pour éviter de trop renforcer ces structures (ce qui ajouterait une masse pénalisante), le lanceur devra être piloté de façon que son incidence reste aussi faible que possible tant que les pressions dynamiques sont élevées.
- elle crée, le long des parois du lanceur, une couche d'air turbulente qui donne naissance à des vibrations acoustiques de forte intensité, dont les équipements embarqués doivent être protégés ;
- elle limite le rendement de propulsion des moteurs : la présence d'air, d'une certaine densité, ne permet pas d'éjecter les gaz de combustion à la vitesse maximale ;
- enfin, elle oblige à protéger la charge utile par une coiffe dont la masse pénalise les performances.

L'ensemble de ces problèmes influence de nombreux éléments de l'architecture détaillée du lanceur.

3.2. PRINCIPAUX CHOIX TECHNIQUES ET TECHNOLOGIQUES

Le développement d'un lanceur, depuis sa conception jusqu'à sa qualification en vol, s'étend sur une période de huit à dix ans. Les techniques et technologies à utiliser dans sa construction sont choisies au tout début de cette période, au stade de l'avant-projet. Elles doivent être :

- suffisamment avancées pour donner les meilleures performances,
- suffisamment maîtrisées, au moment de leur mise en oeuvre, pour assurer le succès du programme.

Le compromis n'est pas facile à trouver. Les choix initiaux trop conservateurs risquent de conduire à un produit qui devient rapidement obsolète et non compétitif. Des choix trop ambitieux risquent de ne pas aboutir dans les délais prévus et d'entraîner par là, soit une révision déchirante du programme, soit des surcoûts difficiles à supporter : le programme du Space Shuttle américain est une illustration de ce cas.

Avant d'être prises en compte dans un programme, les technologies prometteuses doivent d'abord faire l'objet de travaux spécifiques de recherche et développement, allant jusqu'à des réalisations industrielles probatoires, essayées dans des conditions représentatives de leur utilisation future.

Les programmes actuels de lanceurs - en service ou en développement - font essentiellement appel à des technologies dérivées, par extrapolation raisonnable, des générations antérieures. Les projets plus révolutionnaires (lanceurs du type avion, avec moteurs aérobies, ...) envisagés aujourd'hui pour l'avenir, devront attendre, pour devenir réalité, que les technologies sur lesquelles ils reposent aient démontré un degré de maturité suffisant.

Jusque là, les lanceurs conventionnels ont encore devant eux de nombreuses années d'utilisation. Les Américains, qui les avaient imprudemment écartés au profit de la navette, y reviennent.

Pour ces lanceurs conventionnels, les choix techniques et technologiques fondamentaux touchent principalement le domaine de la propulsion : propergols et moteurs.

3.2.1. Les propergols

La chimie offre une grande variété de produits utilisables comme propergols. Leur choix obéit à certains critères, parmi lesquels :

- la capacité énergétique

Il y a bien entendu avantage à utiliser un couple comburant/carburant dont la combustion produise le maximum de chaleur, de façon à obtenir la plus grande vitesse d'éjection des gaz. En contrepartie, la chambre de combustion et la tuyère seront soumises à de plus hautes températures et devront être équipées d'un système de refroidissement plus performant.

- la densité

Les propergols de forte densité occupent moins de volume et demandent des masses plus faibles de réservoirs.

- la facilité de mise en oeuvre

Selon la nature des produits, les opérations de stockage et de manipulation (sur le champ de tir, mais surtout dans les installations d'essais au sol des moteurs) sont plus ou moins faciles et plus ou moins dangereuses.

Certains ergols - ou certains produits de leur combustion - peuvent être nocifs pour l'environnement.

- la disponibilité sur le marché

Il est avantageux d'utiliser des produits qui ont d'autres applications sur le marché, de façon à assurer la sécurité des approvisionnements, la constance de la qualité et la stabilité des prix.

C'est en tenant compte de ces critères que les constructeurs convergent aujourd'hui vers les mêmes compromis :

• **pour les propergols liquides**

- comburants : acide nitrique
péroxyde d'azote
oxygène

Les deux premiers sont liquides à température ordinaire. Ils sont dits "stockables". L'oxygène, pour être liquide, doit être refroidi jusqu'à - 219 degrés centigrades (soit 54 degrés kelvin, au-dessus du zéro absolu des températures). On dit qu'il est "cryotechnique".

- carburants : kerosène
hydrazine
UDMH (Unsymmetrical Di-Methyl Hydrazine) ou MMH (Mono-Méthyl Hydrazine)
hydrogène

Les trois premiers sont "stockables".

L'hydrogène est "cryotechnique" : il n'est liquide qu'à très basse température (- 253 degrés centigrades, soit 20 degrés à peine au-dessus du zéro absolu).

Parmi les combinaisons possibles entre ces produits, les Européens ont arrêté leur choix sur **deux couples** seulement :

- Péroxyde d'azote (N₂ O₄) et UH 25 (mélange UDMH et MMH)

Facilement stockables, de densité normale (respectivement 1,4 et 0,8), ces produits industriels donnent, par leur combustion, des vitesses d'éjection de l'ordre de 3500 m/s.

- Oxygène liquide/hydrogène liquide

Ces produits cryotechniques, disponibles sur le marché, doivent être conservés à très basse température. Si la densité de l'oxygène liquide est normale (1,1), celle de l'hydrogène liquide est très faible : 0,07. La masse du réservoir d'hydrogène, à bord du lanceur, sera donc anormalement élevée à cause du volume occupé et de la nécessité d'une forte isolation thermique.

Par contre, le couple fournit des vitesses d'éjection de l'ordre de 4600 m/s.

• **pour les propergols solides**

Il s'agit essentiellement d'un propergol dit "composite", dans lequel :

- le comburant est du perchlorate d'ammonium
- le carburant, de la poudre d'aluminium
- le liant, un polybutadiène

De densité élevée (1,7), il produit des vitesses d'éjection assez basses (2500 m/s seulement) comparées à celles des propergols liquides. Il compense cette faiblesse relative de performances par une grande simplicité de mise en oeuvre.

La France (SNPE) a acquis la maîtrise de la réalisation de ce propergol, utilisé pour la propulsion des missiles balistiques de la force de dissuasion. L'Italie (BPD) en a aussi l'expérience.

3.2.2. Les moteurs

3.2.2.1. Moteurs à propergols liquides

a) *Alimentation*

Pour amener les ergols vers la chambre de combustion, le moyen le plus simple consiste à **pressuriser les réservoirs**. Sous l'effet de la pression, les ergols s'écoulent naturellement vers la chambre, à condition, bien entendu, que la pression de combustion dans la chambre reste inférieure à la pression dans les réservoirs.

Le premier étage du lanceur Diamant utilisait cette méthode.

Mais la simplicité du procédé a pour contrepartie :

- une masse plus élevée des réservoirs, qui doivent être dimensionnés pour supporter leur pression interne,
- une masse plus élevée des moteurs qui, fonctionnant avec une pression de chambre limitée, doivent être plus gros pour fournir une poussée donnée.

Par effet de "boule de neige", un étage propulsif opérant avec ce type d'alimentation atteint vite, pour produire l'impulsion de vitesse ΔV qui lui est impartie, des dimensions imposantes.

Dans le cas d'un moteur à flux intégré, la totalité du débit de carburant passe dans le générateur de gaz où il "prébrûle" avec une partie du débit du comburant. A la sortie de la turbine, les gaz sont injectés dans la chambre de combustion. Ce procédé - utilisé sur les moteurs hydrogène/oxygène de la navette américaine - permet de tirer le rendement maximum de la combustion des ergols.

Les moteurs à flux dérivé ont un rendement un peu inférieur dans la mesure où les gaz éjectés par le tuyau d'échappement disposent encore d'une petite quantité d'énergie qui n'est pas utilisée. Par contre, ils ont l'avantage de se prêter à un développement plus facile : leurs différents composants peuvent être mis au point séparément sans attendre d'avoir assemblé un moteur complet.

Tous les moteurs d'ARIANE sont à flux dérivé.

Sur le moteur Viking, les pompes peroxyde d'azote et UDMH tournent à la même vitesse (9600 tours par minute). Elles sont entraînées par une seule turbine.

Sur le moteur HM7, la pompe hydrogène tourne à 60500 tours par minute et la pompe oxygène à 13000 tours par minute. Elles sont entraînées cependant par une seule turbine grâce à la présence d'un réducteur à engrenages.

Sur le moteur Vulcain, la pompe hydrogène (35000 tours par minute) et la pompe oxygène (13000 tours par minute) disposent chacune de leur propre turbine.

Pour éviter qu'apparaisse dans les pompes un phénomène de "cavitation" (vaporisation du liquide dans le corps de la pompe), phénomène particulièrement redouté dans la propulsion cryotechnique, une pression est appliquée sur les ergols en amont des pompes :

- soit en installant sur les circuits d'alimentation des "pompes de gavage" (moteurs de la navette américaine),
- soit en pressurant légèrement les réservoirs (ARIANE).

b) *Chambre de combustion*

Les ergols pénètrent dans la chambre de combustion à travers des injecteurs qui les pulvérisent en fines gouttelettes et font en sorte que comburant et carburant se mélangent.

L'allumage initial se produit soit spontanément (c'est le cas des ergols dits "hypergoliques", tels que le couple peroxyde d'azote/UDMH), soit avec l'aide d'un allumeur pyrotechnique (cas de l'oxygène/hydrogène). Après l'allumage, la température dans la chambre devient suffisante pour que la combustion se poursuive.

Cette température (quelques milliers de degrés) impose en général de protéger la chambre et la tuyère. Pour de courtes durées de propulsion et pour des ergols moyennement énergétiques, une protection passive (couche d'isolant thermique) peut suffire. Dans les autres cas, il faut mettre en oeuvre un refroidissement actif, réalisé :

- soit par l'injection, le long des parois internes, d'un "film" de carburant liquide (moteur Viking),
- soit par la circulation, dans une double paroi entourant l'ensemble, du débit de carburant avant son injection dans la chambre (moteurs HM7 et Vulcain).

.../...

c) **Commentaires**

Les moteurs à propergols liquides permettent d'utiliser les ergols les plus énergétiques. Ils sont d'une grande souplesse d'emploi (modulation éventuelle de la poussée, orientation de la poussée pour le pilotage, extinction et éventuels réallumages). Leurs organes (turbopompes, chambres refroidies, ...) fonctionnent en régime établi, ce qui permet de longues durées de propulsion (et l'essai au sol des matériels destinés au vol).

Mais ils sont certainement les éléments les plus **complexes** d'un étage propulsif.

Leur développement est long (7 à 10 ans). Il implique la mise au point d'un grand nombre de sous-ensembles, demandant des moyens d'essais coûteux. L'expérience des hommes y joue un grand rôle : beaucoup de problèmes rencontrés ne sont pas accessibles au calcul et doivent trouver des solutions empiriques à vérifier au banc d'essais.

En dépit de leur complexité, les moteurs doivent être **fiables**. Leur fiabilité s'acquiert :

- au stade de la conception, par le choix d'une architecture, de techniques et de technologies éprouvées,
- au stage du développement, par la recherche systématique des limites de fonctionnement des divers sous-ensembles et du moteur complet,
- au stade de la production de série, par la mise en place d'un outil industriel précis et rigoureux et par l'essai au sol des matériels de vol.

Dans la répartition européenne des tâches ARIANE, la France a tenu à conserver la maîtrise d'oeuvre de ces moteurs parce qu'elle la considérait, à juste titre, comme un élément-clef de l'accès à l'espace.

Pour des raisons de coût et de disponibilité des équipes, les programmes de moteurs sont peu nombreux. Chaque type de moteur est utilisé longtemps : il faut qu'il possède un certain potentiel de croissance pour pouvoir être adapté à l'évolution des lanceurs et des missions : croissance de la poussée et croissance de la durée de fonctionnement. Cette politique a été pratiquée avec succès sur Viking et HM7. Elle devra l'être sur le moteur Vulcain d'ARIANE 5.

3.2.2.2. Moteurs à propergols solides

Leur simplicité de mise en oeuvre compense, dans certaines applications, les défauts qu'ils présentent vis-à-vis des propulseurs à liquides :

- vitesse d'éjection plus faible
- réservoirs plus lourds, puisqu'ils servent en même temps de chambre de combustion.

Ils sont essentiellement utilisés aujourd'hui comme :

- propulseurs d'appoint des premiers étages de lanceurs lourds (ARIANE 4 et 5)
- étages propulsifs de lanceurs légers, qui doivent pouvoir être tirés de champs de tirs sommaires (Scout), ou depuis un avion en vol (Pégasus)
- propulseurs embarqués sur satellites pour fournir des fortes impulsions de vitesse (moteur d'apogée et moteur de périgée).

Les problèmes techniques que pose la réalisation d'un propulseur :

- fabrication du propergol (mélange des ingrédients, malaxage, coulée du bloc)
- réservoirs
- protection thermique interne
- tuyère fixe ou mobile
- allumeur

sont bien maîtrisés en France, grâce à l'expérience acquise sur les missiles balistiques.

Le développement en cours des propulseurs latéraux d'ARIANE 5 constitue cependant une opération originale en Europe, par la dimension du projet. Alors que les blocs les plus gros réalisés jusque-là ne dépassaient guère 20 tonnes de propergol, il s'agit ici de développer un propulseur en contenant 230 tonnes.

Les choix technologiques ont été faits en s'inspirant des solutions mises en oeuvre par les Américains sur les boosters de la navette :

- le réservoir est constitué de 7 viroles en acier à haute résistance, assemblées **mécaniquement**.
- le chargement comprend trois segments (deux segments cylindriques de 105 tonnes chacun et un segment avant de 23 tonnes). Une usine de fabrication du propergol a été créée spécialement en Guyane pour la réalisation, sur place, des segments cylindriques,
- la tuyère est mobile (butée flexible).

Ainsi réalisé, le propulseur dispose d'un potentiel de croissance : le remplacement de la structure métallique du réservoir par une structure composite en carbone permettrait d'alléger le propulseur et, donc, d'accroître ses performances.

CHAPITRE 4

LES PROGRAMMES EUROPEENS D'ACCES A L'ESPACE

C'est essentiellement sous l'impulsion de la France que l'Europe, après les Etats-Unis et l'Union Soviétique, est aujourd'hui une puissance spatiale mondiale disposant de moyens autonomes d'accès à l'Espace.

4.1. RAPPEL HISTORIQUE

- a) En 1958, le Gouvernement français décide de doter le pays d'une force de dissuasion nucléaire comportant, en particulier, deux systèmes stratégiques à base d'engins balistiques (engins sol-sol tirés depuis des silos et engins mer-sol tirés depuis des sous-marins). Les "vecteurs" balistiques devaient, à l'origine, être développés en coopération avec des industriels américains (Boeing et Lockheed). Un veto du Gouvernement américain conduit la France à poursuivre son projet en comptant sur son seul savoir-faire.

Pour hisser ce savoir-faire à la hauteur des ambitions visées, un certain nombre de travaux, théoriques et technologiques, sont lancés sous l'autorité de la SEREB (Société pour l'Etude et la Réalisation d'Engins Balistiques), entreprise industrielle créée spécialement en 1959 pour assurer la maîtrise d'oeuvre des programmes balistiques.

Ces travaux aboutissent à la réalisation d'engins expérimentaux (Agate, Topaze, Emeraude, Saphir, ... de la série dite des "pierres précieuses"), dont les tirs en vol permettent de mettre au point les principales technologies nécessaires à la construction des futurs engins opérationnels (propulsion, guidage, pilotage, ...).

Dès 1960 - après que les Soviétiques et les Américains aient mis sur orbite les premiers satellites artificiels à l'aide de lanceurs dérivés de leurs engins balistiques militaires - l'idée vient naturellement en France d'utiliser, pour une mission spatiale, non pas les engins balistiques qui n'existent pas encore, mais les engins expérimentaux préparatoires. C'est ainsi que naît le programme **DIAMANT**.

Le 26 novembre 1965, le lanceur **DIAMANT** place, à son premier essai, un satellite sur orbite basse, depuis le champ de tir de Colomb-Béchar (Algérie) : la France devient la troisième puissance spatiale du monde.

C'est à cette époque qu'est commencée, à la SEREB, l'étude, sur financement militaire, d'un lanceur destiné à succéder à Diamant : il s'agit du programme Diogène, utilisant pour la première fois un étage propulsif cryotechnique (hydrogène liquide-oxygène liquide). Faute de crédits, ce programme ne se concrétise pas, mais permet aux industriels français (Sud-Aviation, SEREB et Air Liquide) d'acquérir l'expérience initiale de la propulsion cryotechnique.

.../...

- b) Le CNES, Centre National d'Etudes Spatiales, est institué par une loi de décembre 1961 et reçoit la charge de mettre en oeuvre la politique spatiale de la France.

Après les premiers tirs Diamant réalisés par la SEREB, il hérite de la maîtrise d'oeuvre du programme. Il fait développer deux versions améliorées (Diamant B et Diamant B-P4) qui seront lancées depuis un nouveau champ de tir établi en Guyane (Kourou).

L'inventaire des besoins, en matière de missions spatiales, montre la nécessité de disposer d'un lanceur plus lourd et plus performant que Diamant. Pour des raisons politiques et financières, la France mise, pour le réaliser, sur la coopération européenne.

- c) Dans les années 1950, la Grande-Bretagne avait acquis, après des Etats-Unis, la licence du missile ATLAS pour construire un engin balistique national (Blue Streak).

Blue Streak, en tant qu'engin militaire, est abandonné en 1961, et le Gouvernement britannique le propose aux Européens pour en faire le premier étage d'un lanceur lourd. Cette proposition est acceptée : elle donne naissance au programme EUROPA, lanceur à trois étages composé de :

- premier étage : Blue Streak, apporté par la Grande-Bretagne
- deuxième étage : Coralie, développé par la France
- troisième étage : Astris, développé par l'Allemagne

La "coordination" de l'ensemble est confiée à un organisme international, le CECLES-ELDO, créé en 1964.

Les essais en vol, effectués depuis le champ de tir de Woomera (Australie) en configuration partielle et globale, se révèlent catastrophiques. Le tir d'une version EUROPA II - définie pour lancer de Kourou un satellite géostationnaire, dans la perspective de la mise sur orbite du satellite de télécommunications franco-allemand Symphonie - est aussi un échec. Le programme EUROPA est alors abandonné en 1973.

- d) Faute d'EUROPA, le satellite Symphonie a été mis sur orbite par un lanceur américain Thor-Delta (premier exemplaire en décembre 1974, second exemplaire en août 1975). Les Américains ont imposé à cette occasion que Symphonie ne serve qu'à des **expériences** de télécommunications : il ne devait pas être utilisé à des fins commerciales. Cette contrainte a fait prendre conscience aux Européens de la nécessité de disposer, pour l'avenir, d'un lanceur qui leur garantisse l'**autonomie** de l'accès à l'espace.
- e) Devant les difficultés rencontrées par EUROPA au cours de son développement, le CNES avait préparé en France, en liaison avec les industriels, une solution de substitution. Il propose cette solution (ARIANE) en juillet 1973 aux Ministres européens de l'espace, qui l'acceptent. Ce choix accompagne la décision de dissoudre le CECLES-ELDO et de créer l'Agence Spatiale Européenne.

La configuration du lanceur, sa logique de développement, son potentiel de croissance, comme l'organisation de la maîtrise d'oeuvre et des responsabilités industrielles, démarquent totalement ARIANE de son malheureux prédécesseur EUROPA. La France qui accepte de financer les deux tiers du programme, y joue un rôle majeur :

- le CNES exerce la fonction de maître d'oeuvre, pour le compte de l'Agence, avec la compétence et l'autorité nécessaires,
- AEROSPATIALE est désignée comme "architecte industriel", en même temps qu'elle assure la maîtrise d'oeuvre de tous les étages,
- la SEP est maître d'oeuvre de toute la propulsion du lanceur.

Le succès du programme, constaté aujourd'hui, démontre l'efficacité de la formule retenue.

- f) Au fil du développement des versions ARIANE 1, 2, 3 ET 4 et, plus tard, à l'occasion du démarrage du programme ARIANE 5, une partie des travaux industriels initialement réalisés en France a progressivement été transférée vers d'autres pays européens (essentiellement en Allemagne). Le transfert des tâches s'est accompagné de transfert de savoir-faire, sous le contrôle des industriels français. Ainsi la part de financement des programmes incombant à la France - ajustée, selon le principe du "juste retour" en vigueur dans la coopération européenne, au volume des travaux réalisés dans le pays - a pu, peu à peu, être réduite sans nuire à l'efficacité de l'ensemble.
- g) En 1980, la France prend l'initiative de créer une société privée industrielle pour commercialiser ARIANE sur les marchés internationaux. Cette société (Arianespace) se voit confier un triple rôle : la maîtrise d'oeuvre de la production de série, la commercialisation internationale et les opérations de lancement à Kourou.
- h) Enfin, en 1987, au cours d'une conférence tenue à La Haye, les ministres européens de l'espace décident de doter l'Europe d'un programme ambitieux nouveau, conduisant à placer des hommes dans l'espace. Ce programme comporte trois volets principaux : le lanceur ARIANE 5, l'avion spatial HERMES et la plateforme COLUMBUS. La France accepte de financer la part la plus importante des volets ARIANE 5 et HERMES dont elle avait établi et défendu les dossiers.

4.2. LA PREMIERE FAMILLE ARIANE

4.2.1. Constitution de la famille

Contrairement à la plupart des lanceurs conventionnels américains et soviétiques, immédiatement dérivés de missiles balistiques militaires, ARIANE a été conçue dès le départ comme un lanceur spatial capable de placer des charges sur orbite basse et sur une orbite de transfert vers la position géostationnaire.

Le premier élément de la famille, ARIANE 1, compte trois étages propulsifs :

- le premier étage, rempli de 145 tonnes de peroxyde d'azote et d'UH25, est équipé de 4 moteurs Vexin alimentés par turbopompes,
- le deuxième étage est rempli de 33 tonnes des mêmes ergols ; il est équipé d'un moteur Vexin identique, à la longueur de la tuyère près, à ceux du premier étage,
- le troisième étage emporte 8 tonnes d'hydrogène liquide-oxygène liquide. Il est propulsé par un moteur HM7 alimenté par une turbopompe.

Le premier tir d'ARIANE 1 a eu lieu, avec succès, le 24 décembre 1979 depuis Kourou. ARIANE 1 était capable de lancer une charge utile de 1,75 tonnes sur l'orbite de transfert géostationnaire.

Ayant constaté chez les constructeurs de satellites une tendance à l'augmentation des masses, ARIANE 1 a subi une évolution pour accroître ses performances : c'est ainsi que sont nées les versions ARIANE 2 et ARIANE 3.

Ces versions ont été sagement dérivées d'ARIANE 1 : le troisième étage cryotechnique a été allongé pour pouvoir contenir 10,7 tonnes d'ergols au lieu de 8 tonnes, la poussée de son moteur augmentant de 16 %. Le biétage inférieur est resté inchangé, sauf la poussée de combustion des moteurs Vexin, accrue de 10 %.

ARIANE 3 se distingue d'ARIANE 2 par l'adjonction, sur le premier étage, de deux propulseurs d'appoint contenant chacun 7,3 tonnes de propergol solide.

Les performances respectives d'ARIANE 2 et d'ARIANE 3, sur l'orbite de transfert géostationnaire, sont de 2,17 tonnes et 2,58 tonnes.

Il a paru, un peu plus tard, souhaitable de pouvoir lancer deux satellites sur le même lanceur pour offrir aux clients des prix de lancement réduits. Ceci a conduit à la version ARIANE 4, dérivée simplement des précédentes par une double modification du seul premier étage :

- augmentation de la masse d'ergols emportée (228 tonnes au lieu de 145)
- adjonction de propulseurs d'appoint, soit à liquides (PAL), soit solides (PAP).
Les PAL contiennent 38 tonnes d'ergols identiques à ceux du premier étage. Ils sont équipés d'un même moteur Vexin.
Les PAP contiennent chacun un bloc de propergol solide de 9,5 tonnes.

Selon la nature (PAL ou PAP) et le nombre (0,2 ou 4) des propulseurs d'appoint, ARIANE 4 présente 6 configurations différentes dont les performances, sur l'orbite de transfert géostationnaire, s'étagent de 1,9 tonnes à 4,2 tonnes.

.../...

L'ensemble de ces configurations constitue aujourd'hui la capacité d'accès à l'espace de l'Europe.

Le tableau de la page suivante résume les caractéristiques principales des divers lanceurs de la famille ARIANE.

Il faut noter que le passage d'ARIANE 1 à ARIANE 4 s'est fait progressivement, sans prendre de risques technologiques importants à chacune des étapes : cette démarche a été tout-à-fait exemplaire. Elle a d'ailleurs été couronnée de succès. Jusqu'à ce jour, 48 ARIANE ont été lancées, avec seulement 5 échecs. Ce score place ARIANE parmi les plus réussis des lanceurs conventionnels actuellement en service.

Tous les lanceurs ARIANE sont tirés depuis la base de Kourou, en Guyane. Cette base, installée par le CNES et mise à la disposition des Européens, occupe une situation géographique idéale et n'a pas d'équivalent dans le monde. Située très près de l'équateur (à 5° de latitude Nord), elle autorise les lancements vers le Nord (orbite polaire) et vers l'Est (orbites équatoriales). Elle représente un atout pour ARIANE, en particulier pour le lancement de satellites géostationnaires qui constitue l'un des segments les plus nourris du marché international civil des satellites.

4.2.2. Commercialisation d'ARIANE

Depuis 1984, Arianespace assure tous les lancements d'ARIANE, au profit soit de clients "captifs" (satellites de l'Agence Spatiale Européenne et satellites militaires français) qui contractent de gré à gré, soit de clients civils extérieurs pour lesquels ARIANE est exposée à une concurrence.

a) *le marché*

Le marché international civil est essentiellement constitué de satellites à placer sur orbite de transfert géostationnaire.

Arianespace répartit ce marché, en fonction de la masse des satellites, selon 6 classes :

- Classe 1 : moins de 1250 kg.
C'est la catégorie qui dominait au début des années 80. On y trouve encore aujourd'hui des produits tels que Inmarsat, Météosat, ...
- Classe 2 : 1200 à 1650 kg (type Arabsat)
- Classe 3 : 1650 à 2300 kg (Télécom 2, Hispasat, Eutelsat,...)

Les trois premières classes se prêtent bien à des lancements doubles par ARIANE 4.

- Classe 4 : 2300 à 2550 kg
(Inmarsat 3, satellite de télécommunications allemand,...)
- Classe 5 : 2550 à 3150 kg (Satcom, Anik, Astra, Solidaridad,...)
- Classe 6 : plus de 3150 kg (Intelsat 7, ...)

.../...

PREMIERE FAMILLE DES LANCEURS ARIANE

	ARIANE 1	ARIANE 2	ARIANE 3	ARIANE 40	ARIANE 42 P	ARIANE 44 P	ARIANE 42 L	ARIANE 44 LP	ARIANE 44 L
Premier étage	P140 145 tonnes (N2O4-UH25) 4 moteurs Vexin			P 220 228 tonnes (N2O4-UH25) 4 moteurs Vexin					
Propulseurs d'appoint	-		2 Solide 7,3 tonnes	-	2 PAP Solide 9,5 tonnes	4 PAP	2 PAL N2O4/UH25 38 tonnes 1 moteur Vexin	2PAP + 2PAL	4 PAL
Deuxième étage	P 33 33 tonnes (N2O4-UH25) 1 moteur Vexin								
Troisième étage	H 8 H2 + O2 8 tonnes 1 moteur HM7	H10 H2 + O2 10,7 tonnes 1 moteur HM7 B							
Charge utile (tonnes) Orbite de transfert géostationnaire	1,75	2,17	2,58	1,9	2,6	3,00	3,1	3,7	4,2

Les satellites les plus lourds nécessitent des lancements simples d'ARIANE 4 (44 LP et 44 L). Au fil des années, la tendance générale va dans le sens de l'augmentation des masses.

b) *la concurrence*

- La concurrence **américaine** était initialement centrée sur la navette. En 1986, le Président Reagan a incité les industriels produisant des lanceurs conventionnels à se lancer sur le marché. Depuis 1987, la concurrence a été essentiellement constituée de ces lanceurs, au nombre de trois :
 - le DELTA, capable seulement des classes 1 et 2, mais qui pourrait, s'il était développé, entrer dans le marché de la classe 3,
 - l'ATLAS-CENTAUR, dont le constructeur (General Dynamics) fait preuve d'une grande agressivité commerciale et n'hésite pas à développer sur ses fonds propres des versions de plus en plus performantes couvrant pratiquement tout le marché accessible à ARIANE 4,
 - le TITAN (version 3 et version 4), capable de lancements doubles et dont les performances recouvrent celles d'ARIANE 4 et même celles du futur ARIANE 5.

Pour ces trois lanceurs, le marché civil exposé à la concurrence ne représente qu'une faible partie de la clientèle : ils sont en effet très utilisés pour lancer des satellites gouvernementaux américains (à 70 % pour le Delta, 61 % pour l'Atlas-Centaur et 89 % pour le Titan). Les commandes gouvernementales leur permettent des cadences de production élevées et par là, sans doute, des coûts réduits.

A noter que depuis 1987, si le taux de succès des lancements ARIANE a atteint 95 %, celui des Titan est resté au niveau de 85 % et celui de l'Atlas-Centaur à 60 % seulement.

- Le lanceur **chinois** "LONGUE MARCHE" tente de percer sur le marché international, avec une série de versions dont :
 - Longue Marche 3 (1400 kg sur orbite de transfert) qui a lancé en 1990 le satellite ASIAT 1,
 - Longue Marche 2E (près de 3 tonnes sur orbite de transfert). Cette version a connu un échec partiel lors de son premier lancement en 1990. Les tirs n'ont pas repris depuis.

En dépit des prix très attractifs proposés aux clients, les Chinois n'ont pas pu ajouter de nouvelles commandes aux quatre obtenues depuis deux ans.

- Le lanceur **japonais H2**, qui rencontre des difficultés de développement (mise au point d'un moteur cryogénique à flux intégré), vise la performance de 3,8 tonnes sur orbite de transfert géostationnaire. Il n'interviendra sur le marché, au plus tôt, qu'en 1993.
- Du côté **soviétique**, le lanceur PROTON, proposé depuis maintenant quatre ans sur le marché, n'a toujours pas obtenu de commande occidentale. Il n'en constitue pas moins un concurrent pour ARIANE. L'évolution actuelle de l'URSS, la transformation rapide de ses relations avec l'Occident, la pratique de prix artificiellement bas (établis dans la seule perspective d'obtenir des devises fortes) peuvent tenter certains clients.

c) *la pénétration du marché par ARIANE*

Depuis 1986, Arianespace a remporté la moitié du marché des lancements ouvert à la concurrence : elle est devenue le leader mondial des services de lancements commerciaux.

Il faut cependant noter que le marché ouvert représente une très faible partie du marché global : l'essentiel reste constitué par les lancements militaires ou gouvernementaux non soumis à concurrence. En 1990, par exemple, les lancements Ariane n'ont représenté que 5,5 % des lancements mondiaux (l'URSS en a réalisé 67 % et les Etats-Unis 21 %).

Le carnet de commandes actuel d'Arianespace, et l'analyse des commandes potentielles à venir, laissent penser que ARIANE conservera, dans les prochaines années, la position qu'elle a aujourd'hui acquise, avec une cadence de lancements se situant autour de 8 par an.

d) *Remarque*

Les prix offerts à la clientèle commerciale par les constructeurs occidentaux sont établis sur la base du coût de fabrication en série des lanceurs, sans amortissement des dépenses de développement. Ces dépenses sont toujours supportées par les Etats. La construction de lanceurs n'est encore pas une activité économique normale, dans aucun pays du monde. Sachant que le développement d'un lanceur revient à plusieurs milliards de francs (16 milliards pour la première famille ARIANE, d'ARIANE 1 à ARIANE 4), on mesure la difficulté de mettre en pratique l'idée - exprimée quelquefois - de "privatiser" le transport spatial.

L'industrie spatiale reste encore une activité de souveraineté des Etats qui souhaitent disposer d'un accès autonome à l'espace. Les débouchés commerciaux interviennent comme un appoint, permettant - par l'allongement des séries de production - une réduction des coûts unitaires. La rentabilisation globale d'un programme restera longtemps une illusion, au moins tant que le rythme des missions n'aura pas dépassé de plusieurs ordres de grandeur celui pratiqué aujourd'hui.

4.3. PROGRAMMES EN COURS DE DEVELOPPEMENT

Il s'agit des programmes liés à la politique de "l'homme dans l'espace" décidée en 1987 à la conférence de La Haye : ARIANE 5 et HERMES.

4.3.1. ARIANE 5

ARIANE 5 a pour premier rôle de placer sur orbite basse des charges utiles lourdes :

- éléments importants de stations orbitales,
- avion spatial HERMES.

Ce rôle impose deux contraintes :

- un accroissement significatif de la fiabilité du lanceur (vols habités)
- une forte diminution du coût par kilo de charge utile sur orbite.

.../...

Par ailleurs, constatant la tendance à l'augmentation de la masse des satellites (en particulier, satellites de télécommunications), et tenant compte du fait que la famille ARIANE 4 arrive au bout de ses capacités de croissance, ARIANE 5 aura en outre la mission de prendre le relais de la première famille ARIANE pour le lancement de satellites. Pour ce type d'utilisation, l'amélioration de la fiabilité et la réduction des coûts de lancement constitueront un atout commercial supplémentaire.

ARIANE 5 comprend un biétage inférieur, identique pour toutes ses missions, composé de:

- un étage cryotechnique (hydrogène liquide-oxygène liquide) de 5,4 m de diamètre, contenant 155 tonnes d'ergols et équipé d'un moteur unique (Vulcain) à flux dérivé, alimenté par des turbopompes.
Le pilotage en tangage/lacet est assuré par l'orientation du moteur, le pilotage en roulis par un système à hydrogène gazeux.
- deux propulseurs à propergol solide, contenant chacun un bloc segmenté de 230 tonnes, et équipés d'une tuyère mobile (à butée flexible) qui permet le pilotage. Ces propulseurs sont disposés de part et d'autre de l'étage cryotechnique.

Pour le lancement d'HERMES, l'avion spatial est directement installé sur le biétage. Les équipements à bord de l'avion sont utilisés pour guider le vol du biétage.

Pour le lancement des autres charges, un petit étage à liquides, rempli de quelques tonnes (9,7 au maximum) d'ergols stockables (péroxyde d'azote et monométhyl hydrazine), est ajouté au-dessus du biétage inférieur, avec une case à équipements et divers supports de charge utile adaptés - comme la coiffe de protection - aux divers types de missions.

Ainsi bâti, le lanceur ARIANE 5 est capable de placer :

- 22 tonnes sur orbite basse
- 6 920 kg sur l'orbite de transfert géostationnaire, en lancement simple.

L'objectif visé pour le coût d'un lancement est inférieur de 10 % à celui du lancement d'une ARIANE 4, ce qui représente un gain de 45 % sur le coût du kilo sur orbite.

L'objectif de fiabilité pour le biétage inférieur est de 0,99 (alors que la fiabilité visée pour la première famille ARIANE était de 0,90). Pour atteindre cette valeur, les divers sous-ensembles doivent répondre à des exigences encore supérieures (0,9927 pour l'étage cryotechnique et 0,9946 pour son seul moteur). Il n'est pas inutile de rappeler qu'une fiabilité de 1 correspond à un fonctionnement toujours parfait.

Les technologies choisies pour ARIANE 5 ne sont pas révolutionnaires. Les industriels européens ont prouvé qu'ils les maîtrisaient suffisamment. Il faut néanmoins noter le saut d'un ordre de grandeur pour :

- la taille de l'étage cryogénique (155 tonnes d'ergols au lieu des 10,7 tonnes d'ARIANE 4),
- la taille des propulseurs solides (230 tonnes de propergols, soit dix fois plus que le plus gros propulseur construit avant lui),
- l'objectif de fiabilité.

Les installations de tir à Kourou doivent être adaptées à ARIANE 5. Un nouveau complexe de lancement spécifique (ELA 3) est en cours de construction.

Le premier lancement d'ARIANE 5 aura lieu en 1995. Les travaux de développement commencés en 1987 se déroulent selon le calendrier prévu. Ils n'ont pas fait apparaître jusqu'ici de difficultés inattendues.

Potentiel d'évolution

Comme pour la première famille ARIANE, ARIANE 5 - qui va devenir l'outil de base de l'accès européen à l'espace pendant 25 à 30 ans - sera soumis à des évolutions qui font dès aujourd'hui l'objet d'études.

Les évolutions sont imaginées dans plusieurs voies :

a) *ARIANE 5 Mark 2*

Il s'agit d'accroître de 10 à 15 % les performances du lanceur de base. Ce résultat - qui permettrait de donner en particulier aux vols d'HERMES des marges plus confortables - peut être obtenu pour un coût minimum en portant à 171 tonnes la masse d'ergols de l'étage cryotechnique et en accroissant de 20 % la poussée du moteur Vulcain.

Le premier vol de ce lanceur pourrait intervenir en l'an 2000.

b) *Variante bi-moteur de l'étage cryotechnique*

En équipant l'étage cryotechnique de deux moteurs Vulcain, et en portant à 210 tonnes sa masse d'ergols, on peut :

- d'une part, accroître la performance sur orbite basse de 3,5 tonnes,
- d'autre part, assurer une meilleure sécurité des vols habités HERMES. En effet, en cas d'incident arrêtant le fonctionnement du moteur Vulcain en cours de propulsion, HERMES peut ne pas avoir encore acquis, sur Ariane 5 standard, une vitesse suffisante pour, après sa séparation du lanceur, trouver une piste d'atterrissage de retour à la bonne portée. Dans ce cas, l'équipage est sauvé par des sièges éjectables, mais l'avion est perdu. Si un tel incident intervient sur un bimoteur, le moteur restant continue à accélérer le lanceur et permet à l'avion d'atteindre une vitesse compatible avec un retour au sol normal.

c) *ARIANE 5 "gros porteur"*

C'est le lanceur qui serait nécessaire pour réaliser des vols habités vers la Lune. (L'installation d'une base lunaire permanente est l'un des objectifs que la communauté internationale pourrait viser dans les prochaines décennies).

Ce lanceur peut être réalisé à partir des composants principaux d'ARIANE 5. Il comporte:

- un étage cryotechnique central de 7,5 m de diamètre, emportant 620 tonnes d'hydrogène-oxygène, et équipé de 5 moteurs Vulcain. Cet étage serait flanqué de 4 propulseurs solides identiques à ceux d'Ariane 5.
- un deuxième étage de 80 tonnes d'hydrogène-oxygène, de 5,4 m de diamètre, équipé d'un moteur Vulcain détaré, capable de réallumage en vol.

La charge utile placée sur une trajectoire lunaire atteint ainsi 35 tonnes, masse suffisante pour exécuter une mission de type Apollo.

.../...

d) *Dérivés de petite taille*

A l'opposé de la tendance des trois évolutions précédentes, la technologie ARIANE 5 peut donner naissance à des lanceurs plus petits, consacrés à la mise sur orbite basse (par exemple orbites polaires "héliosynchrones" adaptées aux missions d'observation de la Terre) de satellites moyens (3 à 4 tonnes) ou petits (1 tonne).

Deux projets ont été étudiés :

- **DLA-S**, composé :
 - d'un premier étage utilisant le propulseur latéral P230 d'ARIANE 5,
 - d'un deuxième étage solide de 85 tonnes (P230 raccourci),
 - d'un troisième étage formé soit de l'étage H10 d'ARIANE 4, soit d'un étage solide avec 30 tonnes de propergol (qu'il faudrait alors surmonter d'un quatrième étage à liquides, dérivé du petit étage supérieur d'ARIANE 5).
- **DLA-P**, qui est un DLA-S dans lequel le premier étage P230 a été supprimé.

Ces divers projets montrent déjà une grande variété de possibilités. Il est clair qu'ARIANE 5 permettra de développer une nouvelle famille de lanceurs adaptés à un large éventail de missions.

4.3.2. **HERMES**

Le programme HERMES demande aux Européens d'aborder des domaines technologiques nouveaux pour eux.

Il s'agit en effet de réaliser un véhicule capable :

- d'emporter un équipage,
- d'évoluer dans l'espace, sur orbite basse, et d'y effectuer des manoeuvres de rendez-vous avec des éléments de stations orbitales,
- de revenir au sol, en traversant à grande vitesse les couches atmosphériques, et de s'y poser à la manière d'un avion,
- de renouveler ensuite la mission, après une remise en état aussi légère que possible.

Le caractère ambitieux du programme a conduit à la décision de l'entreprendre en deux phases :

- une première phase, s'étendant de 1987 (Conférence de La Haye) à 1991, destinée à vérifier sa faisabilité en termes techniques, calendaires et financiers,
- une deuxième phase, pour le développement proprement dit, dont le démarrage est soumis à une décision spécifique des Ministres européens de l'Espace qui se réuniront en novembre 1991 à Munich.

a) *Missions d'HERMES*

Les missions assignées à HERMES ont été classées en trois catégories, par ordre de priorités décroissantes :

- la mission de base ("primary mission") consiste à desservir le laboratoire autonome de l'ensemble orbital COLUMBUS ("free-flying laboratory") qui sera placé en position isolée sur une orbite à 463 km d'altitude, inclinée de 28,5° sur l'équateur. HERMES doit être capable d'y emmener un équipage de 3 hommes et 3 tonnes de charge utile. Il doit pouvoir y rester accosté pendant une période de 7 jours.
- des missions principales ("main missions") visent :
 - à allonger jusqu'à 10 jours la période d'accostage au laboratoire autonome, en réduisant à 2,7 tonnes la masse de la charge utile ;
 - à visiter la station internationale FREEDOM (développée sous maîtrise d'oeuvre américaine) qui sera placée sur la même orbite que le laboratoire autonome.
Durée d'accostage : 7 jours - charge utile : 3 tonnes.
- des missions secondaires ("secondary missions") comprennent :
 - l'allongement jusqu'à 26 jours de la période d'accostage en laboratoire autonome (avec 1,8 tonne de charge utile),
 - la visite des stations soviétiques Mir 1 et Mir 2, qui évoluent sur deux types d'orbites : l'une à 350 km d'altitude inclinée de 51,6° sur l'équateur, l'autre à 450 km d'altitude inclinée de 64,8° sur l'équateur.
Durée d'accostage : 7 jours - masses de charge utile : respectivement 2 tonnes et 700 kg.
 - des vols libres, sans rendez-vous ni accostage de station, d'une durée de 21 jours, avec une masse de 2,6 tonnes de charge utile. Dans ce cas, des expériences spatiales sont réalisées à bord même d'HERMES.

b) *Choix de la configuration technique*

- Au-delà de son équipage de 3 hommes, HERMES doit emporter une charge utile qui ne dépasse pas 3 tonnes. Il se différencie ainsi de la navette américaine et du Bourane soviétique, capables d'emmener dans leur soute plusieurs dizaines de tonnes. La navette américaine et Bourane ont vocation à être des "camions" de l'espace, alors qu'HERMES joue plutôt le rôle d'un "taxi".

Considérant que la mise sur orbite de charges lourdes (éléments de station spatiale, par exemple) peut être réalisée à moindre coût par des lancements automatiques (sans présence humaine) d'ARIANE 5, les Européens ont préféré choisir, pour les vols habités, un véhicule de plus petite taille, spécifiquement adapté à cette fonction.

- Le retour sur Terre aurait pu se faire par l'intermédiaire de capsules, à l'instar de ce que les Américains ont pratiqué jusqu'à Apollo et de ce que les Soviétiques pratiquent encore.

Cette solution, technologiquement plus simple, a été écartée au profit de la formule "avion" pour les raisons suivantes :

- l'exiguïté du territoire européen et sa densité d'habitation auraient conduit à choisir, pour les capsules, des zones de retombée maritimes. L'imprécision du point de retombée aurait demandé la mise en place d'une importante flotte de récupération, répartie sur une large surface.

Au contraire, l'avion spatial, par sa capacité de manoeuvrer en vol, permet de rejoindre des pistes d'atterrissage qui existent en grand nombre à la surface de la terre.

- l'inconfort d'un retour par capsules, s'il était acceptable à l'ère des premiers pionniers, devient anachronique à l'époque où on envisage la présence permanente de l'homme dans l'espace.
- la réalisation d'un premier avion spatial permet le développement de technologies nouvelles qui préparent les futures générations de transport (lanceurs récupérables et avions hypersoniques).
- Les études ont montré que toutes les missions demandées pouvaient être satisfaites en réalisant HERMES en deux parties :
 - l'avion spatial proprement dit, identique pour toutes les missions,
 - un "module de ressources" adapté à chaque catégorie de missions.

Le module de ressources est une structure de forme tronconique, disposée à l'arrière de l'avion, qui sert de jonction avec le lanceur ARIANE 5 pendant la phase de mise sur orbite. Il reste attaché à l'avion pendant toute la durée de la phase orbitale. Il est largué avant la rentrée dans l'atmosphère. Il est donc un élément consommable : chaque vol d'HERMES emporte un module de ressources nouveau.

Cette configuration est imposée par les considérations suivantes :

- pour conserver à ARIANE 5 son caractère de lanceur universel, HERMES est installé comme les autres charges utiles, au sommet du biétage inférieur. La pilotabilité d'ARIANE 5 commande, dans cette configuration, de limiter la surface de voilure d'HERMES à une valeur voisine de 85 m². Une surface plus grande demanderait d'adopter un autre type d'architecture (comme celle de la navette américaine ou celle du Bourane soviétique), c'est-à-dire le développement - coûteux - d'un lanceur spécifique à HERMES.
- une surface de voilure de 85 m² limite à environ 17 tonnes la masse de l'avion rentrant dans l'atmosphère. Une masse plus grande entraînerait :
 - des flux thermiques plus importants, c'est-à-dire une protection thermique plus difficile à réaliser et plus lourde,
 - une vitesse à l'atterrissage plus rapide, c'est-à-dire un pilotage plus critique de l'avion et des longueurs de piste dépassant les standards existants.

Pour tirer le parti maximum de la performance d'ARIANE 5 (24 tonnes pour une mission HERMES), le meilleur compromis a consisté à concevoir un avion de 17 tonnes (avec une surface de voilure de 85 m²) et à lui adjoindre un module de ressources, largable avant la rentrée, d'une masse de 7 tonnes.

.../...

Ce module de ressources contient des équipements utiles à la mission et non nécessaires à la phase de rentrée, tels que :

- un système propulsif, capable de réallumages,
- le système d'accostage et d'arrimage aux divers types de stations,
- un bras télémanipulateur,
- la centrale de contrôle thermique sur orbite (circuits à circulation de fréon, radiateurs,...),
- des réservoirs (eau, hélium, azote, ergols, ...).

Il offre un volume (dont une partie est pressurisée) de près de 27 m³.

L'avion spatial comporte :

- un fuselage de 43 m³ de volume (20 m³ pour le cockpit, 10 m³ pour la zone vie des spationautes et 13 m³ de soute) ;
- une voilure de forme delta, dont la flèche est calculée de façon que l'ensemble de l'avion reste à l'intérieur du cône de l'onde de choc créée pendant la traversée de l'atmosphère. La voilure est équipée, à l'arrière, de dérives munies de gouvernails et d'élevons.

On trouvera, page suivante, un schéma de l'avion et de son module de ressources.

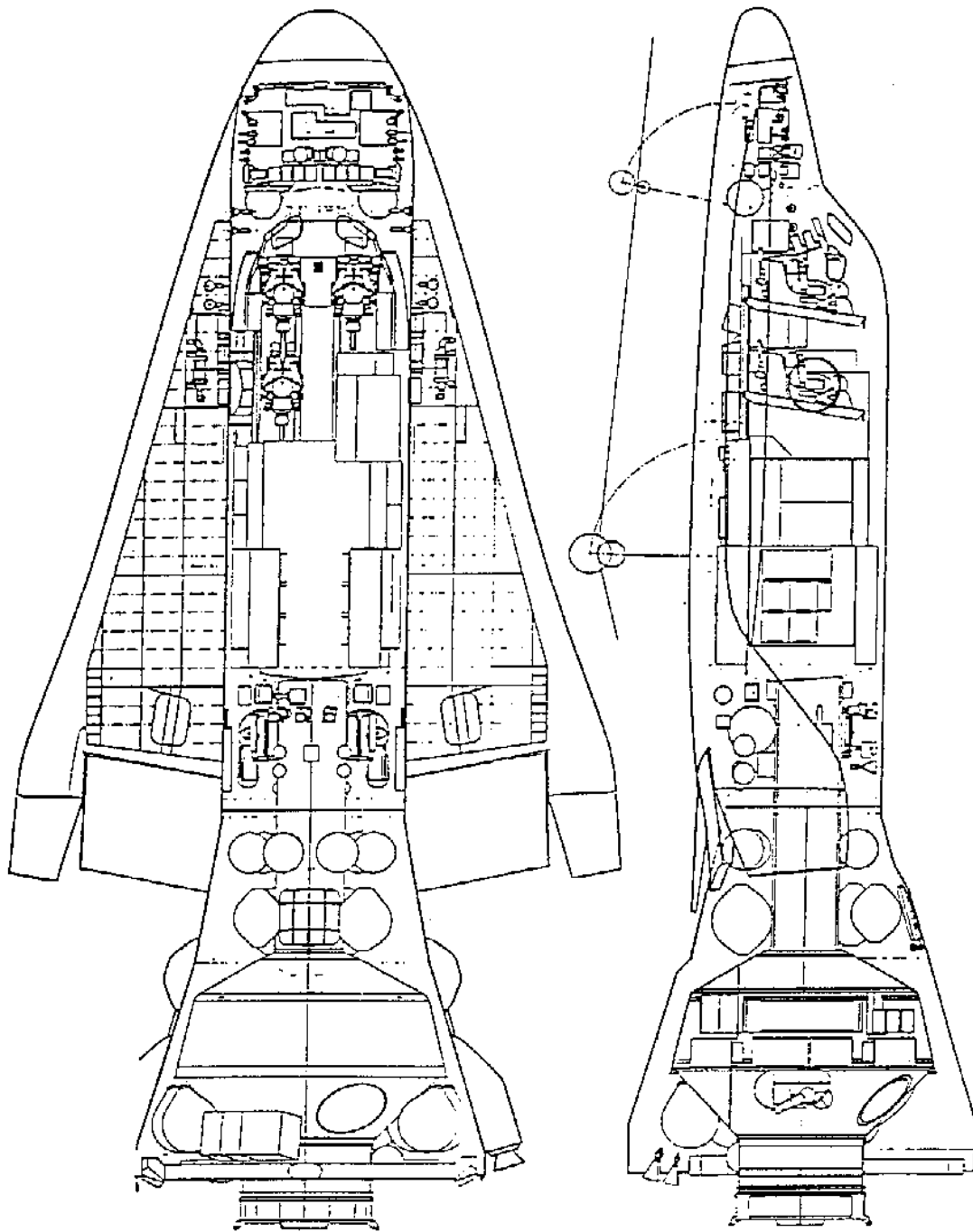
c) *Déroulement d'un vol HERMES (mission de base)*

Le lanceur ARIANE 5, guidé et piloté par les équipements de bord de l'avion, décolle verticalement de Kourou. Il injecte l'ensemble HERMES sur une orbite elliptique inclinée de 28,5° sur l'équateur, dont le périégée se situe à 100 km d'altitude et l'apogée à 320 km. Grâce à son système de propulsion embarqué, HERMES modifie sa trajectoire jusqu'à atteindre une orbite de "phasage" circulaire à 336 km d'altitude. La vitesse de parcours sur cette orbite étant supérieure à la vitesse d'orbitation de la cible visée (le laboratoire autonome, situé sur une orbite circulaire à 463 km d'altitude), HERMES se rapproche ainsi de sa cible. Quand la distance avec la cible atteint une valeur donnée, le système propulsif de bord amène HERMES sur une orbite à 453 km d'altitude, dans une position proche du laboratoire. Les dernières manoeuvres de rendez-vous sont exécutées en vue directe.

La durée de cette phase, depuis l'injection initiale jusqu'à l'arrimage au laboratoire, varie de 1 jour à 2 jours.

Après avoir mené à bien les opérations programmées sur le laboratoire orbital, HERMES s'en détache. Le système de propulsion embarqué donne une impulsion de "désorbitation" pour revenir sur la Terre. le module de ressources est alors largué : l'avion entame sa descente.

Pendant la première partie de cette descente, au-dessus des couches atmosphériques, HERMES se comporte encore comme un satellite. Il parcourt plus de 13 000 km en 30 minutes. Son attitude (position autour du centre gravité) est contrôlée par des petites fusées.



Véhicule spatial HERMES

(Avion et module de ressources)

Quand l'altitude atteint 120 km, les effets de l'atmosphère commencent à se faire sentir : c'est le début de la phase de rentrée. Cabré à un angle d'incidence qui peut aller jusqu'à 40°, piloté automatiquement par ses gouvernes aérodynamiques, HERMES subit une décélération maintenue au-dessous du plafond de 2,5 g (l'équipage, jusque là en apesanteur, pèse, à ce niveau, 2,5 fois son poids), et ralentit de Mach 29 à Mach 2 sur une période de 35 minutes, pendant laquelle il parcourt plus de 10 000 km de distance. Ce ralentissement est accompagné d'un échauffement considérable des surfaces exposées, qui doivent impérativement être équipées d'une protection thermique performante.

HERMES atteint Mach 2 à une altitude voisine de 30 km. Il aborde alors la phase terminale de son vol qui le conduit en 6 minutes jusqu'à une piste d'atterrissage de type classique (3000 m de longueur) sur laquelle il se pose avec une vitesse de 210 noeuds (soit 380 km/h), comme un avion de combat. Grâce à la capacité de manoeuvre pendant la phase de rentrée, la piste d'atterrissage peut être située jusqu'à 1500 km de part et d'autre du plan de l'orbite initiale.

d) *Problèmes techniques et technologiques spécifiques*

Les problèmes spécifiques posés par le programme HERMES sont essentiellement liés à :

- la présence d'un équipage à bord,
- la conception d'un avion spatial capable de rentrer dans l'atmosphère.

La **présence humaine** dans l'espace n'est pas un sujet nouveau pour l'Europe. La participation de spationautes français à des missions américaine et soviétique, les deux vols du laboratoire européen habité SPACELAB (lancé par la navette américaine) ont permis d'acquérir une expérience transposable à HERMES. Les études préliminaires ont montré que le savoir-faire européen était dès aujourd'hui en mesure de réaliser un véhicule dans lequel les hommes puissent vivre et travailler. Seule la source d'énergie de bord suscite encore une interrogation : le projet prévoit l'utilisation, en source primaire, de piles à combustibles performantes (fournissant 1 kw par kg de masse) qui n'ont pas encore été produites en Europe.

Le lancement d'un véhicule habité soulève, pour la première fois, la question de la sécurité d'un équipage. Au-delà des impératifs de fiabilité imposés à tous les sous-ensembles HERMES/ARIANE 5, et des redondances introduites dans le projet, il s'est avéré indispensable - pour accroître encore la probabilité de survie - de retenir un système de sauvegarde. Il s'agit de sièges éjectables individuels du type Bourane, capables de fonctionner jusqu'à Mach 2. A noter que la solution d'une cabine éjectable unique a été écartée, après examen, comme présentant trop de risques dans son développement.

La définition de l'**avion spatial** a mobilisé les meilleures équipes de l'industrie aéronautique et spatiale. HERMES bénéficiera ainsi des progrès les plus récents réalisés sur les avions de ligne ou de combat construits en Europe. C'est en particulier le cas pour les équipements de bord, leur agencement, les logiciels associés et l'organisation des relations "homme-machine".

Au cours de la rentrée dans l'atmosphère, l'avion spatial évolue cependant dans un domaine de vol dont les Européens ont encore une connaissance très limitée. Les ogives de missiles balistiques développées en France - qui subissent une rentrée analogue - apportent une certaine expérience, mais leurs formes très simples (corps de révolution de faible portance) n'ont pas conduit à aborder l'ensemble des problèmes posés par HERMES.

C'est pourquoi, dès la première phase du programme, des efforts importants ont été consacrés à faire avancer le savoir-faire sur deux sujets essentiels :

- l'aérodynamique hypersonique,
- les matériaux de protection thermique.

Pour l'**aérodynamique hypersonique**, il s'agit d'être capable de définir l'écoulement de l'air autour de l'avion, pour des nombres de Mach allant de 2 à 30, des angles d'incidence de 0 à 40 degrés et une densité de l'air correspondant à des altitudes variant de 30 à 120 km. La connaissance de cet écoulement permet de calculer :

- les forces aérodynamiques globales qui agissent sur l'avion,
- la répartition des pressions sur les surfaces (dont dépend, en particulier, l'efficacité des gouvernes),
- les flux thermiques auxquels sont soumis les divers éléments.

Cette connaissance s'acquiert de deux façons : à partir de calculs complexes réalisés sur ordinateurs (simulation numérique) et à partir de mesures expérimentales faites dans des souffleries adaptées. Les deux méthodes sont complémentaires.

Un programme de recherches a été lancé auprès de nombreux organismes européens (université, laboratoires, industrie) sur la modélisation numérique des phénomènes aérodynamiques. En parallèle, des investissements ont été faits dans des souffleries en France, en Belgique et aux Pays-Bas.

Pour la **protection thermique**, il s'agit de développer des matériaux :

- capables de supporter des hautes températures (jusqu'à 1600 degrés centigrades),
- résistant à l'oxydation (en particulier à l'action de l'oxygène dissocié),
- suffisamment légers, c'est-à-dire performants avec de faibles épaisseurs.

Ces matériaux sont des céramiques (carbone/carbone ou carbone/siliciure de carbone) dont les industriels français (Aérospatiale et SEP) ont une certaine pratique (grâce à leurs applications militaires) dans les domaines de la fabrication, de la qualification et de la mise en oeuvre.

Certaines structures, exposées aux flux les plus chauds, seront réalisées directement à partir de ces céramiques : c'est le cas du nez, des bords d'attaque et des dérives. A noter que les dérives sont équipées de gouvernes mobiles dont le débattement doit être possible même à températures très élevées.

Les autres structures (fuselage, voilure) seront réalisées en matériaux conventionnels (alliages légers), sur lesquels seront disposés d'abord un isolant multicouches, puis des plaques de céramique.

Le programme HERMES implique la mise en place de moyens industriels importants, tant pour la réalisation des matériaux eux-mêmes (fours de carbonisation et de cuisson capables de pièces de grandes dimensions) que pour les essais de qualification (souffleries à arc, ...).

Il faut remarquer que les solutions techniques et technologiques retenues pour HERMES, en matière de protection thermique, sont beaucoup plus avancées et performantes que celles que les Américains avaient choisies pour leur navette.

c) *Organisation du programme*

La réussite d'un programme dépend largement de la qualité de son management. Plus un programme est complexe, plus son management doit être fort.

Le succès d'ARIANE, après l'échec d'EUROPA, est à mettre à l'actif d'une maîtrise d'oeuvre (française) solide - au plan étatique comme au plan industriel - s'appuyant sur une organisation claire, avec des responsabilités bien définies, des structures de décision indiscutables et des procédures rigoureuses.

Par son ambition technique, par la variété de ses missions, par la multiplicité de ses éléments (matériel de vol, mais aussi infrastructure logistique), par le nombre et la diversité des industriels participants, le programme HERMES est sans aucun doute un programme complexe. Sa conduite exige une compétence et une autorité particulières.

Pour des raisons politiques, un management complètement français, du type ARIANE, n'a pas été accepté par les partenaires de la France. L'Agence Spatiale Européenne a souhaité que le programme soit développé sous une maîtrise d'oeuvre industrielle à laquelle soient associées plusieurs firmes européennes. C'est pourquoi a été créée une société, EURO-HERMESPACE (société anonyme de droit français implantée dans la région de Toulouse) groupant Aérospatiale et Dassault-Aviation pour la France, Deutsche Aerospace pour l'Allemagne et Alenia pour l'Italie. Cette société recevra un contrat unique qu'elle divisera ensuite en sous-contrats passés aux industriels européens. Elle gardera pour elle les tâches de management et de synthèse. Ses méthodes de travail seront largement inspirées du précédent ARIANE. A noter que le Directeur Général unique de EURO-HERMESPACE est de nationalité française.

f) *Déroulement du programme*

La phase I du programme, qui se déroule depuis quatre ans, a permis :

- de dresser un inventaire détaillé des problèmes à résoudre,
- de vérifier la capacité de l'industrie européenne à traiter ces problèmes,
- d'établir un projet complet du programme, prenant en compte les aspects techniques, calendaires et financiers,
- de faire avancer le savoir-faire européen dans les domaines techniques et technologiques critiques,
- de constituer une équipe internationale compétente de management.

Un dossier proposant la poursuite du programme est aujourd'hui soumis à la décision de la Conférence des Ministres de l'Espace qui doit se réunir à Munich en novembre de cette année.

Ce dossier fournit, en particulier, une logique de développement conduisant par étapes à :

- un vol subsonique de l'avion spatial, lâché depuis un avion porteur, en 1997,
- un premier vol complet, avec un avion spatial inhabité (vol automatique), en 1998,
- un premier vol avec équipage en 1999.

Il appartiendra à la Conférence de Munich de décider de ce calendrier en fonction des ressources financières qui pourront être, annuellement, affectées au programme.

Les équipes industrielles, plongées depuis des années dans le projet, enthousiasmées à la fois par ses défis techniques et sa finalité, espèrent que leur proposition sera retenue en faisant valoir qu'un étalement trop important du programme entraînerait une démobilisation préjudiciable à la réussite et, en tout état de cause, un coût global bien supérieur.

4.4. REGARDS VERS L'AVENIR

4.4.1. Lanceurs futurs

Les Européens se préoccupent - dans le cadre de travaux nationaux et d'études menées par l'Agence Spatiale - de préparer les outils de l'accès à l'espace de l'avenir.

Il s'agit d'un avenir lointain, à l'horizon d'au moins 20 ans. D'ici là, en effet, les lanceurs conventionnels actuels, en service ou en développement, avec leur capacité de dérivés multiples, occuperont largement le terrain. Il est même frappant de constater que les programmes qui se démarquaient le plus des lanceurs conventionnels sont aujourd'hui en régression. La navette américaine, dont la NASA avait fait son cheval de bataille quasi-unique, va être progressivement abandonnée au profit d'un lanceur plus classique, dit NLS (National Launching System) prévu pour être opérationnel aux environs de l'an 2000. En Union Soviétique, le développement de lanceurs conventionnels se poursuit : le projet Bourane n'a encore effectué qu'un seul vol, en mode automatique, qui remonte à novembre 1988 : le programme ne paraît pas mené avec beaucoup d'ardeur.

Les systèmes futurs imaginés en Europe visent l'objectif :

- d'accroître la fiabilité et la sécurité des vols,
- de réduire le coût des lancements (mesuré en prix du kg mis sur orbite),

dans l'hypothèse d'une augmentation du rythme annuel des missions, en particulier des missions habitées.

La réduction des coûts de lancement peut être obtenue de deux façons :

- lanceurs conventionnels **bon marché** (en développement et en prix unitaire).

Des analyses ont été faites aux Etats-Unis pour définir un lanceur (Big Dumb Booster) répondant à ce critère par l'utilisation des technologies les moins chères (par exemple, avec des moteurs alimentés par pressurisation des réservoirs). Ces technologies, moins performantes, conduisent, pour une mission donnée, à des masses au décollage élevées qui entraînent un surdimensionnement coûteux des installations au sol. Au total, la formule n'a pas paru apporter des avantages décisifs.

Il faut remarquer, en outre, que les prix unitaires dépendent beaucoup de la cadence de fabrication et de la longueur des séries. La haute technologie, quand elle s'applique à des productions industrielles suffisantes, peut largement réduire ses coûts. L'exemple de l'industrie aéronautique moderne, dont les produits se sophistiquent davantage à chaque génération, en témoigne.

- lanceurs **réutilisables**

Les lanceurs conventionnels, comme les allumettes et les partenaires mâles des mantes religieuses, ne servent qu'une fois. L'idée vient naturellement à l'esprit de les rendre capables de plusieurs lancements, en récupérant leurs éléments après chaque vol. Ce procédé n'engendre des économies que dans la mesure où :

- les éléments du lanceur sont dimensionnés pour des durées de fonctionnement supérieures au temps d'une mission unique,
- la récupération n'entraîne pas de détérioration significative,
- le coût des opérations de récupération et de remise en état reste inférieur au coût de fabrication d'un matériel neuf.

Les premiers étages propulsifs, lorsqu'ils ont fini de fonctionner, retombent à la surface de la Terre. On peut les récupérer :

- soit en les munissant de parachutes.
Des dispositifs de récupération doivent être mis en place aux environs des divers points d'impact (qui se trouvent généralement, pour des raisons de sécurité, dans des zones maritimes). C'est ce que les Américains pratiquent pour les propulseurs solides de la navette, dont l'impact se situe à distance raisonnable des côtes.
- soit en les dotant d'une capacité de manoeuvre qui leur permette de retourner "en vol" vers une base assignée. Cette procédure, technologiquement plus complexe, est plus séduisante au plan opérationnel.

Le dernier étage, satellisé avec sa charge utile, doit, pour être récupéré, subir une impulsion de désorbitation. Il lui faut ensuite traverser sans dommage les couches atmosphériques, ce qui amène à l'équiper de protections comme une capsule de rentrée (récupération par parachutes) ou comme HERMES (retour en vol).

Ces considérations conduisent au concept d'un lanceur dont chaque étage est une sorte d'avion, capable de revenir à sa base après avoir fourni son impulsion.

La formule d'un lanceur "multi-avions" a été étudiée dans le passé. Le projet initial de la navette américaine était bâti sur ce modèle : un premier étage muni d'ailes (dont la dimension était voisine de celle d'un Boeing 747) emportait sur son dos un second étage analogue à la navette d'aujourd'hui. Cette configuration a été évaluée, avec la technologie disponible à l'époque, comme trop risquée et trop coûteuse en développement. Elle a été abandonnée dès le début du programme au profit du compromis actuel.

L'Europe estime que, dans une perspective à long terme, et compte tenu des progrès technologiques déjà réalisés ou à venir, la formule doit être reprise en considération. C'est actuellement l'axe privilégié des études, autour de projets comportant deux étages (TSTO : Two Stages To Orbit) ou un seul étage (SSTO : Single Stage To Orbit).

Un premier étage de type avion présente l'avantage de pouvoir tirer parti, à la montée, de l'atmosphère terrestre, en se servant de la portance aérodynamique comme force d'appoint et en utilisant l'oxygène de l'air pour tout ou partie de sa propulsion.

La propulsion "aérobie" permet de se passer d'emporter à bord le comburant des moteurs et de faire ainsi l'économie de sa masse (ainsi que de la masse de son réservoir). Elle pose, en contrepartie, le problème de la mise au point d'un moteur capable d'opérer à des grandes vitesses. Les moteurs aéronautiques traditionnels (turboréacteurs) sont en effet limités à une vitesse dépassant peu Mach 3. Pour aller au-delà, il faut faire appel au concept du statoréacteur.

Il existe deux catégories de statoréacteurs :

- ceux dans la chambre desquels la combustion se fait en régime subsonique.
Ce sont les statoréacteurs "classiques". La France est l'un des rares pays du monde à en maîtriser la technologie (le missile ASMP, développé par Aérospatiale et en service dans l'Armée de l'Air, en est équipé). La vitesse limite de leur utilisation se situe entre Mach 6 et 7 (soit environ 2000 m/s).
- ceux dont la combustion se fait en régime supersonique.
Ce sont les "superstatoréacteurs", qui permettent d'atteindre des vitesses de l'ordre de Mach 10 à 15 (3000 à 4500 m/s). Ils n'ont encore fait l'objet d'aucun développement ailleurs qu'en laboratoire.

Les superstatoréacteurs sont particulièrement adaptés à la propulsion du premier étage d'un lanceur spatial bi-étage, comme par ailleurs à la propulsion d'un avion de transport hypersonique. C'est pourquoi ils sont intensivement étudiés :

- aux Etats-Unis, dans le cadre de programme NASP (National AeroSpace Plane),
- plus récemment en France, dans le cadre du programme PREPHA (PRogramme d'Etudes sur la Propulsion Hypersonique Avancée).

L'Agence Spatiale Européenne les a aussi inclus dans sa proposition d'études FESTIP (Future European Space Transport Investigations Programme).

A condition qu'ils soient menés avec vigueur (et, en particulier, avec un financement suffisant), les travaux européens devraient pouvoir aboutir à temps pour que les superstatoréacteurs puissent être intégrés au futur programme de transport spatial.

Il faut noter que l'Agence Spatiale Européenne a été sollicitée, dans un passé récent, par deux propositions nationales :

- le projet HOTOL, lanceur monoétage à propulsion combinée (aérobie et moteurs fusées) et récupérable, d'origine britannique ;
- le projet SÄNGER lanceur biétage "bi-avion" (dont le premier étage est propulsé par des statoréacteurs à combustion subsonique) d'origine allemande.

HOTOL n'a pas été jugé suffisamment attractif pour être retenu. Le Gouvernement britannique, qui en avait financé les premières études, a suspendu son aide. Quelques activités se poursuivent encore, sur un financement industriel très modeste.

SÄNGER, présenté à l'origine comme un programme concurrent de l'ensemble ARIANE 5/HERMES, reste financé, à raison de 100 millions de DM par an, par le Gouvernement allemand. Il constitue une base intéressante pour le futur programme européen.

4.4.2. Missions futures

Comme on l'a vu (cf Chapitre 2), les missions spatiales actuelles s'apparentent, dans leur principe, à un tir d'artillerie. Les véhicules spatiaux reçoivent du lanceur une impulsion initiale qui les place sur une trajectoire parcourue ensuite sur ce seul élan. Les systèmes de propulsion embarqués ne sont utilisés que ponctuellement pour des manoeuvres de correction ou de modification de trajectoire.

Le schéma ne prend pas en compte le cas où, après injection, les véhicules resteraient propulsés par une faible force de poussée. Cette faible poussée, à condition qu'elle agisse pendant un temps très long, peut donner des impulsions de vitesse très élevées.

Le procédé trouve des applications intéressantes :

- A partir d'une orbite à basse altitude, l'action d'une faible poussée peut accroître progressivement le rayon de la trajectoire jusqu'à l'altitude géostationnaire ou l'altitude d'orbitation lunaire.
- Après avoir reçu du lanceur une vitesse initiale supérieure à la vitesse de libération, un véhicule soumis à une faible poussée peut réduire considérablement son temps de parcours vers une comète ou une planète.

La réalisation de la poussée peut être obtenue de plusieurs façons :

- en **mode passif**, par utilisation du rayonnement solaire. Le Soleil émet en permanence des photons, particules de lumière qui possèdent une certaine quantité de mouvement. Lorsqu'on intercepte ces photons avec un miroir (ou "voile"), il apparaît sur le miroir une pression. Cette pression crée une force qui peut être utilisée pour la propulsion. A titre indicatif, un miroir carré de 1 km de côté, placé perpendiculairement au rayonnement solaire, produit une poussée de 1 décanewton (soit environ 1 kg). Cette poussée est "gratuite". La seule difficulté consiste à réaliser une voile de très grande dimension aussi légère que possible. Il existe actuellement le projet d'une course à la voile vers la Lune.

- en **mode actif**, par utilisation d'un système propulsif embarqué.
Le système propulsif est composé d'un réservoir de fluide et d'une source d'énergie capable d'accélérer le fluide à une vitesse d'éjection V_e . Pour produire une poussée pendant un temps très long, il faut bien entendu minimiser la masse de fluide à emporter, et donc viser des vitesses d'éjection les plus élevées possibles. La propulsion chimique, dans laquelle le fluide (gaz produits par la combustion des ergols) contient sa propre source d'énergie, donne - parce que les vitesses d'éjection sont limitées à 5000 m/s environ - des consommations prohibitives.

Les systèmes actuellement envisagés font essentiellement appel à deux types de sources d'énergie :

- **l'énergie électrique**, utilisée :

- soit pour accélérer un fluide neutre (hydrazine, ammoniac, hydrogène) par augmentation de sa température dans une chambre munie d'une tuyère (par l'intermédiaire d'une résistance chauffante - résistojet - ou d'un arc électrique - arcjet -).

Les vitesses d'éjection obtenues varient, selon le fluide, de 6000 à près de 30 000 m/s.

- soit pour accélérer à travers un champ électromagnétique un plasma produit à partir de téflon, d'argon ou d'hydrazine.
- soit pour accélérer dans un champ électrique des particules ionisées de césium, de mercure ou de xénon. Cette propulsion "ionique" conduit à des vitesses d'éjection de 50 000 à 100 000 m/s.

Les poussées fournies par les propulseurs électriques varient de quelques millinewtons au décanewton (de quelques dixièmes de milligramme au kg).

- **l'énergie nucléaire**, utilisée soit pour produire de l'énergie électrique (nucléaire électrique), soit pour chauffer directement de l'hydrogène (nucléaire thermique), dans une chambre équipée d'une tuyère. Dans ce dernier cas, les vitesses d'éjection obtenues sont de l'ordre de 7000 à 12 000 m/s.

Les propulseurs nucléaires pourraient être utilisés pour les missions habitées vers la Lune et Mars, et pour des sondes automatiques envoyées vers les planètes extérieures.

Toutes les systèmes cités font l'objet de développements exploratoires aux Etats-Unis, en URSS et en Europe. Des prototypes ont souvent été construits. Certains matériels (URSS) ont été installés sur des satellites pour réaliser des corrections d'orbites (satellites géostationnaires Ekran et Qorizout). D'autres (USA) doivent voler sur les satellites Eutelsat 7 et Telstar 4.

En France, l'ONERA, la SNECMA, la SEP et le CEA poursuivent des études et des développements sous l'égide du CNES et de l'Agence Spatiale Européenne.

Grâce à ces systèmes embarqués, les véhicules spatiaux futurs pourront jouer un rôle actif dans la dynamique de leur mission.



OFFICE PARLEMENTAIRE
D'EVALUATION DES CHOIX
SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES

EXPERTISE n°2

SCIENCES DE L'UNIVERS

(Contribution au rapport présenté par Paul LORIDANT, Sénateur de l'Essonne,
sur les ORIENTATIONS DE LA POLITIQUE SPATIALE FRANCAISE ET EUROPEENNE)

Françoise PRADERIE

Françoise PRADERIE

ETUDES POURSUIVIES

1956 Admission à l'E.N.S. de jeunes Filles
1960 Agrégation de Sciences Physiques
1967 Thèse de Doctorat d'Etat, Paris (direction : J.C.Pecker)

POSTES OCCUPES

1961 Attachée de Recherche au C.N.R.S, Observatoire de Paris
1969 Astronome adjoint stagiaire à l'Observatoire de Paris
1970 Visiting Fellow, Joint Institute for Laboratory
1980 Astronome titulaire, en fonction à l'Observatoire de Paris (Meudon), Département de recherche Spatiale.

FONCTIONS RECEMMENT EXERCEES

Vice-présidente du Conseil Scientifique de l'Observatoire de paris (mars 1984, mars 1986)
Membre du C.S.R.T. (février 1985 - février 1987)
Rédacteur en chef de la revue européenne Astronomy and Astrophysics.
Chef du Département Terre, Océan, Espace, Environnement, à la Direction générale de la recherche et de la technologie, M.R.T. (octobre 1988 - mai 1991)
Administrateur de l'IFREMER (mars 1989 - avril 1991)
Membre du Comité Scientifique Consultatif auprès de la Direction de la Météorologie Nationale. (1990 - 1991)

DISTINCTIONS

1976 Prix d'Abadie de l'Académie des Sciences
1983 Chevalier de l'Ordre National du Mérite
1987 Prix Stroobant de l'Académie Royale des Sciences de Belgique.

PUBLICATIONS

58 publications dans les revues à lecteurs
42 communications dans des revues sans lecteurs
4 ouvrages édités
2 articles dans des ouvrages originaux collectifs
1 ouvrage original (en collaboration avec E. Schatzam, 1990)
Astrophysique: les étoiles, collection Savoirs actuels, Interéditions/ Editions du CNRS
4 articles de vulgarisation
Nombreux rapports à la demande du CNES, de l'ESA, du CNRS et del'INSU.

CONDUITE D'UNE EXPERIENCE SPATIALE

Comme Investigateur Principal, de 1981 à 1988 : Etude de la microvariabilité, de la rotation et des intérieurs stellaires (Il s'agit d'étudier l'intérieur es étoiles par les méthodes de la sismologie, puisque les étoiles vibrent et que leurs vibrations donnent lieu à des variations de lumière infinitésimales). Cette expérience a été acceptée au début de 1989 sur la sonde Mars 94 du programme soviétique, alors qu'A.Baglin m'avait succédé comme investigateur Principal.

septembre 1991

CHAPITRE "SCIENCES DE L'UNIVERS"
DU RAPPORT DE L'OFFICE PARLEMENTAIRE D'EVALUATION
DES CHOIX SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES
SUR LA POLITIQUE SPATIALE FRANCAISE ET EUROPEENNE

Françoise Praderie
Jean-Loup Puget
Michel Blanc

0. Sommaire: résumé des recommandations	1
1. Objet des sciences de l'univers (astronomie, étude du système solaire, géophysique externe).....	6
2. Pourquoi étudier l'univers, proche et lointain, par des moyens spatiaux?.....	8
2.1 Trois motivations fondamentales	8
2.2 S'affranchir des perturbations introduites par l'atmosphère dans l'observation.....	9
2.3 Observer de près les objets du système solaire.....	10
2.4 Etudier in situ l'environnement spatial.....	11
2.5 La place des sciences de l'univers dans l'ensemble des activités spatiales.....	12
3. Les différents types d'instruments embarqués. Les expériences réalisées en France entre 1980 et 1990	14
3.1 Les instruments qui servent à l'exploration spatiale de l'univers: une vue d'ensemble.....	14
3.1.1 Les collecteurs de rayonnement cosmique.....	14
3.1.2 Les collecteurs de rayonnement électromagnétique ...	15
3.1.3 Les instruments de mesure in situ de l'environnement spatial.....	20
3.1.4 Les instruments de géophysique pour l'exploration planétaire	23
3.2 Les réalisations françaises depuis 1980.....	24

4. Missions spatiales en opération, missions approuvées, missions à l'étude. Utilité des stations spatiales pour les sciences de l'univers. L'observatoire.....	28
4.1 De l'intérêt des observatoires en orbite.....	28
4.2 Sondes et observatoires spatiaux en fonctionnement. Plans à long terme des agences.....	29
4.3 Sondes et observatoires spatiaux approuvés. Le programme ballons français.....	31
4.4 Sondes et observatoires spatiaux à l'étude.....	32
4.5 Les sciences de l'univers bénéficieront-elles des stations spatiales?.....	33
4.6 La Lune: base sélénophysique et observatoire astronomique.....	35
4.6.1 L'étude géophysique de la Lune.....	36
4.6.2 L'observatoire Lune.....	37
5. Processus d'élaboration, de décision, de financement des projets et programmes.....	39
5.1 Elaboration des projets et programmes de recherche spatiale.....	39
5.2 Processus de prise de décision.....	41
5.2.1 Une méthode de décision fiable.....	41
5.2.2 Les responsabilités.....	42
5.2.3 Les difficultés.....	43
5.2.4 Les relations avec la NASA.....	45
5.3 Le financement de la recherche spatiale en sciences de l'univers. Budget scientifique du CNES et de l'ESA.....	45
5.3.1 Le contexte, à l'ESA et au CNES.....	45
5.3.2 Les arbitrages au niveau français.....	46
5.3.3 La conduite de chaque projet au CNES.....	46
5.3.4 Difficultés propres au budget scientifique de l'ESA.....	48
5.3.5 Comparaison de l'effort scientifique spatial français à celui des principaux partenaires européens.....	49
5.4 Interaction des agences spatiales avec les industriels..	50
5.4.1 Construction de satellites.....	50
5.4.2 Construction d'expériences.....	50
5.5 Le principe du juste retour.....	51
6. Quels sont les principaux choix scientifiques et technologiques à effectuer à l'heure actuelle et à l'horizon 2000 et au-delà?.....	53
6.1 Le cercle de la politique nationale en matière de recherche spatiale scientifique.....	54
6.1.1 Assurer la formation des jeunes chercheurs.....	54
6.1.2 Articulation du programme national avec le programme de l'ESA.....	55
6.1.3 Le cas de la coopération franco-soviétique.....	56
6.1.4 L'entrée en scène du Japon.....	56

6.1.5	Comment conduire les grandes missions spatiales?.....	56
6.2	Le cercle de la recherche spatiale en sciences de l'univers au sein des autres activités du programme spatial.....	57
6.2.1	Financer les disciplines spatiales nouvelles.....	57
6.2.2	Retour sur les stations spatiales.....	58
6.2.3	La politique des lanceurs.....	58
6.2.4	L'utilisation des données spatiales.....	58
6.2.5	La synergie entre le programme de recherche et le programme de R et T.....	60
6.3	Appréciation de la cohérence et de la pertinence des choix.....	61
6.3.1	L'intérêt scientifique du programme de recherche.....	61
6.3.2	Le pilotage du programme de recherche.....	62
6.3.3	Cohérence entre programmes nationaux et programmes conduits par l'ESA.....	62
6.3.4	Utilisation des ressources.....	62
6.3.5	Equilibre entre grandes, moyennes et petites missions.....	63
6.3.6	Base technologique du programme scientifique.....	63
6.3.7	Evaluation des résultats.....	63
7.	Retombées du programme scientifique en sciences de l'univers..	64
7.1	Retombées scientifiques.....	64
7.2	Retombées technologiques.....	65
7.3	Retombées économiques.....	67
8.	Quelles sont les difficultés et les contraintes spécifiques des laboratoires de recherche français qui se consacrent aux sciences spatiales de l'univers?.....	69
8.1	L'état actuel des laboratoires spatiaux.....	69
8.2	Le partage des tâches entre laboratoires spatiaux, industrie, agences et laboratoires "fondamentalistes".....	70
8.2.1	La conception des projets.....	70
8.2.2	L'étude de faisabilité et de définition; la réalisation: maîtrise d'oeuvre, soustraitance.....	70
8.2.3	L'étalonnage et les tests.....	71
8.2.4	Les opérations en vol.....	71
8.2.5	La calibration des données, leur distribution et leur archivage.....	71
8.3	Le personnel.....	72
8.3.1	Les ambiguïtés de la situation actuelle.....	72
8.3.2	Les difficultés du recrutement.....	74
8.3.3	Le problème de la formation.....	75
8.3.4	Relations avec l'industrie du point de vue de la formation.....	76
8.4	Questions de priorité intellectuelle.....	76
9.	Conclusions et perspectives.....	78

Glossaire.....	82
Références bibliographiques.....	84
Remerciements.....	85
Annexes (9).....	86

SOMMAIRE

RESUME DES RECOMMANDATIONS

1. Situation générale

La recherche spatiale consacrée aux sciences de l'univers (astronomie, étude du système solaire, géophysique externe) est un des objectifs affichés du programme spatial de l'agence nationale (CNES) et de celui de l'agence européenne (ESA).

De *grands succès* ont été obtenus dans l'un et l'autre cadre, grâce au travail des équipes françaises, rodées depuis près de 30 ans. On peut citer à titre d'exemple

- en ce qui concerne l'étude du soleil les expériences emportées en ce moment même vers les pôles du soleil par la sonde ESA/NASA Ulysses, qui pour la première fois quittera le plan de l'écliptique,
- en ce qui concerne la géophysique externe, le rôle majeur joué par les équipes françaises dans l'étude physique passée (missions GEOS et ARCAD) et future (mission CLUSTER) de la magnétosphère terrestre,
- en ce qui concerne l'exploration du système solaire les instruments placés à bord des sondes VEGA et GIOTTO qui ont frôlé en 1986 la comète de Halley, et ceux placés à bord de la mission soviétique PHOBOS qui malgré l'échec relatif final de cette mission vers un des satellites de la planète Mars, ont réussi à fournir des résultats importants sur le sol et l'atmosphère de Mars,
- en ce qui concerne l'espace lointain l'usage qu'a fait la communauté astronomique française de satellite-observatoires tels IUE (International Ultraviolet Explorer, rayonnement ultraviolet) ou EXOSAT (rayons X), et l'implication majeure de laboratoires français dans l'expérience SIGMA en rayons gamma mous, qui vole dans le cadre de la collaboration franco-soviétique et recueille des données remarquables sur les phénomènes violents dans l'univers (annexes 2 et 3.1).

La *capacité de proposition* des équipes françaises s'appuie sur l'expérience de ces 30 années. Ces équipes se placent en première ligne en Europe (annexes 3.2 et 3.3).

Lors des colloques de prospective, la communauté scientifique en sciences de l'univers définit les grandes lignes des futurs projets. Il s'agit pour les années qui viennent:

- dans le domaine de l'étude du système solaire, a) de participer à l'exploration de Mars et à échéance plus lointaine à celle de la Lune, b) d'accompagner les Etats-Unis dans certaines missions vers les planètes géantes;
- dans le domaine de l'environnement spatial, d'étudier les mécanismes d'accélération des particules aurorales grâce à des satellites à haut débit de télémessure;
- dans le domaine de l'univers lointain, de participer aux grandes missions dites "pierres angulaires" de l'ESA: observatoire de la couronne et du vent solaires, observatoire en rayons X, grande antenne submillimétrique.

Les crédits publics qui permettent à la recherche spatiale en sciences de l'univers de se développer contribuent donc de façon exemplaire à l'avancée du front des connaissances. Les retombées technologiques de ces activités, quoiqu'elles soient encore peu mises en forme en termes économiques, sont dans l'ordre qualitatif impressionnantes (annexe 8).

Ces crédits représentent moins de 10% de la dotation budgétaire qui alimente le CNES (annexe 6), au sein du Budget Civil de Recherche et de Développement (BCRD). L'horizon 10% est fixé comme très souhaitable par les tutelles, en comparaison avec la part des crédits de la NASA (espace civil) qui va à la science, quoique le périmètre des dépenses soit différent entre les deux agences, ne permettant qu'une analogie en grosse masse.

Une fraction de 39% des crédits scientifiques du CNES (en 1991) s'en va vers le budget scientifique de l'Agence Spatiale Européenne. La part de la France à travers cette contribution obligatoire est de 18% du budget scientifique de l'Agence.

Ainsi les scientifiques français spécialistes des sciences spatiales de l'univers réalisent-ils leurs expériences avec les moyens que le CNES met à la disposition de huit laboratoires (annexe 1), les expériences étant lancées et mises en orbite soit dans le cadre ESA, soit dans un cadre bilatéral (France/USA, France/URSS).

La France n'est pas le pays d'Europe qui consacre le budget le plus important à la recherche spatiale, elle se situe en seconde position en volume après l'Allemagne et en dernière position selon le ratio "total science spatiale rapporté à la contribution totale à l'ESA" (annexe 7).

2. Analyse du fonctionnement de la recherche spatiale en sciences de l'univers

Cette analyse a conduit les rédacteurs du rapport à formuler des recommandations, qui sont résumées ici.

Les perspectives de ces recommandations, reprises de la conclusion du rapport, s'organisent autour de trois thèmes:

- La coopération internationale est indispensable à la recherche spatiale des années qui viennent. Il faut exploiter la détente politique pour amener cette coopération à tendre sans réserve vers l'objectif de meilleur rendement des ressources existantes. En ce sens, toute duplication de mission de grande envergure n'a plus lieu d'être.
- L'Europe a un rôle éminent à jouer, et de ce fait les programmes des agences nationales en Europe doivent s'articuler plus précisément qu'aujourd'hui aux programmes de l'ESA. Les partenaires non techniciens que sont la Communauté Economique Européenne (CEE) et la Fondation Européenne de la Science (ESF) doivent être associés à l'aventure, chacun dans leur ordre et avec les moyens adéquats.
- Le programme de recherche en sciences fondamentales mérite une priorité dans les choix stratégiques des agences. Cette affirmation prend tout son sens alors que le programme technologique "Vols Habités" va être l'objet de grandes décisions. S'agissant des sciences de l'univers, il nous faut souligner que, comme l'observation de la Terre, elles n'ont aucun besoin de stations spatiales habitées, avec une présence de l'homme durant de longues périodes dans l'espace.

Voici maintenant ces recommandations:

- L'efficacité de l'utilisation des ressources requiert que *les décisions soient harmonisées entre agences nationales européennes et ESA*. Une conférence ministérielle se réunissant de façon souple tous les deux ou trois ans (ou une réunion du conseil de l'ESA au niveau des ministres) devrait assurer cette harmonisation.
- Les *très grandes missions* devraient être désormais toujours réalisées à l'échelle mondiale. Un mécanisme doit se mettre en place qui permette aux agences des grands pays (Etats-Unis, URSS, Japon, ESA) a) de se tenir au courant des projets en développement b) de coordonner de façon fiable les réalisations.
- Le *programme de recherche spatial de l'Union Soviétique* mérite de la part de l'Europe, et spécialement de la France, une considération particulière. Il ne s'agit pas de la dette symbolique que nous avons à son endroit. Il s'agit

de lui permettre de se poursuivre. Des "joint ventures" devraient être montées qui, sur la base d'un bénéfice mutuel, permettraient que les moyens importants de construction et d'essais disponibles chez les soviétiques soient sauvés de la déshérence, et réorientés vers la coopération internationale.

- Il conviendrait de *poursuivre dans le cadre national*
 - a) un vigoureux programme de petites missions permettant la formation à l'espace de jeunes chercheurs,
 - b) le programme ballons qui est un des seuls existants en Europe,
 - c) tout programme bilatéral qui aura une originalité avérée sur la scène mondiale,
 - d) le programme de recherche et technologie qui assure une base technologique avancée aux expériences à venir.

- *Le programme de recherche en sciences de l'univers ne justifie pas à lui seul un effort de développement de lanceurs lourds.* Pour atteindre la Lune, qui est un observatoire potentiel de première classe, il convient d'utiliser d'abord ce qui existe, y compris dans l'Europe large. Le programme sciences de l'univers a besoin d'un lanceur moyen, peu onéreux.

- Au niveau français, le financement de la recherche spatiale est assuré par le CNES pour le matériel, les essais, les lancements. Nous préconisons qu'avant de prendre une décision quant à une mission ou à un instrument à lancer, il soit établi un *budget consolidé prévisionnel*. Tous les organismes qui financent y participeront (CNRS, CNES, éventuellement CEA et universités). Ce budget doit inclure le coût des personnels et, question importante, celui du traitement des données.

- Afin de *parvenir à la vérité des prix des expériences*, nous recommandons également qu'une comptabilité analytique des dépenses soit scrupuleusement tenue. Cet outil de connaissance de la réalité devrait permettre de mieux piloter les décisions prises, et de préparer les décisions futures sur des bases saines.

- Une *évaluation* du programme de recherche spatial, aidé des outils ci-dessus recommandés, devrait être accomplie périodiquement et de façon indépendante du jugement interne des agences. Tous les moyens existent pour que ceci fonctionne (Comité National d'Evaluation de la Recherche, en France; haut comité ad hoc formé de personnalités compétentes qui pourrait être suscité par le Space Science Committee de l'ESF au niveau européen).

- Fondée sur une pratique qui s'étend, une *redéfinition du rôle des laboratoires spatiaux français* devrait s'imposer: plus de grosses expériences devraient se réaliser dans l'industrie (c'est déjà la situation en Allemagne). Les laboratoires, implantés en milieu universitaire et irrigués par l'échange d'idées que cette situation autorise,

devraient se consacrer à des tâches spécifiques: réaliser les petites expériences; préparer la définition scientifique des grosses expériences, puis une fois la décision de réalisation prise, assurer avec soin et autorité le lien entre industries et laboratoires; enfin prendre la complète responsabilité des opérations d'étalonnage et la responsabilité partielle des opérations en vol.

Les laboratoires devraient être impliqués dans la formation des ingénieurs du spatial, en liaison avec les écoles et IUT. Leur déficit chronique en personnel qualifié (et de qualification pointue) serait en partie comblé par la présence de jeunes ingénieurs en formation. Le financement de ces jeunes ingénieurs doit être étudié. Le CNRS et les universités devraient se préoccuper de maintenir le niveau des recrutements pour le personnel permanent nécessaire, ce que les grilles de salaire actuelles ne permettent en aucune façon.

3. Mise en pratique de ces recommandations

Afin de mettre ces recommandations en pratique, le budget scientifique du CNES doit continuer de croître. Le terme de comparaison convenable pour cet accroissement ne devrait être ni une fraction de la dotation totale du CNES (dont toute une partie dépend de choix politiques), ni une référence aux programmes du CNRS, mais un taux de croissance régulier assuré sur un certain nombre d'années, comme c'est le cas pour le budget scientifique de l'ESA. Un autre terme de comparaison valable est la dépense que l'Allemagne consacre en volume à sa recherche scientifique spatiale (voir annexe 7).

Cette croissance devrait en particulier permettre le développement des recherches sur l'observation de la Terre, tandis que les sciences de l'univers qui sont l'objet du présent rapport ne devraient pas subir de compression.

Section 1

OBJET DES SCIENCES DE L'UNIVERS(ASTRONOMIE, ETUDE DU SYSTEME SOLAIRE, GEOPHYSIQUE EXTERNE)

On considère, dans les pages suivantes, les sciences de l'univers proche et lointain, que l'on peut appeler astronomie au sens large: ce sont l'astrophysique, la physique de l'astre Soleil, l'étude du système solaire et celle de l'environnement ionisé de la planète Terre, c'est-à-dire la partie la plus élevée de l'atmosphère terrestre (plus de 100 km au-dessus du sol) qui est véritablement son interface avec le milieu interplanétaire. Ces sciences constituent historiquement le premier champ d'action, et demeurent, après trente ans de succès, un domaine privilégié de la recherche spatiale fondamentale; celle-ci en a radicalement bouleversé le paysage et les perspectives. D'autres sciences bénéficient de l'espace depuis une période plus récente: celles de l'observation de la Terre et de son environnement proche, celles de la microgravité (physique de la matière condensée, physiologie et biologie), elles sont traitées aux chapitres 3 et 5 de ce rapport.

Quel est l'objet des sciences de l'univers proche et lointain? La planète Terre, où nous vivons, appartient au cortège des neuf planètes qui circulent autour du Soleil. Le Soleil est lui-même une étoile, comme il en existe des centaines de milliards dans la Voie Lactée. Celle-ci est une galaxie, comme il en existe des centaines de milliards dans l'univers observable. A d'autres époques, cet univers était perçu comme stable et limité, dans le temps et dans l'espace. Pendant des siècles, certains pensèrent que la Terre en était le centre. La révolution copernicienne détruisit cette représentation primitive. Et, depuis Galilée et Newton, l'observation systématique de l'univers, épaulée par l'établissement de théories explicatives et prédictives, a progressivement et continument changé en profondeur la vue que nous avons de l'univers.

L'astronomie, au sens large, a donc pour objet d'explorer l'univers, depuis la haute atmosphère de la Terre jusqu'en ses confins les plus lointains dans l'espace et les plus reculés dans le temps. Elle met ses outils méthodologiques et ses moyens d'investigation au service des grandes questions que se posent les hommes quant à leur place dans l'univers; on peut dire qu'aujourd'hui elle se concentre particulièrement sur les questions liées aux origines:

- Quelle est l'origine de l'univers? quel est son âge?
- Comment a-t-il évolué? Son histoire a-t-elle un terme?
- Comment se sont formées les galaxies?
- Comment naissent, évoluent et meurent les étoiles?

- Comment et où se sont synthétisés les éléments chimiques dont toute chose est faite, notamment la matière vivante?
- Comment le système solaire et les différents objets qui le composent se sont-ils formés à partir du milieu interstellaire préexistant? Comment ces différents objets ont-ils évolué pour donner aux planètes, à leurs anneaux et satellites, aux astéroïdes et comètes, leur visage présent?
- Dans quelles conditions la vie est-elle apparue dans le système solaire? la Terre est-elle la seule planète à porter des êtres vivants?
- Toute la matière présente dans l'univers nous est-elle accessible?

Pour remplir ce programme, l'astronomie développe des moyens propres, mais elle fait aussi alliance avec beaucoup d'autres sciences. En effet, il lui faut aussi bien établir, à l'aide de l'astrométrie, des balises de distances dans l'univers que déterminer, au moyen de la spectroscopie, la composition chimique des astres ou que comprendre, avec les physiciens des particules, pourquoi les éléments constitutifs de la matière existent sous les formes et avec les propriétés que nous leur connaissons, et pas sous d'autres.

L'astronomie, si elle entretient des liens très étroits avec la physique et la chimie, n'est pas comme ces dernières une science expérimentale, où l'on a accès à l'objet étudié que l'on peut modifier, mais une *science observationnelle*. Sa méthodologie est donc différente. Il n'y a pas à proprement parler de preuve expérimentale d'une théorie astronomique élaborée pour expliquer une observation particulière. Il n'y a que des prédictions d'autres observations, et de ce fait un poids considérable revient aux arguments de cohérence entre observations différentes liées entre elles par les modèles théoriques. La complémentarité des observations est donc essentielle, comme l'est aussi l'effort pour assurer un progrès coordonné entre les types d'observations possibles.

Depuis que l'astronomie fonctionne comme science, c'est-à-dire depuis le 17^{ème} siècle, il n'a cessé d'arriver que chaque embryon de réponse apporté aux questions exposées plus haut ouvre la porte à d'autres questions plus difficiles. De sorte que cette science est la plus exigeante incitation aux interrogations de l'esprit autant que la plus magnifique occasion de bâtir des instruments de mesure pour explorer plus avant l'univers.

Section 2

POURQUOI ETUDIER L'UNIVERS,PROCHE ET LOINTAINPAR DES MOYENS SPATIAUX?**2.1 Trois motivations fondamentales.**

Les motivations qui poussent à réaliser un programme spatial d'étude de l'univers sont désintéressées: elles ne sont en premier lieu ni politiques, ni idéologiques, ni économiques, ni liées au prestige de quiconque, si ce n'est au prestige qu'apporte à un pays ou à un groupe de pays la satisfaction de faire progresser le champ des connaissances grâce au travail de ses scientifiques, de ses ingénieurs et de son industrie. Outre le contexte de la guerre froide, c'est une certaine curiosité vis-à-vis de l'inconnu qui a poussé les américains à lancer les premières fusées, anciens V2, juste après la seconde guerre mondiale: d'emblée il en résulta la découverte du rayonnement de courtes et très courtes longueurs d'onde (ultraviolet et rayons X) du Soleil, rayonnement qui ne parvient pas jusqu'au sol de la Terre. C'est d'abord en réponse au désir de découvrir qu'a été par la suite entretenu et développé le programme de recherche des puissances spatiales (les applications en météorologie, télécommunications, télédétection ne sont venues que plus tard), ou à tout le moins cette motivation mise en avant par les agences a convaincu les opinions publiques ou les décideurs. Comme nous le montrerons (section 7), enfin, la recherche spatiale consacrée à l'univers a aussi été et demeure un facteur de mise au point de technologies nouvelles, civiles, dont l'usage s'est répandu à l'intérieur du monde de la science et au-delà: la recherche spatiale est un catalyseur pour le développement technologique extrêmement avancé.

Il y a trois raisons essentielles pour étudier les objets de l'univers proche et lointain par des moyens spatiaux:

2.1.1 S'affranchir des perturbations introduites par l'atmosphère terrestre lorsqu'on observe les objets astronomiques à distance en collectant leur rayonnement électromagnétique. Ceci conduit à l'utilisation des *observatoires astronomiques orbitaux*.

2.1.2 Aller observer les objets de près pour les voir avec plus de détail. C'est le domaine des *sondes interplanétaires*, qui ont déjà permis aujourd'hui de réaliser un survol rapproché de la quasi-totalité des planètes du système solaire.

2.1.3 Aller étudier ces objets sur place, en y effectuant des mesures in situ. C'est ce que l'on peut appeler au sens strict

l'exploration spatiale. Elle concerne à nouveau les objets du système solaire, que l'on peut aller étudier sur place en parachutant des instruments de mesure dans leur atmosphère et en les posant sur leur surface. Elle s'adresse aussi à l'étude in situ de l'environnement spatial lui-même, défini comme le milieu dans lequel se déplacent satellites et sondes interplanétaires: l'environnement spatial de la Terre, que constituent son *ionosphère* et sa *magnétosphère*, et le *milieu interplanétaire* dans lequel baignent les sondes qui partent vers d'autres planètes.

Nous allons approfondir les fondements techniques de ces trois motivations de base. Mais il est important de souligner d'entrée que l'utilisation des moyens spatiaux modifie radicalement le champ des connaissances accessibles à l'homme sur les objets de l'univers.

2.2 S'affranchir des perturbations introduites par l'atmosphère dans l'observation.

Pour un astronome qui n'utiliserait que ses yeux, ce qu'on appelle communément le ciel, bleu le jour quand les molécules de l'atmosphère terrestre diffusent la lumière du Soleil et nous renvoient principalement sa composante bleue, noir la nuit quand le Soleil et la Lune sont couchés, est une manifestation incontournable de la présence de l'atmosphère terrestre.

Celle-ci agit d'une part comme un *filtre sélectif*. Elle est en effet transparente au rayonnement visible (celui des ondes électromagnétiques que l'oeil humain perçoit comme "lumière"), et à une partie des ondes électromagnétiques constituant le rayonnement radio (de 1 mm à 30 m de longueur d'onde). Quelques "fenêtres" de transparence existent aussi dans l'infrarouge. Mais l'atmosphère est opaque à l'ensemble des autres rayonnements émis par les objets "célestes" (planètes, comètes, étoiles, galaxies...). Les autres rayonnements qui n'atteignent pas le sol de la Terre sont les rayons ultraviolets, X et gamma (tous de longueurs d'onde plus courtes que celles du rayonnement visible), la plus grande partie du rayonnement infrarouge et submillimétrique entre 10 μm et 1 mm, enfin les ondes radio les plus longues (de longueur d'onde supérieure à 30 m).

Un second défaut majeur de l'atmosphère terrestre est sa mauvaise qualité optique: elle *brouille* les images. L'agitation des couches d'air perturbe le trajet des rayons lumineux qui arrivent au sol, de sorte que même les meilleurs télescopes ne peuvent former des images aussi fines que le permettrait théoriquement leur ouverture (la "résolution spatiale" d'un télescope, ou son pouvoir de résolution, est inversement proportionnel à son diamètre, pour une longueur d'onde donnée). Les images d'objets astronomiques observés au sol sont des taches étalées (sauf si on applique la technique d'optique adaptative, mise au point depuis peu, et fonctionnant pour le moment seulement dans l'infrarouge).

Enfin, troisième défaut, l'atmosphère de la Terre, composée de gaz éclairés par le Soleil durant le jour, a un rayonnement

propre, qui se situe principalement dans l'infrarouge, mais aussi un peu dans le visible et l'ultraviolet. La *luminescence* atmosphérique contribue à rendre le fond de ciel un peu lumineux, et la nuit moins noire car l'atmosphère se refroidit peu entre le jour et la nuit. Or pour détecter les objets les plus faibles de l'univers, on voudrait disposer d'un contraste fort, devant un fond de ciel aussi noir que possible.

Les avantages que présente l'observation spatiale pour l'astronomie, au vu de ces défauts de l'atmosphère, sont donc :

- l'accès à la *totalité du spectre électromagnétique*, des rayons gamma aux ondes radio
- la *finesse des images*, qui peuvent atteindre le pouvoir de résolution théorique des instruments (à condition que les miroirs soient construits sans défauts de surface!)
- la *stabilité temporelle*, car dans le vide spatial il n'y a plus de perturbation des trajets lumineux; il devient alors possible de mesurer les très faibles variations intrinsèques de lumière des objets astronomiques.

De plus, on peut voir la *quasi-totalité du ciel* depuis un satellite, ce qui est hors de portée d'un télescope au sol; on peut aussi réaliser des séries d'observations continues dans le temps, qui ne sont pas interrompues, comme au sol, par l'alternance du jour et de la nuit.

Enfin, si l'on observe un même objet à partir du sol et simultanément à partir d'un véhicule spatial, on peut restituer la direction dans l'espace de certaines quantités mesurées qui sont des vecteurs. S'ouvre ainsi la possibilité d'observations *stéréoscopiques*.

2.3 Observer de près les objets du système solaire.

L'avantage des moyens spatiaux pour l'étude des objets du système solaire est encore plus flagrant que pour l'observation astronomique à distance. Lorsque la sonde GIOTTO, le 13 mars 1986, s'est approchée à 600 km seulement du noyau de la comète de Halley, elle nous a tout simplement permis de voir le noyau pour la première fois.

Les sondes interplanétaires VOYAGER, dans leurs survols des planètes Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune nous ont fait découvrir de nouveaux satellites, des anneaux jamais vus auparavant (c'est grâce à VOYAGER que l'on sait aujourd'hui que les quatre planètes géantes sont chacune entourées d'un système d'anneaux). Elles ont aussi montré sur les anneaux et les satellites déjà connus des détails qui seraient à jamais restés hors d'atteinte des télescopes terrestres et même des télescopes en orbite. Pour résumer, en prenant des images des planètes ou de leurs satellites depuis une sonde interplanétaire en survol rapproché ou en orbite autour d'eux, on améliore de plusieurs ordres de grandeur le pouvoir de résolution et le seuil de sensibilité associés à leur observation.

Mais il y a d'autres avantages encore, qui correspondent à une rupture encore plus radicale avec les méthodes de l'observation

depuis la Terre. En se plaçant en orbite autour d'une planète, on peut étudier son champ de gravité à partir de l'analyse du mouvement du satellite artificiel que l'on a utilisé, et en déduire des informations sur la répartition des masses à l'intérieur de cette planète, donc sur sa *structure interne*. Surtout, pour étudier l'atmosphère ou la surface d'une planète, les informations obtenues par télédétection spatiale depuis son orbite, comme on a commencé à les acquérir depuis quelques années pour notre Terre, peuvent être complétées par d'autres obtenues directement in situ, par une sonde descendant sous parachute dans l'atmosphère ou par une station automatique de mesure géophysique déposée sur son sol. Les méthodes de la météorologie, de la géologie, de la géophysique et de la géochimie développées depuis longtemps sur le sol de notre planète peuvent alors très naturellement être appliquées à l'étude des autres planètes. Ceci situe à une place bien particulière dans les sciences de l'univers la planétologie, définie comme l'étude de l'ensemble des objets en orbite autour du Soleil; dès lors qu'elle fait appel à l'exploration spatiale, la planétologie se trouve au carrefour de l'astronomie et de la géophysique dont elle utilise toutes les méthodes.

2.4 Etudier in situ l'environnement spatial

L'environnement dans lequel baignent nos satellites artificiels est un milieu très raréfié comprenant deux composantes: les atomes et molécules qui peuplent la très haute atmosphère de la Terre, mais aussi un *plasma*, mélange d'ions et d'électrons, créé au-dessus de 90 km d'altitude environ par l'effet ionisant des rayons ultraviolets et X du Soleil. Ce plasma constitue l'*ionosphère terrestre*.

Le plasma de l'environnement terrestre est enfermé dans une cavité magnétique en forme de comète, la *magnétosphère terrestre*. La magnétosphère peut être définie comme l'extension dans l'espace du champ magnétique terrestre. Dans la direction du Soleil, en avant de la Terre, cette extension est limitée à une distance d'environ 12 fois le rayon de la terre. Au-delà, après franchissement d'une frontière assez abrupte, on pénètre dans le *milieu interplanétaire* proprement dit. Ce milieu est l'extension dans l'espace de la haute atmosphère du Soleil (la *couronne*) et de son champ magnétique. C'est parce que cette haute atmosphère solaire est en permanence en expansion (le Soleil souffle un vent dont la vitesse est de 400 km/sec) que le champ magnétique terrestre se trouve lui-même confiné à l'intérieur de la cavité magnétosphérique.

Depuis le sol, les manifestations de cet environnement spatial de la terre sont limitées et très indirectes. Les *aurores boréales et australes* en sont le seul signe visible. Pour en savoir plus sur ce milieu, on était, avant l'ère spatiale, limité à deux techniques, l'étude des perturbations du champ magnétique au sol induites par les courants circulant dans la haute atmosphère, et les radars. Encore ceux-ci ne peuvent-ils sonder que les quelques premières centaines de km de l'atmosphère, et ne donnent-ils aucun accès à la magnétosphère. On peut donc dire que *l'étude de l'environnement spatial ne*

pourrait exister sans les moyens spatiaux. Cette discipline s'est développée dès que des instruments de mesure in situ, portés par les satellites et les sondes interplanétaires ont permis d'étudier quantitativement et pour une large part de découvrir l'environnement spatial. C'est grâce à un compteur Geiger emporté par le premier satellite américain que James van Allen découvrit les ceintures de radiation de notre planète, qui portent son nom.

Aujourd'hui, l'étude des plasmas de l'environnement spatial est toujours un champ de connaissance en pleine activité, porté par d'importants projets spatiaux internationaux.

2.5 La place des sciences de l'univers dans l'ensemble des activités spatiales.

C'est donc un ensemble d'impératifs techniques extrêmement forts qui conduit la communauté scientifique à assurer l'observation de l'univers lointain depuis l'espace, et l'exploration de l'univers plus proche (environnement spatial et système solaire) par des véhicules spatiaux automatiques. L'espace occupe une place *indispensable*, prépondérante même pour beaucoup de sujets, dans ce grand projet de l'humanité d'acquérir une information de plus en plus complète sur les caractéristiques géométriques, dynamiques, énergétiques des objets de l'univers. On ne pourra continuer à développer ce projet, aux racines culturelles et philosophiques si profondes, sans la mise en oeuvre d'importants moyens spatiaux.

Il n'y a pas d'alternative à cette proposition. Son caractère peut sembler abrupt mais rappelons que c'est bien par un programme scientifique d'exploration de l'univers au moyen de satellites qu'a commencé l'activité de l'Agence Spatiale Européenne, alors ESRO (European Space Research Organisation). Néanmoins, il n'y aurait pas de télescopes dans l'espace si la technologie spatiale n'avait rendu cette aventure possible. Nous n'ignorons pas que c'est à partir d'un programme militaire que la NASA, l'Union Soviétique et la France ont construit leurs premiers lanceurs. *Un programme scientifique spatial en sciences de l'univers est donc tributaire d'autres activités spatiales*: la technologie et l'infrastructure spatiales au sens large, en particulier le développement de lanceurs, la construction de télescopes, d'antennes, de cryostats, de détecteurs capables de survivre dans l'espace et adaptés aux différents domaines d'énergie à explorer, enfin la disponibilité d'un système de communication spatiale (avec le sol, et entre satellites éventuellement) qui renvoie aux chercheurs les précieux "bits" d'information collectés en orbite. Cependant le développement des gros moyens de l'infrastructure spatiale n'est pas motivé prioritairement par le programme scientifique. On soulignera simplement ici qu'il y a des échanges de savoir-faire technologique entre le programme scientifique en sciences de l'univers et les autres domaines du spatial, les besoins de la science conduisant souvent à repousser les limites de performances de certains types d'instruments. Ce point sera repris à la section 8.

Qu'en est-il aujourd'hui de la situation du programme de recherche en sciences de l'univers au sein des autres activités spatiales? Le fait que les sciences de l'univers soient tributaires de l'espace, qui leur ouvre des perspectives hors d'atteinte sans la recherche spatiale, pourrait à court terme se transformer en menace pour leur développement, et ce pour des raisons budgétaires. Le problème posé est celui du poids relatif, dans le budget des agences spatiales, des grands programmes de développement de l'infrastructure orbitale et des autres programmes au sein desquels se trouvent le programme scientifique. Les premiers sont résolument tournés vers le thème des vols habités. L'objectif est désormais d'installer l'homme dans des bases spatiales artificielles (objectif déjà atteint pour l'URSS), puis sur la Lune et plus tard sur la planète Mars.

D'une part, cette orientation de la politique spatiale des Etats-Unis et de l'URSS pèse nécessairement sur la réflexion et les projets des responsables européens, qui cherchent à "marquer" les deux grands, tout en reconnaissant que l'Europe part avec retard. D'autre part, le projet de présence de l'homme dans l'espace sur de longues durées cherche lui-même ses justifications majeures. Une illustration limpide de ce point peut se lire dans de récents événements américains. C'est sans doute parce que la Station Spatiale Freedom manque d'une utilité qui ferait l'unanimité de l'opinion que le Congrès américain remet son financement, par ailleurs considérable, en question chaque année. On ne peut qu'être inquiet de l'attitude adoptée en 1991 par la Chambre des Représentants et par le Sénat, qui ont fini par accorder 2 milliards de dollars à la Station pour l'année fiscale 1992, à charge pour la NASA de les prendre sur ses autres programmes, l'enveloppe étant fixée. Le Sénat a proposé qu'une mission d'exploration cométaire (CRAF) soit éliminée et que deux autres missions (Cassini et AXAF, voir Annexe 3) soient différées. La NASA a contre-attaqué durant l'été 1991 et à l'heure présente le résultat des joutes n'est pas connu. Mais l'exemple est trop beau pour qu'on n'en fasse pas un symbole: on imagine ce que deviendrait le budget scientifique de la NASA si la méthode qui vient d'être décrite se généralisait, et si la recherche sur l'univers, ou la recherche sur l'environnement terrestre, étaient considérées comme un ensemble de projets "qui peuvent attendre".

La réflexion conduite dans le présent rapport vise à donner des éléments permettant aux parlementaires et aux décideurs d'apprécier la vitalité du programme scientifique (français et européen) à l'intérieur des activités spatiales, et en conséquence de continuer à favoriser sa croissance sans risque d'écrasement.

Section 3

LES DIFFERENTS TYPES D'INSTRUMENTS EMBARQUES.LES EXPERIENCES REALISEES EN FRANCEENTRE 1980 ET 1990.

Nous présenterons d'abord de façon générale la typologie des instruments nécessaires aux observations spatiales. Puis nous commenterons les réalisations françaises dans la dernière période de dix ans.

3.1. Les instruments qui servent à l'exploration spatiale de l'univers: une vue d'ensemble.

Ces instruments sont conçus en fonction 1) de l'objet que l'on étudie: celui-ci peut être étendu angulairement, ou ponctuel, et surtout il est plus ou moins brillant, 2) de la nature de la quantité que l'on mesure. Selon ce second critère, on peut classer les instruments en:

- collecteurs de signaux non électromagnétiques émis par les astres
- collecteurs du rayonnement électromagnétique émis par les astres
- instruments de mesure in situ de l'environnement spatial
- instruments de géophysique pour l'exploration planétaire.

Par le terme de collecteur, on désigne à la fois une surface que frappent les photons, et qui les concentre en son foyer, et un récepteur placé au foyer et adapté au domaine d'énergie de ces photons. La surface de collecte doit être aussi grande que possible; le récepteur doit, lui, être aussi sensible que possible.

La réalisation de ces instruments, les idées originales qu'ils ont suscitées ou suscitent et le savoir-faire que possèdent les laboratoires ont permis, sur trente ans, d'accumuler dans ces laboratoires une capacité instrumentale tout à fait remarquable et diversifiée. Celle-ci permet aux chercheurs français de proposer en grande sécurité de nouvelles expériences, et d'être très souvent sélectionnés dans les compétitions internationales. Nous traiterons du transfert de ce savoir vers le contexte économique à la section 7.

3.1.1 Les collecteurs de rayons cosmiques

Les rayons cosmiques sont des noyaux d'atomes et des particules élémentaires qui parcourent l'espace à des vitesses proches de celle de la lumière. Leur étude impose des collecteurs placés

dans des satellites en orbite terrestre ou dans des sondes spatiales, car les rayons cosmiques sont détruits dans l'atmosphère de la Terre. A basse énergie leur nature chimique et leur énergie sont mesurées grâce aux charges électriques qu'ils produisent dans un solide semi-conducteur. Lorsque leur énergie est suffisante (1 GeV), ils produisent dans un milieu transparent un rayonnement dit Cerenkov qui permet une mesure très précise de leur vitesse. En présence d'un champ magnétique (aimant supraconducteur embarqué, par exemple) on peut mettre en évidence les isotopes rares et la présence d'anti-matière. Enfin aux énergies encore plus élevées (1000 GeV) l'étude des rayons cosmiques nécessite des calorimètres hadroniques; ces instruments lourds et encombrants sont bien adaptés à une station spatiale ou à une station lunaire.

3.1.2 Les collecteurs de rayonnement électromagnétique

3.1.2.1 Rayonnement gamma de très haute énergie

Les photons de très grande énergie (supérieure à 300 GeV) génèrent, en interagissant avec la matière, un grand nombre de particules chargées. Celles-ci, en se propageant dans les gaz ou les solides transparents, provoquent également du rayonnement Cerenkov. On détecte depuis le sol de "grandes gerbes" qui se déploient dans l'atmosphère.

Par contre, aux énergies un peu plus basses, les photons ne peuvent être détectés par les mêmes techniques et n'atteignent pas le sol. Les détecteurs qu'on voudrait construire sont très volumineux et massifs, car ces particules ne sont pas arrêtées facilement. Avec les calorimètres hadroniques destinés à la capture des rayons cosmiques de grande énergie, ce type de détecteurs, peu sensibles à l'environnement, est un des rares instruments astronomiques qui soit bien adapté aux stations orbitales. Il pourrait aussi être implanté dans une base lunaire.

3.1.2.2 Le domaine des rayons gamma

Les rayons gamma dans la bande d'énergie 100 keV à quelques GeV ne peuvent être détectés que dans l'espace. On utilise des scintillateurs, des compteurs proportionnels à gaz ou des chambres à étincelles. Ces détecteurs ont été mis au point il y a plus de trente ans par les physiciens des particules et ont été placés à bord de nombreux satellites. Les développements récents utilisent la technique dite des "masques aléatoires" qu'on associe à un détecteur assez précis de la position d'arrivée du photon gamma. Ici, les techniques de détection ont été développées par la physique médicale (gamma cameras).

3.1.2.3 Le rayonnement X

Ce domaine d'énergie (0.1 à quelques dizaines de keV) est spécifiquement spatial, car l'atmosphère est totalement opaque à ces photons. Aux énergies inférieures à 10 keV, les rayons X sont réfléchis totalement par la plupart des matériaux, lorsque l'angle d'incidence est très rasant, c'est-à-dire quand les rayons arrivent presque tangentiellement à la surface du miroir. Les télescopes à rayons X à incidence rasante, constitués de couples de miroirs paraboliques et hyperboliques,

ont une excellente résolution angulaire, comparable à celle des meilleurs télescopes en lumière visible.

Les détecteurs modernes sont les mêmes que dans les domaines visible et ultraviolet, mais modifiés pour rester efficaces. Il faut en particulier les amincir, car les photons sont, à ces énergies, très efficacement stoppés par une très petite quantité de matière.

Si l'on veut obtenir des *spectres*, c'est-à-dire disperser le rayonnement afin de séparer finement les photons d'énergie différente, il faut faire appel à des spectromètres à réseau: soit un réseau de miroirs travaillant en incidence rasante, soit un réseau cristallin. Dans les deux cas, l'efficacité est faible, et restreint la spectroscopie à l'étude des sources les plus brillantes.

Une nouvelle technique est apparue il y a quelques années: les *bolomètres à très basse température* (100 milliKelvin). Un bolomètre est un très petit thermomètre qui permet de mesurer la quantité d'énergie qui y est déposée, même quand celle-ci est très faible. De tels systèmes sont utilisés depuis longtemps dans le domaine infrarouge, mais des progrès considérables ont été réalisés récemment sur les bolomètres destinés à la détection des rayons X. En Europe, les laboratoires français soutenus par le CNES poursuivent une ligne de développement indépendante sur ces détecteurs.

On verra (annexe 3) que le développement des détecteurs X a rendu possible une multiplication des projets spatiaux dans ce domaine, ce qui à la fois témoigne de la vivacité de la recherche, mais aussi pose clairement un problème que nous rencontrerons, celui de la duplication des missions (voir section 6.1.2).

3.1.2.4 Le rayonnement ultraviolet

Dans ce domaine qui s'étend d'environ 10nm à 300nm ($1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$), les *télescopes* sont ceux de l'optique conventionnelle en ce qui concerne leur dessin optique, mais les revêtements doivent être réfléchissants à ces longueurs d'onde. Il faut, en-dessous de 120 nm, recouvrir la surface du miroir qui est construit en aluminium ou en béryllium, par du fluorure de magnésium ou par de l'or évaporé, afin que son pouvoir réfléchissant dans l'ultraviolet soit acceptable.

C'est la grande difficulté de l'observation dans l'ultraviolet lointain (de 10 à 120 nm) que de disposer de pièces optiques (réseaux, filtres, polarimètres ...) qui soient transparentes ou réfléchissantes dans de bonnes conditions.

Les *photomètres*, qui recueillent les photons au travers de filtres, les *caméras* qui fournissent des images des objets et les *spectrographes* qui dispersent la lumière afin de séparer finement les photons d'énergie différente (on les qualifie par leur pouvoir de résolution *spectrale*), utilisent tous des détecteurs de lumière fondés sur l'effet photoélectrique, grâce auquel on convertit des photons en électrons. Ces détecteurs sont des photomultiplicateurs, des galettes de microcanaux, des

caméras électroniques, des dispositifs à comptage de photons... Parmi ces dispositifs à effet photoélectrique, on utilise des systèmes qui réimagent les photons sur des diodes à silicium; c'est ainsi que fonctionnent par exemple les détecteurs digicons qui travaillent sur le Hubble Space Telescope (HST); on peut aussi intensifier le signal reçu et le refocaliser après conversion UV vers visible sur un tube de télévision.

Le rendement quantique, défini comme le rapport entre le nombre moyen de photoélectrons produits et le nombre moyen de photons incidents pendant un même intervalle de temps, est un critère sévère de qualité de ce détecteur. Il est dans l'ultraviolet de 40 à 50% au maximum.

3.1.2.5 Le rayonnement visible

Dans ce domaine qui s'étend de 300 nm à 1000 nm (1000 nm = 1 μm = 10^{-6} m), on utilise, comme dans l'ultraviolet, des télescopes suivis de photomètres, de caméras ou de spectrographes. Les détecteurs sont couramment des CCD (charge coupled device), c'est-à-dire des détecteurs utilisant l'effet d'accumulation-vidage de charges dans un matériau semiconducteur tel le silicium. Le rendement UV des CCD n'est pas très bon, même après des traitements idoines (il ne dépasse pas 20%) mais les CCD deviennent excellents dans le rouge et le proche infrarouge (IR), où leur rendement quantique atteint 80 %. Ces détecteurs se présentent comme des barrettes linéaires (une série de pixels⁽¹⁾ en ligne), ils sont alors adaptés à la spectroscopie, mais ils peuvent aussi être groupés selon des "matrices", qui atteignent aujourd'hui commercialement 2048 x 2048 pixels. Ces matrices permettent de faire des images utilisant au mieux le champ et le pouvoir de résolution *angulaire* des télescopes.

Un instrument original mérite d'être signalé, d'autant que l'idée en revient à un astronome français, P. Lacroute. C'est l'instrument qui se trouve dans le plan focal du *télescope astrométrique Hipparcos*. Ce satellite, dont la mission consiste à mesurer les positions, mouvements propres et parallaxes⁽²⁾ de 120000 étoiles, est une satellite défilant, c'est-à-dire que pour observer répétitivement un grand nombre d'étoiles, ce qui est nécessaire à l'accomplissement de la mission, sa direction de visée balaie le ciel selon des grands cercles. Par ailleurs, le télescope peut former simultanément des images de deux champs stellaires séparés par un angle aussi grand que 58° sur le ciel. L'image de ces champs passe donc devant la grille focale, qui enregistre des signaux modulés, lesquels sont distincts d'un couple de champs stellaires à un autre: on

1 Un pixel est un élément de surface d'un détecteur. C'est lui qui fixe la "définition" ou la résolution du détecteur. Un écran de télévision standard contient 625 "lignes" d'environ 600 pixels.

2 Les étoiles sont animées de mouvements relatifs très petits dans la Galaxie: le *mouvement propre* d'une étoile est un angle qui décrit son déplacement séculaire sur la sphère céleste. La *parallaxe* est l'angle sous lequel de l'étoile on voit le demi-diamètre de l'orbite de la Terre. Mesurer la parallaxe revient à mesurer la *distance* de l'étoile.

reconnaît ainsi, lors du traitement des données, quels sont ces champs, de plus on peut les raccorder l'un à l'autre grâce à la taille de l'angle de 58° ; ensuite on peut calculer les paramètres astrométriques recherchés. HIPPARCOS les fournira avec une précision de 2.10^{-3} secondes d'arc.

Dans le domaine visible, mais aussi dans l'infrarouge, le submillimétrique et le domaine radio, on peut utiliser, dans l'espace comme au sol, des *interféromètres*. Ces instruments ont pour but d'augmenter le pouvoir de résolution *angulaire* des télescopes au-delà de leur valeur théorique, qui est le plus petit angle qu'un télescope peut distinguer. Ce pouvoir de résolution angulaire est égal au rapport de la longueur d'onde dans laquelle on observe par le diamètre D du télescope. Nous rappelons (voir section 2.2) que c'est un des atouts de l'observation spatiale d'atteindre ce pouvoir de résolution dans l'espace sans problème, tandis qu'au sol, on doit utiliser la technique d'*optique adaptative*, qui est délicate, numériquement lourde, et opérationnelle aujourd'hui dans l'infrarouge seulement. Le principe des interféromètres consiste à combiner la lumière reçue par deux télescopes séparés par une distance d , de telle sorte que le pouvoir de résolution devient inversement proportionnel à d , qui peut être bien plus grand que le diamètre du télescope. Si l'on combine la lumière de plusieurs télescopes, d'une part on augmente la sensibilité de l'instrument, d'autre part on peut non seulement séparer des détails angulaires en proportion inverse de la plus grande distance séparant deux des télescopes de l'ensemble, mais encore on peut reconstruire l'image de certains détails de l'objet observé. L'interférométrie est une spécialité instrumentale extrêmement délicate. On n'a pas encore fait voler d'interféromètre dans l'espace, bien que des projets existent depuis plus de dix ans, en particulier en France. L'enjeu de l'interférométrie dans l'espace est considérable, on peut imaginer utiliser des "bases" de 1 km ou plus, et atteindre ainsi des séparations angulaires de 10^{-4} secondes d'arc dans le visible ($2 \cdot 10^{-2}$ en théorie pour un télescope de 5 m au sol). Si l'on travaille dans le domaine millimétrique, on multiplie encore par 2000 le gain réalisé (par rapport au visible).

3.1.2.6 Le rayonnement infrarouge

Le rayonnement infrarouge est celui dont la longueur d'onde est supérieure à celle de la lumière visible. Tout corps chaud rayonne dans l'infrarouge, et pour des objets à la température ordinaire (comme l'atmosphère de la Terre et les télescopes), ce rayonnement "tombe" dans l'infrarouge. Pour cette raison, on l'appelle souvent infrarouge thermique.

Cette propriété explique que l'infrarouge soit un des champs privilégiés des militaires (vision nocturne, détection des points assez chauds tels que tuyères de fusée ou d'avion etc...). Il en résulte des problèmes spécifiques pour le développement des instruments. En effet, les progrès des détecteurs infrarouges depuis vingt ans ont été considérables, sous l'impulsion des programmes militaires. Mais ces détecteurs sont souvent tenus secrets et leur accès pour les astronomes n'est pas aisé. De plus, les besoins des astronomes ne

coïncident pas totalement avec ceux des militaires. Le ciel infrarouge vu depuis l'espace est beaucoup plus froid que n'importe quel environnement terrestre. Les astronomes français se sont donc efforcés de pousser la sensibilité des détecteurs que les militaires ont pu leur fournir, en particulier dans le cadre du programme *Infrared Satellite Observatory (ISO)*.

L'émission propre du télescope devenant dans ce domaine une limitation essentielle à l'observation de sources célestes faibles, on peut, en allant dans l'espace, s'affranchir simultanément de deux contraintes: d'une part on se débarrasse de l'atmosphère de la Terre, qui est opaque dans la plus grande partie du domaine infrarouge (et submillimétrique), d'autre part on peut aussi éliminer l'émission thermique du télescope en plaçant celui-ci dans un cryostat à hélium liquide pour le refroidir à une très basse température (2.5 Kelvin). Les techniques à mettre en oeuvre sont difficiles, c'est pourquoi ce domaine de longueur d'onde n'a été proprement exploré (après les travaux de pionnier effectués dans les années 70 à partir de ballons et d'avions) que dans les années 80 par les satellites IRAS (InfraRed Astronomical Satellite, collaboration Etats-Unis, Pays-Bas, Grande Bretagne) et COBE (COsmic Background Explorer, Etats-Unis, voir annexe 3.1). A la suite de ces phases d'exploration pilotées par la NASA, le premier observatoire spatial infrarouge, ISO, sera lancé par l'ESA en 1993.

Nous verrons à la section 7.2 que les développements technologiques requis par la recherche astronomique dans l'infrarouge ont des applications importantes.

3.1.2.7 Le rayonnement submillimétrique (0.1 à 1mm)
 Refroidir le télescope en le plaçant dans un cryostat à hélium liquide a une limitation majeure: on ne peut y mettre de grands télescopes (ISO a un télescope d'ouverture 60 cm, le projet SIRTIF de la NASA, voir annexe 3.2, qui ne sera pas lancé avant l'an 2000, une ouverture de 80 cm). Comme le pouvoir de résolution angulaire d'un télescope croît avec sa taille et décroît avec la longueur d'onde, les petits télescopes souffrent de "myopie" si on cherche à les utiliser dans l'infrarouge lointain ou le submillimétrique. L'objectif est donc d'essayer de construire de très grands télescopes spatiaux (plusieurs mètres de diamètre) qu'on protège soigneusement des rayonnements solaire et terrestre et qui se refroidissent *passivement* quand ils sont tournés vers le ciel.

Le poids étant une contrainte très forte dans le domaine spatial, on abandonne les télescopes de type optique, en verre, qui sont trop lourds, pour se tourner vers des antennes dérivées des antennes radio; mais ces antennes doivent être beaucoup plus précises que les antennes radio puisqu'on veut les faire travailler à des longueurs d'onde 100 fois plus faibles.

De même les détecteurs dans ce domaine de longueur d'onde sont à la frontière entre les détecteurs infrarouges et ceux qui sont utilisés dans le domaine radio. Télescopes ou détecteurs, il faut extrapoler les techniques hors de leur domaine

d'application habituel. L'ensemble de ces raisons fait du domaine submillimétrique la dernière grande "fenêtre" du spectre électromagnétique encore très peu explorée et très peu exploitée par les astronomes.

La nouveauté des développements technologiques conditionne certes la faisabilité des projets, mais ici encore la technologie n'est pas au seul usage astronomique (voir section 7.2).

3.1.2.8 Le rayonnement radio

Les ondes radio venant de l'espace lointain peuvent se propager dans l'atmosphère de la Terre dans une très large gamme de longueurs d'onde (1 mm à 30 m). C'est pourquoi la radioastronomie s'est développée à la suite de l'astronomie visible, puisqu'elle pouvait recourir à des instruments *au sol*. L'utilité de l'espace dans ce domaine est double: a) les ondes de très basses fréquences (longueur d'onde supérieure à 30 m) sont arrêtées par l'atmosphère terrestre, on peut les observer de l'espace mais avec des antennes très grandes. Ces dernières font partie des instruments simples qui pourraient profiter d'une base installée sur la Lune; b) à plus haute fréquence, les astronomes ont développé l'*interférométrie à longue base* (VLBI) pour obtenir, malgré la grande longueur d'onde, un excellent pouvoir de résolution (quelques millièmes de secondes d'arc). Pour ce faire, et si l'on travaille au sol, on observe un même objet avec des antennes pouvant être séparées par plusieurs milliers de km. Cette séparation étant limitée par la taille de la Terre, une autre façon de l'augmenter est de combiner des antennes terrestres avec une antenne dans l'espace. On rencontrera dans la suite (annexe 3) plusieurs projets de VLBI spatial.

3.1.3 Les instruments de mesure in situ de l'environnement spatial

Le "vide" spatial que traversent satellites et sondes interplanétaires est en fait constitué d'un certain nombre d'objets physiques:

- Une population de poussières, poussières cosmiques formées dans le milieu interstellaire, poussières cométaires laissées le long de leur orbite par les comètes après chacun de leur passage près du Soleil, poussières planétaires produites en particulier par l'impact des météorites sur les surfaces solides des satellites et des anneaux des planètes géantes.
- Une population de particules de très haute énergie, généralement présente sous forme ionisée. Il s'agit de rayons cosmiques, produits par les explosions des supernovae et les éruptions solaires, dont l'énergie peut être très supérieure au milliard d'électronvolt (GeV). Il s'agit aussi des particules des ceintures de radiation planétaires (les ceintures de Van Allen, dans le cas de la Terre), qui sont piégées dans le champ magnétique des planètes et dont l'énergie dépasse le million d'électronvolt (MeV).
- Les gaz ionisés et neutres ambiants (même dans le "vide" interplanétaire, on trouve encore une particule de gaz par cm³

ou plus). La population d'ions et d'électrons de basse énergie de ces gaz forme ce qu'on appelle le plasma spatial.

- Le champ électromagnétique local, qui est produit localement ou à distance par les mouvements des particules chargées du plasma spatial, et qui à son tour modifie les mouvements de ces particules.

Pour établir la morphologie et comprendre le fonctionnement physique de ce milieu qu'est l'environnement spatial, les laboratoires de recherche ont, depuis les années 60, développé des capteurs de plus en plus performants. Il y a différents types de capteurs adaptés à chacune des composantes de l'environnement spatial.

Les détecteurs et collecteurs de poussières sont généralement constitués d'une combinaison de feuilles ultra-minces (en métal ou en carbone) destinées à détecter une particule de taille micronique ou submicronique qui les traverse, et d'un matériau absorbant situé derrière la feuille permettant d'identifier la nature de la particule absorbée. Lorsque ces collecteurs peuvent être ramenés sur terre (ce fut le cas des collecteurs placés par la France à l'extérieur de la station spatiale MIR), on pratique au laboratoire l'analyse chimique, isotopique et éventuellement minéralogique des particules collectées. Il suffit d'exposer les collecteurs au vide spatial dans des périodes au cours desquelles la Terre traverse des essaims de météorites pour pouvoir ainsi ramener sur terre un authentique échantillon de matière cométaire. Lorsque les détecteurs/collecteurs ne sont pas destinés à être récupérés, il faut pratiquer sur place l'analyse souhaitée. C'est ce que l'on fit à bord de la sonde européenne GIOTTO lors de sa rencontre avec la comète de Halley le 13 mars 1986.

Les analyseurs de particules chargées fonctionnent sur le principe de la déflexion, par des champs électrostatiques ou magnétiques, des particules entrant dans l'analyseur. La courbure de la trajectoire étant fonction du rapport entre l'énergie et la charge de chaque particule incidente, on peut, en plaçant un détecteur à un endroit précis, mesurer le nombre de particules correspondant à un rapport énergie/charge donné. Puis il suffit de faire varier les champs défecteurs appliqués (ou de placer une batterie de détecteurs en des points différents) pour mesurer le nombre de particules correspondant à une valeur différente de ce rapport. Pour échantillonner toutes les particules présentes, il faut de plus que la direction d'entrée de l'analyseur puisse balayer toutes les directions de l'espace.

Les détecteurs de particules les plus performants permettent aujourd'hui de mesurer en quelques dixièmes de secondes les flux de particules dans toutes les directions de l'espace et sur toute la gamme d'énergie choisie.

Depuis une quinzaine d'années sont apparus des détecteurs capables de mesurer, en plus de l'énergie et de la direction d'arrivée, la masse atomique ou moléculaire des ions détectés. Ils donnent accès à la composition chimique du vent solaire et des magnétosphères et ionosphères planétaires.

Pour certaines variétés de ces analyseurs, la priorité est donnée à la mesure fine de la composition au détriment de l'analyse en énergie. On parle alors de spectromètres de masse. Lorsqu'ils sont précédés d'une chambre d'ionisation, les spectromètres de masse fournissent l'analyse du plasma et des gaz neutres des hautes atmosphères planétaires avec le même instrument. Les spectromètres de masse embarqués sont évidemment des versions très réduites en taille des appareils des laboratoires au sol, et pèsent au plus quelques kilos.

La mesure des champs électriques et magnétiques ambiants fait appel à des instruments que l'on peut classer selon la composante (électrique ou magnétique) du champ à laquelle ils sont sensibles, et selon la gamme de fréquences qu'ils sont capables d'analyser. Ils sont constitués par un capteur, une chaîne électronique qui met en forme les signaux captés en vue de leur analyse, et d'un analyseur. Les capteurs magnétiques sont différents selon qu'on s'intéresse à la mesure du champ magnétique statique et de très basse fréquence (on utilise alors des magnétomètres à vanne de flux) ou selon qu'on cherche à mesurer les fluctuations du champ (on utilise alors des magnétomètres à noyau plongeur, dont la sensibilité se situe aux fréquences supérieures à quelques dizaines de Hz). Les capteurs électriques sont de longues antennes linéaires, constituées par des mâts ou même des fils métalliques qu'on déploie une fois le satellite ou la sonde interplanétaire dans l'espace. Le signal électrique livré par les capteurs est filtré et souvent converti vers une gamme de fréquences différente choisie pour faciliter l'analyse. Les analyseurs permettent alors soit d'échantillonner et de digitaliser le signal pour l'envoyer directement vers la Terre (on dit alors qu'on transmet la forme d'onde), soit d'en faire sur place l'analyse spectrale. Dès que le signal occupe une bande spectrale large (en pratique au-delà de quelques dizaines de kHz) les débits de transmission de données deviennent insuffisants pour retransmettre les formes d'onde elles-mêmes à terre, et on passe par l'analyse spectrale non seulement pour des raisons d'analyse scientifique, mais aussi pour comprimer le débit des données à transmettre.

Les signaux électromagnétiques auxquels on s'intéresse sont soit les émissions radio naturelles des planètes, dont on capte le rayonnement à distance, soit les ondes électromagnétiques produites et propagées directement dans le plasma ambiant. Leurs fréquences vont de zéro à quelques dizaines de MHz. Le champ électromagnétique ayant six composantes (trois pour le vecteur champ électrique, trois pour le vecteur champ magnétique), on cherche à déterminer le spectre de fréquence de chacune des composantes, ainsi que les relations de phase existant pour chaque fréquence entre toutes les composantes mesurées. C'est pourquoi l'analyse spectrale par des batteries de filtres étroits cède le pas de plus en plus à des polycorrélateurs numériques, grâce auxquels on réalise simultanément et avec souplesse l'ensemble de ces fonctions.

3.1.4 Les instruments de géophysique pour l'exploration planétaire

De même que les orbiteurs mis à poste autour des planètes utilisent pour l'étude de celles-ci toute la panoplie d'instruments de la géophysique spatiale et de la télédétection de la surface et de l'atmosphère terrestre, de même la perspective de l'exploration au sol des planètes ouvre la voie à l'emprunt des instruments et des méthodes de la géologie, de la géochimie et de la géophysique terrestres.

L'ensemble des instruments et méthodes utilisés étant très vaste et divers, on ne peut en faire ici une énumération technique détaillée. On a donc choisi de plutôt présenter ce que peut être la stratégie globale d'exploration d'une planète, telle que la communauté scientifique et les agences spatiales la conçoivent pour l'exploration d'objets tels que la Lune, Mars, ou le satellite Titan de Saturne à un moindre titre.

L'exploration d'une planète tellurique (pourvue d'une surface solide utilisable pour y poser ou y déplacer des instruments) s'appuie aujourd'hui sur trois types d'instruments:

- des véhicules orbitaux (orbiters), auxquels on confie tous les instruments de télédétection
- des véhicules mobiles au sol ou dans l'atmosphère, véhicules robotiques tels que ballons plafonnants, "rovers" qui permettent de déplacer sur des distances plus ou moins longues (100 km à plusieurs milliers de km) des instruments de mesure, des moyens de collecte d'échantillons (lorsque les missions automatiques autorisent le retour de ces échantillons pour analyse en laboratoire)
- enfin des réseaux de stations au sol, destinées à une saisie continue, en un certain nombre de points fixes, de paramètres météorologiques et géophysiques.

A bord des véhicules orbitaux, on trouve des instruments de télédétection de l'atmosphère (spectrophotomètres visible, IR, UV pour l'analyse des émissions naturelles des gaz atmosphériques, ou de la diffusion, ou de l'absorption par ces gaz de la lumière en provenance du sol, du Soleil, des étoiles), et de télédétection au sol. Les spectroimageurs dans l'infrarouge proche mesurent par exemple ce qu'on appelle le spectre de réflectance des minéraux de surface, c'est-à-dire le spectre de la lumière solaire réfléchi. Ils fournissent des informations sur la composition minéralogique des matériaux de surface. Les spectromètres gamma donnent une information complémentaire sur la composition chimique superficielle. Enfin les caméras et radars imageurs fournissent les moyens d'obtenir la carte du relief de la surface.

En plus des instruments de télédétection, il faut citer les instruments et méthodes de la *géodésie spatiale*, qui sont un domaine d'excellence des français. Citons prioritairement deux techniques:

- L'analyse des perturbations des trajectoires à partir des données de télémesure conduit à une information sur le champ de

gravité des planètes, qui est lui-même une image de la répartition des masses dans leur intérieur. C'est donc une des méthodes les plus importantes, avec la sismologie, pour étudier leur structure interne.

- L'altimétrie satellitaire (qui est au centre de la mission spatiale d'observation de l'océan terrestre TOPEX-POSEIDON) est également d'un grand intérêt pour l'exploration des planètes. Réalisée avec un radar ou avec un laser, elle donne la mesure absolue de l'altitude du relief le long de la trace au sol de l'orbite du satellite. C'est un ingrédient de premier ordre pour l'établissement de cartes topographiques précises des surfaces planétaires.

A bord des véhicules au sol (rovers), on peut placer différents instruments concernant:

- les mesures des champs magnétique et de gravité de la planète
- le sondage géophysique du sous-sol et des parties externes du solide planétaire. C'est ainsi qu'est prévu à bord du ballon développé par le CNES pour la mission soviétique d'exploration de Mars un radar à basse fréquence destiné à détecter la présence de couches d'eau et de glace dans le sous-sol.

Surtout, et c'est sans doute là la spécificité la plus grande d'un véhicule mobile, ce dernier peut être équipé en un véritable laboratoire mobile de terrain, capable de choisir, de pré-analyser et de prélever des échantillons de roches et de sol, avant d'en faire à bord une analyse minéralogique et géochimique précise. Il peut aussi, dans le contexte d'une mission plus ambitieuse (mais plus lointaine dans le temps) de retour d'échantillons vers la Terre, conditionner les échantillons prélevés le long d'un itinéraire sur la planète, puis revenir les placer à bord de la fusée de retour.

Enfin, le déploiement à l'échelle globale planétaire de réseaux de stations fixes est un moyen puissant d'étude d'une planète. Le réseau peut être consacré à la météorologie, pour étudier les climats et la circulation atmosphérique. Une des utilisations les plus importantes des réseaux fixes sera certainement la sismologie. Les signaux captés par un ensemble de sismomètres renseigneront non seulement sur l'activité propre de planètes comme la Lune ou Mars, mais aussi sur leur structure interne, puisque les signaux sismiques naturels sont avant tout des sources permettant d'"éclairer" l'intérieur d'un corps planétaire, et puisque par l'analyse des signaux en provenance d'un même événement mais captés en des points très éloignés on reconstitue la structure en couches concentriques de l'intérieur de la planète, ainsi parfois que l'épaisseur de la croûte et de la lithosphère sous différentes régions.

3.2 Les réalisations françaises depuis 1980.

L'annexe 2 contient une liste des instruments spatiaux qui ont été construits dans les laboratoires français et qui ont volé au cours des dix dernières années. Ces laboratoires, dont la liste est donnée en annexe 1, seront présentés à la section 8. On a considéré les expériences lancées en satellite, sur Spacelab, ou sur des sondes interplanétaires. Bien entendu,

1980 ne marque pas le début de la recherche spatiale française! Les lecteurs intéressés à revenir en arrière pourront consulter les rapports d'activité du CNES.

La période qui a été choisie ici pour donner un aperçu rétrospectif de l'activité instrumentale de ces laboratoires correspond à un peu plus que le temps écoulé entre les *séminaires de prospective du CNES* n et n+2. Ces séminaires, qui ont lieu tous les quatre ans, rassemblent un vaste ensemble de la communauté scientifique. Celle-ci y analyse la conjoncture de la recherche spatiale et propose ses projets pour les années à venir. Le CNES fait ainsi vivre un excellent outil de connaissance de la situation réelle des affaires scientifiques, et s'assure qu'il n'engage aucune expérience dont le bien fondé ne paraisse fort, non seulement à l'intérieur de la sous-discipline qui la propose, mais aussi selon le jugement des autres disciplines des sciences de l'univers.

Les expériences figurant à l'annexe 2 ont été réalisées dans un cadre de collaboration bilatérale ou comme participation d'instruments pour les grands programmes de l'ESA. On a indiqué pour chaque expérience a) le ou les laboratoires participants, b) le coût pour le CNES en *Francs courants* de la fabrication de l'expérience, hors frais de personnel pour les expériences construites dans les laboratoires (sauf pour les personnels contractuels, voir section 8) mais incluant les frais de personnel pour les expériences construites dans l'industrie, c) les objectifs scientifiques succinctement formulés, d) dans une colonne "Commentaires", une appréciation qualitative sur le succès de l'expérience. Dans la plupart des cas, le coût des logiciels de traitement de données développés au CNES et celui des essais des expériences avant le vol, essais pris en charge par la filiale du CNES Intespace, ne sont pas inclus. Ces frais se montent à environ 15 MF par an pour les logiciels et 10 MF par an pour les essais.

Il convient d'ajouter aux expériences rassemblées à l'annexe 2 la participation française aux satellites HIPPARCOS et Hubble Space Telescope, qu'on trouve à l'annexe 3.1, ainsi qu'au satellite d'observation en rayons X EXOSAT.

- le satellite d'astrométrie HIPPARCOS de l'ESA, lancé en août 1989, doit établir en 3 ans un catalogue stellaire plus précis, plus homogène et plus complet que ceux que des générations d'astronomes ont fabriqués à l'aide de minutieuses observations au sol (voir aussi section 3.1.2.5). Le satellite et l'instrumentation étaient totalement pris en charge par l'ESA. La réduction des données de même que la réalisation du catalogue des étoiles à observer (catalogue d'"entrée") étaient à la charge de consortia sélectionnés par l'ESA sur appels d'offres. Le consortium du catalogue "d'entrée" est sous responsabilité française, ainsi que l'un des deux consortia de traitement des données obtenues par le satellite. Le coût pour la France de la participation à Hipparcos se monte à 453 MF (contribution à l'ESA, voir annexe 5) + 25 MF de coûts directs pour le CNES, soit 478 MF (hors salaires des chercheurs et ITA français).

- le Hubble Space Telescope (HST), lancé en avril 1990, comporte une participation française à travers la part de l'ESA dans cette entreprise NASA/ESA (85% pour la NASA, 15% pour l'ESA). La France a donc payé au titre du programme obligatoire de l'ESA environ 3% du coût de ce télescope, ce que nous estimons se monter à 340 MF (voir aussi section 4.2). La France a de plus participé à la construction de l'instrument du HST confié à l'Europe (Faint Object Camera), dont la maîtrise d'oeuvre est revenue à MATRA et Dornier. Le Laboratoire d'Astronomie Spatiale (LAS) de Marseille a sous-contracté pour MATRA.

- le satellite EXOSAT, construit sous la responsabilité de l'ESA, a été lancé en 1983 et a cessé de fonctionner en 1986. La France y a participé uniquement pour sa contribution obligatoire (258 MF, voir annexe 5). Le fait de ne pas avoir participé à la construction d'instruments pour EXOSAT a mis, par la suite, les chercheurs français utilisateurs en difficulté, car ils étaient moins bien informés que leurs partenaires sur l'étalonnage et les performances de ces instruments.

Plusieurs faits saillants ressortent des tableaux de l'annexe 2:

- un grand nombre des expériences est réalisé en collaboration entre plusieurs laboratoires. De la même manière les missions sont aujourd'hui toujours réalisées entre les laboratoires de plusieurs pays. *La recherche spatiale est un des grands lieux de la coopération scientifique.*

- *la coopération avec l'Union Soviétique* a été un élément décisif du développement du programme spatial français. Il suffit d'examiner les tableaux pour juger que la politique soviétique a permis à la France (et à un moindre degré à d'autres pays européens) de participer à de grandes missions, et aussi à des vols habités (deux fois, 1982, 1988), sans supporter une fraction appréciable du coût de ces missions. Ceci a rendu le rapport retour/prix extrêmement avantageux pour la France, spécialement dans les programmes d'exploration du système solaire, et ceci a par conséquent donné à la France la possibilité de mettre ses moyens sur d'autres aspects du programme scientifique. Cette politique ne semble pas devoir continuer dans les mêmes termes. Nous en examinerons les conséquences à la section 6.1.3.

- quant aux *objectifs*, tous les oeufs n'ont pas été mis dans le même panier: le programme scientifique en sciences de l'univers a été dirigé vers de nombreux problèmes, dont beaucoup étaient exploratoires. On remarque cependant quelques spécialités françaises dans les dix dernières années, comme l'imagerie UV à grand champ, l'étude des sursauts gamma, l'étude de la magnétosphère terrestre.

- le retour en termes de *publications* dans des revues scientifiques reste à faire pour les expériences présentées à l'annexe 2, l'établissement de la valeur relative des publications étant une oeuvre délicate. Lorsque le tableau

indique "succès scientifique", l'expérience peut avoir donné lieu à un petit nombre de publications beaucoup citées et considérées comme fondamentales, ou à un grand nombre de publications parce que le nombre d'objets étudiés grâce à l'expérience était grand.

L'annexe 2 ne fait pas justice à la totalité du programme scientifique en sciences de l'univers, puisqu'elle ne rassemble que les expériences ayant volé en satellite, sur Spacelab, ou sur des sondes interplanétaires. Une particularité intéressante du programme français est qu'il dispose de *ballons*. En terme de budget (voir annexe 6), la France consacre environ 12% des ressources "sciences de l'univers" au programme ballons. La France est le pays membre de l'ESA dont le programme ballons est le plus important. De très beaux résultats ont été obtenus, dans l'étude des sources gamma, dans la spectroscopie solaire à haute résolution spectrale dans l'UV observable à 40 km d'altitude (de 200 à 300 nm), dans l'observation de l'émission du plan galactique dans l'infrarouge lointain, et dans l'observation infrarouge proche de l'émission de molécules aromatiques.

Section 4

MISSIONS SPATIALES EN OPERATION, MISSIONSAPPROUVEES. MISSIONS A L'ETUDE.UTILITE DES STATIONS SPATIALES POUR LES SCIENCES DE L'UNIVERS.L'OBSERVATOIRE LUNE.

4.1 De l'intérêt des observatoires en orbite

L'annexe 3 rassemble une vue à l'échelle mondiale des sondes interplanétaires et des observatoires spatiaux qui sont soit en fonctionnement (annexe 3.1), soit approuvés et en construction (annexe 3.2), soit à l'étude dans les agences spatiales ou simplement à l'état de projet (annexe 3.3). Nous avons ici restreint le champ aux *observatoires spatiaux*, c'est-à-dire aux satellites sur lesquels on embarque en général un ensemble d'instruments répondant à une problématique scientifique, et aux *sondes interplanétaires*. Nous n'avons pas listé les "charges utiles", c'est-à-dire les instruments individuels emportés par exemple par la navette spatiale; nous n'avons pas non plus inclus les expériences en projet pour les stations spatiales (Freedom, Etats-Unis; MIR, URSS; la station spatiale du programme Columbus de l'ESA), une section leur sera consacrée plus loin (section 4.5).

Parmi les observatoires spatiaux, on peut encore distinguer:

- ceux qui sont ouverts à la communauté scientifique large, comme le sont les grands observatoires au sol, à condition que le chercheur qui veut utiliser un tel observatoire présente un projet et entre dans un processus de sélection en général international et souvent sévère;
- ceux qui emportent des instruments assez spécialisés: c'est le cas des instruments d'étude du Soleil, qui sont adaptés à l'observation de cet objet, et non à celle de toutes les étoiles (exemple: le satellite SOHO).

On a constaté dans les dernières vingt années une modification considérable de point de vue et de pratique des astronomes, à cause de l'*existence des observatoires spatiaux ouverts à tous*. Un observatoire UV est en fonctionnement depuis 1978 (le satellite IUE, bâti par la NASA, l'ESA et la Grande-Bretagne), ce qui est extrêmement remarquable. De même plusieurs observatoires ont été en opération dans le domaine X, de durée de vie plus courte (Einstein bâti par la NASA, EXOSAT bâti par l'ESA). De plus, des satellites plus petits ont effectué des explorations systématiques de tout le ciel dans différents domaines de longueur d'onde et ont fourni (en général 1 an après la fin de la mission) des bases de données homogènes.

catalogues ou images, mises à la disposition de l'ensemble de la communauté astronomique. On peut citer Uhuru, SAS-3 dans le domaine X, SAS-2 et COS-B dans le domaine des rayons gamma, et IRAS, dont nous avons déjà parlé à la section 3.1.2.6., qui a étudié très systématiquement le ciel infrarouge durant ses 11 mois de vie. Dans le futur tout proche, d'autres observatoires prennent ou prendront la suite (voir annexe 3.1). Ces possibilités ont amené tous les astronomes, même n'appartenant pas aux laboratoires spatiaux, à intégrer dans leurs outils de recherche l'observation des astres dans divers domaines de longueur d'onde simultanément. L'étude de l'univers en a été profondément enrichie et les savoirs bousculés. Qui eut prédit que certaines galaxies rayonnent 95% de leur énergie dans le domaine infrarouge? ou que la plupart des étoiles rayonnent dans la gamme X?

Le rendement de ces observatoires orbitaux peut se mesurer en termes de publications scientifiques. Dans le cas de ces observatoires multivalents et accessibles à tous, l'impact sur l'avancée de la science est imputable non seulement aux constructeurs des expériences à bord, mais à la bonne utilisation qu'en font tous les observateurs. C'est ainsi que le satellite IUE est une des principales sources de données pour l'ensemble de la communauté astronomique, et qu'il a permis, à la date de juin 1991, de produire 2023 publications scientifiques dans des revues à lecteurs, parmi lesquelles 900 ont pour auteurs des astronomes à qui a été attribué du temps "européen" sur ce satellite ESA/NASA. De plus ont été soutenues en Europe 80 thèses fondées à plus de 50% sur des résultats du satellite IUE, l'estimation pour les Etats-Unis étant d'environ 100 dans la même période. C'est ainsi que le satellite EXOSAT, purement ESA, a conduit, à la date de janvier 1991, à la publication de 295 articles originaux dans des revues à lecteurs. Le satellite astrométrique HIPPARCOS (ESA), lui, mettra à disposition de la communauté mondiale des catalogues de données homogènes sur les positions des étoiles. Ces catalogues sont de véritables outils de base, qui élargiront de façon décisive le corpus sur lequel l'astronomie repose.

Les français ont joué un rôle très actif dans la mise au point ou l'utilisation de ces missions.

4.2 Les observatoires spatiaux et sondes interplanétaires en fonctionnement. Plans à long terme des agences.

L'annexe 3.1 montre quels sont les satellites et sondes scientifiques en fonctionnement (au 1er septembre 1991). Les observatoires d'astronomie sont rangés par domaine de longueur d'onde, ceux qui se rapportent au Soleil, au système solaire et à la géophysique externe sont rangés par objet d'étude. On y voit immédiatement quelles sont les grandes puissances à l'oeuvre à travers leurs agences spatiales: NASA, Europe rassemblée dans l'ESA, URSS, Japon. Ce sont elles qui possèdent les lanceurs nécessaires à la mise en orbite des satellites. On note aussi les collaborations bilatérales entre ces grandes agences et certains des pays très développés quant à leur recherche spatiale, ce qui est le cas de la France.

A un moment donné, les observatoires spatiaux ne couvrent pas tous les domaines de longueur d'onde, et ils n'explorent pas tous les objets possibles dans le système solaire. Ceci est bien naturel, car les grandes agences suivent un plan à long terme, qu'elles veulent équilibré entre les disciplines et qui s'appuie sur les idées apportées par la communauté scientifique. Ce plan est publié, s'agissant de la NASA et de l'ESA. Pour l'URSS et le Japon, les relations scientifiques avec ces pays se sont ouvertes, l'Europe est informée sur leurs projets spatiaux. De plus les missions spatiales devenant de plus en plus complexes et coûteuses, et se réalisant presque toujours en collaboration internationale (mais moins pour le Japon que pour l'URSS), il est aujourd'hui possible et avantageux pour tous de connaître à l'avance les projets spatiaux de tous, y compris ceux de l'URSS et du Japon. Nous reprendrons ce point à la section 6.1.5.

Le plan spatial de la NASA comporte la construction de "Grands Observatoires", affectés à des domaines de longueur d'onde spécialisés. Deux d'entre eux sont en orbite: le Hubble Space Telescope (UV-visible) et le Gamma-Ray Observatory (domaine gamma), deux autres sont programmés mais pas encore formellement approuvés (voir annexes 3.2 et 3.3). De plus, la NASA exécute un programme de lancements de petits satellites scientifiques nommés *Explorer*, qui utilise des lanceurs Thor Delta ou Scout, c'est-à-dire que ce programme ne fait pas appel à la navette spatiale. Plus récemment, la NASA a introduit entre les grands observatoires ou les grands projets planétaires et les petits satellites de la classe *Explorer* une classe de missions dites moyennes d'un coût total de l'ordre de 500 millions de dollars.

L'ESA, de son côté, a publié en 1984 un plan spatial, Horizon 2000, où figure un ensemble équilibré de projets, les uns de grande taille et destinés à servir des communautés scientifiques larges (ce sont les "*Pierres Angulaires*"), les autres étant des missions de taille moyenne et d'objectifs plus spécialisés, les troisièmes étant de petites missions. La première "Pierre angulaire" de l'ESA (STSP= Solar-Terrestrial Space Programme, formé de l'ensemble des deux missions SOHO et CLUSTER, voir annexe 3.2) sera lancée en 1995. Parmi les missions moyennes, le satellite HIPPARCOS est en orbite, parmi celles de plus petite taille, la sonde GIOTTO réanimée (GEM) est également en vol.

Tous les observatoires et sondes répertoriés à l'annexe 3.1 fonctionnent bien, sauf a) GAMMA1 qui souffre d'une panne de l'alimentation de la chambre à étincelles; cette chambre étant le principal détecteur des rayons gamma à haute énergie (sous responsabilité soviétique), la panne interdit la localisation et l'imagerie des sources et rend cet instrument inopérant. b) le Hubble Space Telescope (HST), dont le miroir primaire est affecté d'une aberration sphérique due à un mauvais contrôle optique lors du polissage chez Perkin-Elmer, aux Etats-Unis, ce qui interdit l'observation à très haute résolution angulaire des objets très faibles. Les autres programmes du HST se déroulent, avec une efficacité réduite. Il est prévu de réparer le HST en orbite en 1993, en introduisant un système optique

correcteur du miroir. c) GALILEO dont la grande antenne parabolique n'a pu à cette date être déployée ce qui compromet la retransmission de données lorsque la sonde s'approchera de Jupiter.

4.3 Les observatoires spatiaux et sondes interplanétaires approuvés. Le programme ballons français.

L'annexe 3.2 donne la liste des satellites et sondes scientifiques consacrés aux sciences de l'univers approuvés au 1er septembre 1991, et donc en construction ou en phase de définition détaillée. Ces projets engagent l'effort de recherche jusque vers l'an 2005, puisque c'est une des caractéristiques de la science spatiale que les projets requièrent souvent 20 ans entre leur conception et l'arrivée des premiers résultats, 10 ans entre la décision et ces premiers résultats. On retrouve dans cette liste des "Grands Observatoires", deux des "Pierres Angulaires" de l'ESA et des missions plus modestes, destinées à compléter, si possible sans redondance et en augmentant les performances en résolution et en sensibilité, les missions des première ou seconde générations déjà accomplies. Les missions planétaires reçoivent une impulsion importante, spécialement du côté NASA, après la phase d'exploration qu'avait constitué le programme Voyager. L'Europe collabore avec la NASA pour la préparation de la mission CASSINI vers Saturne: l'Europe développera, sous sa propre maîtrise d'oeuvre, une sonde (HUYGENS) qui descendra vers le satellite Titan de Saturne, un des rares objets du système solaire lointain qui possède une atmosphère dense. Du côté soviétique, le programme d'exploration de Mars se poursuit sans dispersion (après le lancement des sondes Phobos en 1988), son épanouissement complet dépendant des disponibilités financières de ce pays.

On a indiqué à l'annexe 3.2 quels seront les lanceurs utilisés pour les différentes missions. Ariane n'est pas le seul véhicule auquel il sera fait appel. Pour la "pierre angulaire" SOHO, par exemple, le lancement par une fusée Atlas Centaur est un des éléments de la participation des Etats-Unis dans la collaboration (les Etats-Unis contribuent aussi à la charge utile); de même pour la mission Cassini et pour les missions en collaboration franco-soviétique. On sera surpris de remarquer que les montages bilatéraux ne s'embarrassent pas toujours de la valorisation des produits européens: la mission FREJA, conduite par la Suède en collaboration avec l'Allemagne, doit être lancée avec une fusée chinoise Longue Marche, une première pour l'Europe...

En ce qui concerne le *programme ballons français*, il comporte deux grands projets dans le domaine des sciences de l'univers:

- Le projet d'observatoire submillimétrique PRONOS, destiné à préparer la mission FIRST de l'ESA, mission qui ne sera pas lancée avant 2003. Le ballon utilisé est le plus gros jamais fabriqué en France (950 000 m³). Il emportera un miroir de 2m de diamètre, d'une technologie nouvelle (il est segmenté, et fait d'un nid d'abeille de carbone très léger). Les laboratoires ont également effectué des développements originaux

sur les détecteurs submillimétriques. L'objectif scientifique de ce programme est d'identifier les questions auxquelles s'attacheront les grands observatoires spatiaux submillimétriques des années 2000, dans un domaine quasi inexploré.

- Le projet de ballon martien, développé dans le cadre du programme d'exploration planétaire soviétique MARS 94. La configuration retenue est celle d'un ballon cylindrique équipé d'un "guiderope", c'est-à-dire d'une corde creuse contenant des équipements scientifiques (radar basse fréquence pour le sondage des quelques premiers 100 m du sol, détecteur gamma). Ce ballon devrait être largué sur la planète lors du vol vers Mars de 1996.

4.4 Les observatoires spatiaux et sondes interplanétaires à l'étude

Il s'agit des projets qui fourniront des résultats au 21ème siècle, et qui représentent aujourd'hui le meilleur de ce que les astronomes et physiciens du système solaire savent imaginer comme étant les besoins de leur science après l'an 2000. L'annexe 3.3 rassemble les principaux projets les mieux identifiés. Mais le paysage est mouvant, et aucun d'entre eux ne peut être considéré comme devant être réalisé à coup sûr.

En astronomie, ces projets poursuivent l'effort entrepris vers une plus haute sensibilité des instruments, et vers une imagerie à résolution angulaire plus élevée dans les différents domaines de longueur d'onde. Le 4ème grand observatoire de la NASA (SIRTF) emportera un télescope refroidi à l'hélium pour l'étude fine des sources infrarouges faibles. Ce projet initialement conçu comme un concurrent direct du projet européen ISO n'a pas été réalisé dans le calendrier prévu, du fait de la décision européenne de construire ISO. Le projet a maintenant évolué vers un observatoire de deuxième génération qui, venant plusieurs années après ISO, pourra reprendre les questions restées sans réponse après celui-ci. Il jouit d'un soutien très accentué de la communauté astronomique américaine.

Bien qu'il y ait un champ ouvert à l'interférométrie visible à 1 et 2 dimensions, aucun projet n'est assez avancé pour figurer dans l'annexe 3.3.1.

Dans le domaine du Soleil, du système solaire et de la géophysique externe, de grandes missions se dessinent. Pour le Soleil, on cherche à se rapprocher de sa surface sans que la sonde ne soit détruite, et à explorer le vent solaire à quelques rayons seulement (environ 4) de distance, au lieu que jusqu'à présent on l'a observé à distance, jamais à mieux que 70 rayons solaires (projet VULCAN). En planétologie, on trouve dans les futurs grands projets deux conceptions différentes de l'exploration planétaire : la NASA entend reprendre une étude de toutes les planètes qui n'ont pas reçu de visite depuis longtemps, tandis que l'URSS se concentre sur le programme Mars sans disperser ses forces. Quant à l'ESA, elle projette de réaliser une "Pierre angulaire" du programme Horizon 2000, nommée ROSETTA, qui est un projet très ambitieux: il s'agit de

ramener sur terre un échantillon de matière cométaire en posant une sonde sur une comète et en y forant une "carotte". La matière cométaire est la matière solide la plus proche dans ses propriétés de celle de la nébuleuse primitive où s'est formé le système solaire. Un tel échantillon sera un outil d'étude fantastique pour la formation du système solaire.

4.5 Les sciences de l'univers bénéficieront-elles des stations spatiales?

La première plateforme spatiale américaine fut la station NASA Skylab en 1973. Cette plateforme avait embarqué un très gros observatoire solaire, et plusieurs astronautes, qui de fait participèrent à certaines manipulations de films. Ces astronautes étaient aussi à bord comme sujets d'expériences de biologie et physiologie humaines. Nous n'analyserons pas les résultats, par ailleurs fondamentaux, obtenus par Skylab (il suffit de souligner qu'on aurait pu faire les mêmes observations sur le soleil sans astronautes si on l'avait décidé ainsi), ni les résultats obtenus par les soviétiques à partir des divers vols de la station Saliout.

En ce qui concerne la France, elle a participé à un vol Saliout en 1982, avec l'astronaute J.L. Chrétien. Au cours de ce vol, une "expérience d'opportunité" française a permis d'obtenir des clichés de la lumière zodiacale et du gegenschein à l'aide d'une caméra utilisant des films, dans le visible et le proche infrarouge (voir annexe 2).

Nous nous préoccupons plutôt ici de la situation inédite créée par les nouvelles orientations de la politique spatiale, au moins aux Etats-Unis et en Europe, orientations qui conduisent à privilégier l' "Homme dans l'espace" comme objectif à moyen et long terme du programme spatial. En Union soviétique, la station MIR est en orbite depuis 1986, mais ce programme ne s'est pas présenté jusqu'à présent comme un élément qui porterait ombre au reste du programme spatial. Les japonais, quant à eux, sont une partie prenante enthousiaste du programme de station spatiale Freedom des Etats-Unis, et ils construisent un des modules attachés à cette station. Qu'en est-il pour la France et l'Europe?

Les astronomes français, et plus largement les astronomes européens, ont et auront donc potentiellement accès:

- A la station spatiale Freedom des Etats-Unis, que ceux-ci construisent avec le Canada, l'ESA et le Japon; sa date de lancement pourrait être 1996.
- Si le programme Columbus de l'ESA est décidé dans sa configuration 1991, à la station autonome du programme Columbus (MTFF, ou Man-Tended Free Flyer). Celle-ci volerait en 2001.
- A la station soviétique MIR, et plus précisément à son module astrophysique KVANT, qui sont en orbite.

On peut donc se demander quels programmes en sciences de l'univers seraient adaptés à ces engins, qui auront la propriété de rester dans l'espace durant de très longues

périodes (plusieurs années), et qui seront habités de façon permanente ou temporaire.

Des groupes de travail ont réfléchi pour le compte de l'ESA ou du CNES à ce problème. Leurs conclusions sont pour le moins incertaines. Bien entendu, les sciences de l'univers ne sont pas demandeurs de l'homme dans l'espace, pour un simple motif de coût des missions habitées. Pourquoi en effet payer cher les conditions de sécurité d'un équipage, alors qu'on obtient d'excellentes mesures en mode automatique? Mais comme les stations spatiales existent (MIR) ou vont exister pour d'autres motifs que scientifiques, on peut chercher à les valoriser y compris dans les sciences de l'univers.

S'agissant du module pressurisé (APM=Attached Pressurized Module) qui est une autre composante du programme Columbus de l'ESA, et qui doit être attaché à Freedom, on peut envisager des expériences d'astronomie à condition a) qu'il existe une plateforme externe à APM où les monter, b) qu'un système de pointage donnant une précision de 1' soit disponible de façon permanente (car Freedom pointe à $\pm 5^\circ$), c) qu'un contrôle thermique des expériences soit réalisable, d) que les surfaces optiques puissent être protégées de la contamination par les rejets des habitants de Freedom.

S'agissant de MIR, il n'a pas paru avantageux au CNES d'embarquer d'expériences d'astronomie au cours des missions habitées Aragatz (1988, avec J.L. Chrétien) et Antarès (1992, avec M. Tognini), car les délais de réalisation étaient trop brefs. On note que l'environnement polluant à l'extérieur de la station, où se trouvent les nombreux points d'implantation des expériences, n'est pas suffisamment bien connu pour envisager des expériences dans le visible ou l'ultraviolet. Cette défaillance liée à la pollution ne paraît pas perturber les soviétiques, qui utilisent KVANT, en collaboration avec d'autres pays européens que la France, pour faire des expériences en rayons X essentiellement.

S'agissant enfin de la station européenne MTFE, celle-ci a été conçue pour être un laboratoire de microgravité, visitable une ou deux fois par an. Or les utilisations astronomiques requièrent, ici comme sur APM, une plateforme d'exposition externe, et un système de pointage. Comme pour Freedom ou MIR, l'orbite n'est pas adaptée pour l'astronomie (trop basse), la pollution de l'environnement de la station est gênante, enfin le système de pointage risque de modifier le niveau de microgravité nécessaire à la mission principale.

On peut conclure de façon claire que pour les sciences de l'univers proche ou lointain les stations spatiales construites pour expérimenter le séjour de longue durée de l'homme dans l'espace n'ont pas d'intérêt particulier et présentent plutôt des inconvénients. Quant à la présence de l'homme en continu, elle n'est pas nécessaire: les missions d'exploration de l'univers lointain se sont faites depuis trente ans avec des

sondes automatiques et ont donné de magnifiques résultats dans cette configuration non habitée.

Pour les missions d'exploration planétaire, les mêmes arguments sont valables, en attendant l'époque probablement lointaine, où l'on saura envoyer des hommes sur la planète tellurique Mars. Supposons même que l'on envoie des hommes sur Mars. Il ne sera de toute manière pas aisé de poursuivre l'exploration du système solaire et d'envoyer dans la foulée des hommes sur Titan (satellite de Saturne), à une distance six fois supérieure à celle de Mars. *Du point de vue de la recherche scientifique, les missions automatiques restent grandement préférables.*

Reste la Lune, dont nous allons examiner (section 4.6) les qualités en tant que base scientifique de sélénophysique et en tant qu'observatoire astronomique.

En ce qui concerne le recours que l'on a eu à des astronautes pour réparer en 1983 le satellite Solar Maximum Mission (SMM) de la NASA, ou que l'on aura pour mettre en place en 1993 l'optique correctrice du Hubble Space Telescope, satellites l'un et l'autre placés en orbite basse, il s'agit d'utilisations de l'homme comme manipulateur dans la gestion des équipements en orbite basse. Cette fonction d'ouvrier est certes utile, mais son exercice se limite à l'orbite basse. Or les satellites d'observation astronomique sont d'autant plus rentables, du point de vue du temps qu'ils peuvent passer à observer un même objet et du point de vue de l'absence de perturbations dues au voisinage de la Terre, qu'ils sont placés sur des orbites plus lointaines.

Il n'est donc pas évident que le gain en capacité de réparation compense la perte d'efficacité due à l'orbite basse. Deux exemples illustrent cette affirmation: l'observatoire infrarouge SIRTAF de la NASA, initialement conçu pour bénéficier des services de la station spatiale Freedom, est maintenant planifié avec une orbite lointaine; pour la grande antenne submillimétrique de l'ESA (projet FIRST), les études ont montré que les problèmes thermiques et l'observabilité du ciel interdisent de l'associer à la station spatiale.

4.6 La Lune: base sélénophysique et observatoire astronomique

L'initiative d'Exploration Lunaire proposée par le président Bush en 1989 a ouvert la perspective d'une présence humaine dans l'espace qui, au-delà des stations habitées en orbite terrestre basse, déboucherait successivement sur un retour de l'homme sur la Lune, puis sur une exploration humaine de Mars. Bien que cette initiative ait reçu jusqu'à présent peu d'écho du Congrès américain, il était important que la communauté des sciences de l'univers ait au départ une idée claire des bénéfices et inconvénients d'un tel programme et du rôle qu'elle pourrait y jouer.

Les rapports des groupes de travail "Système Solaire" et "Astronomie" au colloque de prospective du CNES au Cap d'Agde en 1989 ont clairement exprimé la position de cette communauté.

Si l'exploration de Mars a été placée en première priorité par la communauté de planétologie, il s'agit d'une exploration robotique, conduite à partir de réseaux de stations au sol et de véhicules automatiques, et débouchant sur un retour d'échantillons du sol de Mars vers la terre. L'ensemble de ce programme peut se dérouler avant la mise en place des moyens d'une exploration lunaire, et la France est engagée dans une collaboration avec l'Union soviétique dans cette perspective (voir annexe 3.2).

La position vis-à-vis de la Lune était très différente; la communauté astronomique a reconnu l'intérêt de la Lune comme base d'implantation d'observatoires astronomiques, les planétologues quant à eux ayant identifié un certain nombre d'objectifs scientifiques particulièrement intéressants concernant l'objet Lune lui-même.

L'intérêt manifesté par la communauté scientifique française au séminaire de prospective de 1989, ainsi que l'avance prise par les américains dans l'étude des objectifs et des scénarios de l'exploration de la Lune et de Mars, étaient suffisants pour motiver une étude spécifique de la part du CNES (une étude parallèle se déroulait à l'ESA). Conduite par un groupe de travail rapprochant ingénieurs du CNES et scientifiques, cette étude aboutit en 1990 à la rédaction d'un document "Initiative Lune: rapport préliminaire d'orientation", dont nous reprenons les conclusions dans ce qui suit.

4.6.1 L'étude géophysique de la Lune

Malgré l'importance du programme Apollo, le fait qu'il ait été construit autour de l'exploration par l'homme de quelques zones bien délimitées a laissé non résolues de nombreuses questions de base sur la Lune, et la grande majorité des terrains lunaires a encore aujourd'hui échappé à une cartographie géochimique et géologique détaillée. Il y a donc encore beaucoup à faire pour aboutir à une cartographie complète et achever la description des champs principaux (gravité et champ magnétique). Trois questions scientifiques majeures seront à résoudre par la prochaine génération de missions scientifiques vers la Lune:

- Quelle est l'origine de cet astre?
- Quel a été le déroulement de son histoire primitive, pendant les cent premiers millions d'années de sa formation?
- Existe-t-il sur la Lune des réservoirs de corps volatils piégés? Sachant que la présence de glace d'eau piégée au voisinage des pôles est théoriquement possible, on peut apprécier l'importance de cette question, non seulement d'un point de vue de connaissance, mais aussi pour son intérêt vis-à-vis de futures implantations humaines.

Le scénario d'exploration scientifique de la Lune suit étroitement le déroulement présenté à la section 3.1.4: a) reconnaissance orbitale (télé-détection et spectrométrie gamma), b) établissement d'un réseau de stations sismiques au sol et réalisation au moins en un site d'un forage assorti de moyens

d'analyse détaillée des propriétés physico-chimiques du sol, c) mise en oeuvre de véhicules mobiles.

Une forte participation française à ce programme, *s'il est un jour conduit en collaboration internationale*, se présenterait dans un contexte favorable: l'instrumentation à mettre en oeuvre correspond à des domaines d'excellence des équipes françaises (gravimétrie, spectroscopie infrarouge et gamma, etc...), et l'effort d'étude mené par le CNES (voir aussi section 7.2) autour du Véhicule Automatique Planétaire (VAP) trouverait une occasion de concrétisation dans un contexte en fait moins complexe que celui de Mars (terrains plus favorables, délais de télécommunication considérablement plus courts autorisant une téléopération quasiment en temps réel du véhicule lunaire).

4.6.2 L'observatoire Lune

La Lune possède un potentiel important pour l'observation astronomique. Elle est dépourvue d'atmosphère, et de son sol on a donc accès à la totalité du spectre électromagnétique. Sa gravité superficielle est faible (un sixième de celle de la Terre) et la sismicité y est réduite, elle représente donc le socle idéal pour déployer de grands collecteurs ou des réseaux de collecteurs, et assurer leur stabilité géométrique. La Lune est également une excellente base pour un télescope astrométrique, car la théorie du mouvement propre de ce satellite est connue avec une remarquable précision (0.001 secondes d'arc). A ces caractéristiques partagées par toutes les régions lunaires, il faut ajouter des avantages supplémentaires pour deux régions particulières: a) la face cachée, qui est protégée du bruit électromagnétique produit par toutes les émissions de la Terre (clair de Terre, rayonnement radioélectrique terrestre, émission Lyman alpha de la géocouronne); b) les cratères des régions polaires, qui offrent une grande obscurité en permanence et une température stable et très basse (70 Kelvin), propice au refroidissement passif de télescopes et détecteurs astronomiques.

S'il faut, pour être complet, mettre en face de ces avantages les inconvénients de l'environnement lunaire (bombardement météoritique, vent solaire, fortes variations diurnes de température), c'est pour constater que ces inconvénients peuvent être limités par des protections adéquates, et que la Lune a un intérêt indiscutable pour l'astronomie, si l'on fait abstraction du coût d'une implantation.

Le groupe de travail du CNES a identifié les projets qui semblent prioritaires pour la première génération des vols vers la Lune.

L'installation d'un interféromètre optique/UV/infrarouge serait d'un intérêt considérable. Plus aisé à réaliser sur le sol lunaire que dans l'espace, il serait totalement affranchi des limites en pouvoir de résolution introduites sur Terre par la turbulence atmosphérique, et permettrait d'accéder à des fenêtres spectrales interdites par l'atmosphère terrestre: l'ultraviolet (UV) en-dessous de 320 nm et les bandes de

infrarouge où l'atmosphère absorbe le rayonnement. Une première étape verrait l'implantation d'un réseau de 2 à 3 télescopes de 1.50 m, extensible ultérieurement à un nombre supérieur.

L'interférométrie submillimétrique pourrait se développer, puisque la fenêtre spectrale allant de 20 à 700 μm est fermée sur Terre par l'absorption atmosphérique. L'ouverture de cette fenêtre en mode interférométrique apporterait des découvertes pour l'observation à haute résolution angulaire de tous les objets et milieux froids de l'univers. La configuration initiale pourrait impliquer sept antennes de 5 m de diamètre. Les français ayant une compétence très reconnue en interférométrie, le projet pourrait servir de support à une collaboration avec les Etats-Unis.

Enfin, bien que moins étudiés, trois autres projets émergent de la communauté française: un réseau radio TBF (très basse fréquence), visant à explorer l'univers radio en dessous de la coupure introduite par l'ionosphère terrestre, qui arrête toutes les fréquences inférieures à 5 ou 10 MHz, un télescope astrométrique qui bénéficierait des qualités déjà mentionnées de la Lune, enfin un projet de télescope gamma.

Dans son ensemble, l'"objectif Lune" intéresse beaucoup plus la communauté des sciences de l'univers que la station spatiale:

- *on y trouvera une bonne valorisation du savoir-faire instrumental existant en France,*
- *on pourra parfaire la connaissance géophysique de la Lune, mais surtout la Lune est réellement une base astronomique de grande qualité,*
- *le programme européen de lanceurs peut y trouver lui-même un débouché, Ariane 5 semblant adapté aux missions lunaires de la première génération. Energia pourrait intervenir dans les missions ultérieures: l'Europe large a donc de bons moyens de s'insérer dans un effort international sur la Lune.*

Si le programme voit le jour, il faudra veiller à ce que les missions de retour vers la Lune soient placées sous les auspices de la communauté internationale (actuellement les japonais ont un programme Lune national), donc dans un cadre juridique de type traité de l'antarctique, favorisant la recherche scientifique.

La création d'un institut scientifique international chargé de l'exploitation scientifique de la Lune serait certainement l'outil adapté.

Section 5

PROCESSUS D'ELABORATION, DE DECISION, DE FINANCEMENTDES PROJETS ET PROGRAMMES

La recherche spatiale appartient sans conteste à ce qu'on nomme la science lourde (big science). Plusieurs missions spatiales auxquelles participent les chercheurs français en sciences de l'univers sont classées par le ministère de la recherche et de la technologie comme "Très Grands Equipements" (TGE), selon une définition qui désigne ainsi un instrument scientifique de classe internationale et de coût supérieur à 100 MF. On en trouvera la liste en annexe 4, ces TGE étant comparés pour leur budget (construction, exploitation, personnel) aux TGE fonctionnant au sol dans les mêmes disciplines. Le Hubble Space Telescope a été ici oublié, alors que la France le finance à hauteur de 340 MF (voir annexe 5).

Les missions spatiales citées à l'annexe 4 se réalisent dans le cadre ESA ou dans celui de la coopération franco-soviétique. S'agissant des missions ESA, on a groupé à l'annexe 5 le coût de ces missions pour l'ESA, ainsi que la part de la France au sens du programme obligatoire de l'ESA.

En effet, il faut bien réaliser que la France contribue aux missions ESA de deux manières, d'une part à travers le programme obligatoire (sa part de financement est de 18%, proportionnellement à son PNB par tête), d'autre part en contruisant selon ses moyens les instruments qu'emportent ces missions. Sur la contribution obligatoire de la France au budget scientifique de l'ESA sont financés, pour chaque mission, les études que mène l'ESA, le satellite, le lancement, et dans certains cas les instruments (c'est le cas d'HIPPARCOS et d'EXOSAT, ainsi que de l'un des instruments du HST, la Faint Object Camera, dont la responsabilité revenait à l'ESA).

5.1 Elaboration des projets et programmes de recherche spatiale

Selon la mission qui lui a été confiée par son décret de création, le CNES est chargé de préparer les grandes décisions de politique spatiale pour la France. Ceci s'applique au programme scientifique.

L'initiative d'un projet spatial revient cependant aux scientifiques. Ceux-ci exploitent leur information sur le front d'avancée des connaissances, et comme les projets sont lourds et requièrent tous aujourd'hui une collaboration internationale, ils s'entendent pour bâtir un projet commun

avec leurs collègues des pays susceptibles de s'associer au nouveau projet.

Le nouveau projet est présenté devant un *groupe d'experts* qui fonctionne de façon permanente auprès de la Direction de la Recherche au CNES. Il y a deux groupes d'experts dans le secteur qui nous préoccupe: le groupe Astronomie et le groupe Système Solaire.

Une fois tous les quatre ans a lieu un grand *Colloque de Prospective* (cf section 4.2), où le CNES invite tous les chercheurs dont la contribution personnelle et le jugement vont permettre de mettre à jour le plan scientifique à long terme de l'organisme. Les projets débattus ont pour cadre de référence le programme de l'ESA, qui de son côté établit un plan à long terme (voir section 4.2 et infra). Cet exercice est préparé pendant plusieurs mois, puis les débats ont lieu de façon contradictoire après que les projets aient été présentés publiquement. La confrontation des projets a lieu non dans un cadre restreint, mais à l'intérieur d'une vaste discipline: discutent ensemble non seulement les spécialistes des sciences de l'univers, mais ceux des sciences de la Terre et de l'environnement. Les projets retenus doivent convaincre un cercle sensiblement plus large que celui des spécialistes.

De chacun de ces colloques sortent un cadre de travail et des priorités de réalisation, au niveau national et à celui de l'ESA. Il est en particulier remarquable que le CNES s'efforce de faire émerger un grand projet national lors de chacun de ces colloques. Les projets ne seront pas nécessairement réalisés dans l'ordre de priorités retenu, car la science spatiale dépend d'"opportunités", c'est-à-dire des événements nouveaux qui peuvent apparaître dans le programme des grandes agences hors ESA. Mais on peut dire que grosso modo les recommandations des Colloques de Prospective du CNES se réalisent, et que personne ne remet en question les choix retenus.

A la suite de ces colloques, les projets nouveaux énoncés font l'objet, au Centre Spatial de Toulouse, d'une étude de définition et de faisabilité, tandis que les scientifiques continuent de travailler à l'amélioration de leur projet, et rapportent à intervalles réguliers devant le groupe d'experts concerné du CNES.

Chacun des groupes d'experts du CNES rapporte devant le *Comité des Programmes Scientifiques* (CPS), un organe statutaire permanent qui effectue en principe la synthèse des travaux des différentes disciplines. Le CPS devrait faire des arbitrages entre ces disciplines et présenter des recommandations à la direction du CNES. Dans les faits, la direction du CNES fait elle-même la plupart des arbitrages.

A l'ESA, la méthode n'est pas tout à fait la même, car aujourd'hui l'existence du plan scientifique à long terme "Horizon 2000" balise pour ainsi dire le paysage des futurs projets jusqu'à environ 2005. Ce plan a été préparé en 1984 et approuvé à très haut niveau, à la conférence ministérielle de Rome en 1985. Le plan a été établi avec l'appui de la

communauté scientifique à l'initiative de la direction du programme scientifique à l'Agence. Il a été conçu comme un programme minimum, équilibré entre les missions d'astronomie et les missions d'exploration in situ du système solaire. Comme déjà souligné plus haut (section 4.2), ce plan cherche aussi à maintenir un équilibre entre grandes, moyennes et petites missions; enfin il cherche à répondre aux besoins exprimés par les chercheurs des différents sousdisciplines.

La plan Horizon 2000 étant approuvé, c'est l'ESA qui émet des appels d'offre pour les différentes catégories de missions. Les industriels et les scientifiques se groupent pour répondre à un tel appel d'offre: ainsi sont définis pour chaque mission le satellite et la vocation des principaux instruments qu'il emportera. Dans une autre étape, des appels d'offre sont émis pour la construction de ces instruments, et les équipes de scientifiques proposant sont sélectionnées après l'examen de leur réponse par un groupe scientifique ad hoc. Les instruments sont en général financés sur les budgets spatiaux nationaux, c'est-à-dire en sus du financement affecté au projet en question à travers la contribution obligatoire de chaque pays.

A l'ESA existent aussi des *groupes d'experts* extérieurs (Solar System Working Group, Astronomy Working Group). Les scientifiques qui y siègent sont nommés pour trois ans à titre personnel par un système mixte (cooptation, nomination par le directeur du programme scientifique), ils ne sont donc pas des représentants nationaux. Ces groupes suivent l'émergence de nouveaux projets, et la bonne réalisation des projets en cours. Ils sont surplombés par un haut comité scientifique (SSAC=*Space Science Advisory Committee*), qui émet des recommandations vers le directeur du programme scientifique et le SPC (SPC=*Science Programme Committee*), lui-même formé des représentants des pays membres.

On peut affirmer que les projets scientifiques sont élaborés, tant à l'ESA qu'au CNES, dans un climat de réelle liberté intellectuelle, et avec un nombre d'étapes suffisant pour que toute confrontation scientifique utile ait pu avoir lieu.

5.2 Processus de prise de décision

5.2.1 Une méthode de décision fiable

La décision sur une mission ou sur une expérience spatiale intervient en *plusieurs étapes*, qui donnent lieu chacune à une décision en son ordre: on a parlé plus haut d'étude de définition ou de faisabilité; si celle-ci est positive, se produit le passage en phase A pendant laquelle la faisabilité *technique* de l'instrument ou de la mission est étudiée en détail, puis le passage en phase B, au cours de laquelle différents concepts expérimentaux sont essayés par un consortium industriel, enfin le passage en phase C/D, qui est la décision de construction du prototype, puis de l'expérience qui volera, et la décision de lancement et d'exploitation. On voit qu'aucune décision n'est prise à la légère, et qu'un calendrier se déroule inexorablement, avec des revues de projet critiques à chaque étape. Il peut cependant se produire que

telle ou telle mission soit bousculée parce qu'on veut être prêt pour un événement astronomique particulier (par exemple le passage de la comète de Halley).

Lors des premières étapes (définition de mission, phase A), plusieurs projets sont étudiés en parallèle, et à chacune des deux étapes, un certain nombre de projets ne sont pas retenus. A la fin de la phase A intervient en Europe (CNES, ESA) la décision la plus cruciale, puisqu'on ne garde qu'un seul projet qui sera mené à son terme si aucun problème technique majeur n'est rencontré. Aux Etats-Unis, la décision intervient à la fin de la phase B. Un budget et un calendrier fermes sont alors établis. Tout dépassement budgétaire de plus de 10% entraîne, à l'ESA, une décision du SPC pour le maintien de la mission. Cette procédure assez lourde a l'avantage d'offrir une garantie de fiabilité et de forcer une maturation lente des projets qui les rend particulièrement robustes face à l'évolution des disciplines. Les colloques de prospective du CNES ou les cycles de sélection de l'ESA voient revenir sous des formes améliorées les projets non sélectionnés, à côté de quelques projets vraiment nouveaux.

Il en résulte que, le plus souvent, les décisions sont lentes. Elles peuvent mettre en jeu des révisions budgétaires importantes, et comme on l'a déjà dit, il peut se passer jusqu'à 10 ans entre la décision d'une mission et le lancement du satellite (voir annexe 5 et comparer les colonnes 2 et 5). C'est cette particularité, que la recherche spatiale partage, mais de façon plus extrême, avec d'autres projets de science lourde, qui impose des engagements financiers pluriannuels et une définition de la politique dans une vision à moyen et long terme. En effet, il faut se prémunir contre les à-coups politiques et budgétaires qui conduisent inévitablement au gaspillage. Pour les scientifiques, la lenteur des processus est éprouvante, puisqu'il leur faut espérer et attendre les résultats de leurs travaux pendant de si longues années. Cette considération structurelle doit être tempérée en Europe, où à la différence des Etats-Unis, on évite autant que possible de retarder les missions, ce qui au contraire est pratique courante outre Atlantique.

5.2.2 Les responsabilités

En France, le Conseil d'Administration du CNES approuve formellement les décisions d'engagement de crédits, mais en ce qui concerne le programme scientifique, le rôle du Conseil d'Administration est effacé sur le fond: la Direction de la Recherche prépare les décisions avec le Directeur Général.

Le Conseil des Très Grands Equipements (TGE), qui siège au ministère de la recherche et de la technologie, est tenu informé, dans le meilleur des cas, des décisions de missions. Les projets scientifiques spatiaux n'y sont pas réellement discutés, alors qu'ils devraient l'être en comparaison des autres grands équipements (au sol). Le résultat de cette situation est que les projets spatiaux sont traités comme s'ils étaient réservés, et comme si leurs crédits étaient de toute manière protégés.

Contrairement à ce qui se passe aux Etats-Unis, où les missions (mais pas les instruments) sont débattues par le Congrès, en France la représentation nationale est tenue très à l'écart de ce processus de décision. D'une part, elle ne dispose pas des consultants et de commissions ad hoc qui pourraient l'éclairer, et nous ne sommes pas informés qu'elle invite des scientifiques pour lui exposer tel ou tel projet. D'autre part, il n'est pas favorable de discuter les projets scientifiques au coup par coup, comme cela se fait aux Etats-Unis. *Il serait beaucoup plus profitable de rechercher l'approbation du Parlement sur un plan à moyen terme.* Aujourd'hui, la représentation nationale rencontre les problèmes de politique spatiale à l'occasion de l'approbation des budgets lors du vote sur le Budget Civil de Recherche et de Développement (BCRD).

Les décisions portent aussi sur la construction d'instruments, leur niveau de financement n'étant pas toujours modeste en regard de ce que la France consacre à certaines missions. Ces instruments sont réalisés soit en laboratoire, soit dans l'industrie. Dans le premier cas, le financement par le CNES portera sur le matériel, mais non pas sur le soutien des laboratoires qui vont accomplir cette tâche, ni sur le coût des personnels, lesquels sont fournis en vaste majorité par le CNRS et les universités; cette contribution n'est en général ni comptabilisée ni discutée explicitement par ces organismes, et le problème ainsi créé est assez lourd pour qu'on y revienne plusieurs fois dans ce rapport. Dans le second cas, la vérité des coûts s'impose d'elle-même.

A l'ESA, les décisions de mission sont prises par le Science Programme Committee (SPC), où siègent les représentants des gouvernements des pays membres. A la différence de ce qui se passe pour les programmes (optionnels) d'application, les décisions scientifiques ne remontent en général pas pour discussion jusqu'au Conseil de l'Agence, mais elles sont entérinées par cet organe. C'est le budget scientifique global qui est de la responsabilité du Conseil, et ce budget est plaidé par le directeur du programme scientifique.

5.2.3 Les difficultés

Le problème le plus sérieux qui se pose pour la France face au financement de la recherche spatiale est celui de *l'articulation des décisions nationales et des décisions à l'ESA.* Sont en jeu d'une part le calendrier, d'autre part les budgets.

En effet, une mission et son calendrier décidés dans le cadre ESA entraînent un appel d'offres pour la construction des instruments, auquel répondent les laboratoires, le plus souvent groupés en consortia. Les agences nationales doivent alors financer les instruments sélectionnés dans un calendrier sur lequel elles ont peu de contrôle. De plus le processus de sélection fondé, en ce qui concerne les instruments, sur la qualité des projets n'a aucune raison de conduire à une répartition acceptable des charges financières entre les différentes agences nationales.

Les pays, contraints de financer le programme scientifique de l'Agence, qui est obligatoire (la part de la France est 18%), doivent donc simultanément veiller à la disponibilité de finances nationales ne serait-ce, au minimum, que pour participer aux instruments des missions ESA, et bénéficier du retour scientifique de ces missions.

Or le rythme de déroulement du programme Horizon 2000 a tendance à être trop rapide pour un pays comme la France, qui a pourtant approuvé ce programme. En effet, à la différence d'autres pays, la communauté française existe dans toutes les sous-disciplines des sciences de l'univers et comme il n'est pas immodeste de souligner que les scientifiques français sont bons, les idées qu'ils émettent pourraient leur permettre de participer à plus d'instruments que ne l'autorise le budget national.

Pour illustrer ces points, et montrer quelles sont les parts respectives du financement allant à l'ESA et de celui consacré aux instruments pour une mission donnée, prenons l'exemple d'ISO (Infrared Satellite Observatory), qui sera lancé en 1993: la mission revient à 430 MUC à l'ESA (coût cumulé non ramené à l'année d'approbation), tandis que la charge utile est estimée à 150 MUC, soit un tiers du coût de la part ESA de la mission (1 MUC= 6.97 MF). La participation principale de la France aux instruments consiste à construire la Caméra infrarouge ISOCAM, et à participer minoritairement à un autre instrument pour un coût de revient total de 150 MF pour le CNES et de 40 MF pour le CEA (hors personnel). Pour le budget scientifique du CNES, et même hors personnel, cette somme est lourde. Le motif est que la construction de la caméra est en grande partie sous-traitée à l'industrie. La participation française à ISO est donc $18\% \times 430 \times 6.97 + 190$ MF soit $540 + 190 = 730$ MF, répartis sur sept à huit années budgétaires.

D'une façon générale, les instruments embarqués sur les missions ESA représentent de 30 à 35% de surcoût par rapport au coût ESA de la mission. Les instruments étant de plus en plus complexes, et faisant appel à des technologies pointues, il arrive que leur coût initial soit affecté d'une incertitude.

Si l'on ne parvient pas à une meilleure harmonisation des décisions, on court le risque que l'ESA lance de magnifiques satellites partiellement vides, faute pour les pays d'avoir pu dégager au bon moment les ressources nécessaires à la construction de la charge utile.

De même, l'analyse fine de l'annexe 3 (en particulier 3.2 et 3.3) montre qu'une vigilance extrême doit s'exercer afin que les programmes nationaux ne dupliquent pas certains aspects des missions ESA et réciproquement. Le danger de gaspillage n'est pas réel pour les missions qui sont des "premières" comme Giotto ou Hipparcos, mais il peut l'être pour certaines charges utiles de seconde ou troisième génération, de petite taille ou de taille intermédiaire. On citera à l'annexe 3.2 le domaine des rayons X, où plusieurs missions européennes en bilatéral sont concurrentes de la "pierre angulaire" de l'ESA nommée

XMM), et le même phénomène, toujours dans le même domaine des rayons X, à l'annexe 3.3.

Il faudra donc revoir les processus de décision à la lumière de ces difficultés reconnues, et traiter le problème. Comme cela a été maintes fois souligné, *l'ESA manque d'une référence régulière à une conférence des ministres*, conférence qui examinerait à intervalles assez proches les problèmes en suspens entre les états membres et l'Agence, et agirait pour une coordination et une gestion optimisée des ressources européennes. Le Conseil de l'Agence peut de droit se réunir au niveau des ministres.

5.2.4 Les relations avec la NASA

Lorsqu'intervient une collaboration ESA-NASA, certaines différences dans les procédures compliquent les décisions. Les coûts ne peuvent être facilement comparés, car le budget scientifique de l'ESA doit couvrir les frais de lancement (sauf si le partenaire NASA le fournit), alors qu'à la NASA ce coût n'est pas imputé à la mission. Par contre, la NASA finance et comptabilise les instruments ainsi que le traitement des données, alors qu'en Europe, sauf exception, ces deux responsabilités reviennent aux agences nationales.

La sélection des instruments, dans une telle collaboration, est de la difficulté d'un casse-tête chinois si les deux agences décident de fonctionner chacune avec leur comité de sélection.

Après la sélection, la responsabilité de la construction de l'instrument revient à l'agence qui le finance, par exemple la France. Mais les décisions prises à différentes étapes ont de fortes répercussions sur l'ensemble du projet, qui est lui, dans le cas qui nous occupe, sous la responsabilité de l'ESA. Cela conduit parfois à des *conflits entre ESA et agence nationale (ici le CNES) pour lesquels il n'existe aucun mécanisme formel de solution*. Mais l'ESA a instauré des concertations officieuses (par exemple pour ISO et HUYGENS).

5.3 Le financement de la recherche spatiale en sciences de l'univers. Budget scientifique du CNES et de l'ESA.

5.3.1. Le contexte à l'ESA et au CNES

Le problème crucial est celui de la *croissance* du budget consacré à la recherche.

A l'ESA, suite à l'adoption en 1985 du plan à long terme Horizon 2000, la direction du programme scientifique a obtenu l'assurance que le budget scientifique croîtrait de 5% par an durant cinq ans, mesure qui a été étendue par le Conseil de l'Agence jusqu'à 1994. Ce budget est en 1991 de 252.9 MUC (y compris les reports). La France y participe pour 18%, au budget primitif, soit 288 MF. On rappelle que ces sommes correspondent aux sciences de l'univers telles que nous les considérons, et excluent l'observation de la terre et la recherche en sciences de la vie et en microgravité.

Au niveau français, le budget scientifique du CNES (qui cette fois inclut l'océanographie et les sciences de la terre) croît plus vite que le budget des autres grands organismes de recherche, et donc sensiblement plus vite que la richesse nationale (voir annexe 6). Comment le budget scientifique du CNES est-il construit et décidé?

5.3.2 Les arbitrages au niveau français

Le budget scientifique du CNES est discuté chaque année à l'intérieur de la dotation totale de cet organisme, avec un horizon formulé à plusieurs reprises par le Conseil d'Administration selon lequel la part Sciences/ Dotation totale devrait atteindre 10%. L'annexe 6 montre qu'on n'y est pas encore. Les deux ministères de tutelle du CNES (recherche et technologie, transport, équipement et espace) appuient cet effort vers l'horizon 10%. Il n'y a pas de véritable argument en faveur de ce rapport, sauf une ressemblance avec le volume relatif consacré par la NASA à son programme scientifique (voir section 5.3.4). On peut noter que les programmes d'application au CNES ne sont pas régis par une règle semblable à celle des 10%.

Le ministère du Budget, quant à lui, a pour méthode de comparer la science que fait le CNES à celle dont sont responsables les organismes comme le CNRS, l'IFREMER etc..., et il récuse année après année le taux de croissance du budget scientifique du CNES: ce dernier est au moins le double, sinon le triple, de celui de ces organismes. Pour former son jugement, le ministère du Budget fait travailler ses propres experts, et intervient sur le contenu des programmes. L'arbitrage final a lieu chaque année à très haut niveau.

Alors que le budget est annuel en France, les très grands programmes spatiaux s'étendent sur plusieurs années. Lors de la construction du budget du CNES, les engagements internationaux sont donc respectés. Si un nouveau grand projet est à décider, il peut y avoir une réunion interministérielle consacrée à ce projet et précisant les engagements financiers pluriannuels.

Le budget du CNES est présenté au Parlement en même temps que le BCRD (budget civil de recherche et de développement), dont il fait partie, par le ministre de la recherche et de la technologie. Le budget scientifique, qui se trouve en Autorisations de Programmes, est ensuite versé sur le budget du ministère de l'espace.

5.3.3 La conduite de chaque projet au CNES

Nous considérerons ici ce qui se passe dans le cadre français. La direction de la recherche au CNES répartit les budgets annuels affectés à chaque projet, et surveille leur mode de dépense. Le problème principal est celui de savoir ce qu'on fait quand les coûts débordent les affectations. Les méthodes ne sont pas originales: essai de réduction des dépenses, plaidoirie pour un budget complémentaire, étalement du projet. Il faut cependant noter qu'il est usuel de prévoir tout budget

de construction spatiale avec une marge d'aléas, mais au CNES il n'y a pas de marge d'aléas sur les expériences.

On peut ici évoquer la philosophie d'assurance-qualité qui prévaut dans la science spatiale, et faire quelques comparaisons avec les méthodes utilisées au sol. Le taux de succès des missions scientifiques spatiales est, contrairement à l'impression donnée au grand public par le Hubble Space Telescope, très élevé (voir sections 3.2 et 4.2). Ceci tient aux méthodes de réalisation des instruments et satellites dans les laboratoires et dans l'industrie, mais aussi, comme cela a déjà été souligné, au processus de décision qui force une discussion approfondie et une bonne maturation des projets avant décision. Si l'on compare expériences au sol et expériences dans l'espace au sein de la discipline astronomie, on constate que les taux de succès et le respect des calendriers et des budgets sont souvent meilleurs pour l'espace que pour le sol. Citer des exemples serait désagréable...

Soulignons aussi que le CNES ne se borne pas à financer le matériel des expériences. Sur sa ligne budgétaire "soutien des laboratoires" (voir annexe 6), il veille à l'état des équipements de base de laboratoires (cuves à vide, pots vibrants, sources pour étalonnage etc...) et essaie de les remplacer à temps. Compte tenu des difficultés des laboratoires spatiaux dues aux départs répétés et non complètement remplacés de personnel technique dans les dernières années (voir section 8), et compte tenu de ce que les expériences spatiales ont des calendriers fixés et tendus, le CNES est aussi amené à financer des personnels temporaires sous forme d'embauches sur contrats à durée déterminée.

La conduite des projets spatiaux souffre de ce que le processus de décision de ces projets exclut le CNRS, qui est pourtant le principal pourvoyeur de personnel et des crédits de soutien des laboratoires (voir annexe 1: à l'exclusion du Service d'Astrophysique du CEA, tous les laboratoires spatiaux en sciences de l'univers sont liés au CNRS), et qui est censé soutenir l'exploitation des données spatiales (alors qu'aux Etats-Unis, c'est la NASA qui le fait). On peut résumer la situation en disant que le CNRS ne peut faire face, car ses crédits croissent au mieux de 5% par an, tandis que les crédits proprement scientifiques du CNES croissent de 10 ou 15%.

Un remède à ce déséquilibre, qui a été élaboré à la suite du colloque de prospective "Terre, notre Planète" organisé par le ministère de la recherche et de la technologie en 1990, consisterait à ne décider d'un projet qu'une fois son budget consolidé soigneusement établi. Ce budget consolidé comporterait les crédits nécessaires à la construction des instruments, mais aussi les crédits de personnel, le coût du fonctionnement des laboratoires, celui des missions et enfin le coût du traitement et de l'analyse scientifique des données résultant de l'expérience. Le CNES et le CNRS s'entretiennent de la mise en place de ce système, dans lequel chacun contribuerait financièrement pour une part clairement affichée à l'avance.

En ce qui concerne le CEA, il se trouve dans une situation singulière, en ce sens que le CNES a passé un accord avec lui. Aux termes de cet accord, le CEA finance à parité avec le CNES le matériel spatial de la partie des expériences qu'il réalise (voir annexe 4), ce que le CNRS ou les universités ne font pas.

5.3.4 Difficultés propres au budget scientifique de l'ESA

Nous avons donné plus haut le niveau et le taux de croissance de ce budget. Récemment, suite à un rapport demandé à un groupe d'experts européens (Science Programme Review Team, rapport Pinkau), le budget scientifique a été examiné quant aux charges qu'il supporte et quant aux économies qui pourraient lui être appliquées. Les charges imputées au budget scientifique et correspondant à la sous-utilisation d'équipements généraux de test disponibles à l'ESA, ont été réduites, ce qui est un gain pour le budget. Les dépenses doivent de leur côté être réduites par la mise en oeuvre de nouvelles procédures de gestion.

Cependant le programme scientifique de l'ESA doit faire face à des *dépenses imprévues*. Celles-ci peuvent être dues aux aléas de la coopération internationale: c'est ainsi que le retard au lancement du Hubble Space Telescope, du à la catastrophe de la navette Challenger, a coûté au budget scientifique de l'ESA, en cumulé, 100 MUC; il en est de même les difficultés liées au retard du lancement de la mission de survol des pôles solaires Ulysses (retard dû à des décisions unilatérales des américains et à l'accident de la navette Challenger). D'autres dépenses imprévues peuvent être induites par des incidents techniques: ainsi celles résultant d'une part d'un retard de disponibilité du lanceur et d'autre part de ce que l'orbite du satellite Hipparcos n'a pu être l'orbite nominale géostationnaire à cause d'un défaut à l'allumage du moteur d'apogée lors du lancement. Les surcoûts liés à la nécessité d'utiliser des stations de réception au sol supplémentaires se chiffrent en dizaines de MUC.

Certains surcoûts surgissent lorsqu'interviennent des *dépassements* dans la réalisation des programmes. Par exemple, l'observatoire ISO dont il a déjà été parlé est en dépassement de crédits (par 24%) à l'Agence, c'est-à-dire que les aléas usuels prévus pour les missions de l'ESA (5% par an) sont insuffisants pour mener la mission à bonne fin et à temps. Comme on l'a vu plus haut, le SPC statue au coup par coup sur ces dépassements, ce qui est une méthode satisfaisante. Mais on doit souligner que la marge d'aléas sur les missions scientifiques est beaucoup plus faible que sur les programmes optionnels, qui sont autorisés à dépenser jusqu'à 120% du budget initial.

Enfin, on peut se demander si le niveau du budget scientifique de l'ESA est suffisant, compte tenu de la population de l'Europe et de ses capacités scientifiques et techniques. Une étude récente de l'ESA montre que ce budget (qui inclut le coût des lancements) représente en 1990 environ 6% des dépenses totales publiques effectuées pour l'espace en Europe. A la NASA, le budget correspondant (hors lancements) représente 10.1% du budget total NASA. Il faut bien entendu ajouter les

budgets scientifiques spatiaux nationaux au budget de l'ESA pour établir l'effort de recherche spatiale en Europe: celui-ci se monte (lancements inclus) à un peu plus de 9% des dépenses spatiales totales en 1990. Pour des raisons exposées plus haut, ces comparaisons entre Etats-Unis et Europe ne sont pas totalement éclairantes, car le périmètre des programmes scientifiques et celui des dépenses ne sont pas identiques dans les deux ensembles.

On pourrait tirer la conclusion optimiste que l'Europe favorise la recherche spatiale à un niveau *relatif* voisin de celui des Etats-Unis. Mais ce serait ne pas voir qu'en *valeur absolue* le total des dépenses spatiales (ESA + programmes nationaux en Europe, incluant la science et les autres programmes) n'est en Europe et en 1990 qu'un tiers des dépenses américaines civiles inscrites au budget de la NASA.

Le niveau global de la recherche spatiale en Europe n'est donc pas aussi bon que le permettraient les ressources disponibles. En ce qui concerne l'ESA, force est de constater que l'agence européenne subit la concurrence (mais jouit parfois aussi de la complémentarité) des projets de recherche spatiaux nationaux: ce point sera discuté à la section 6.3.3.

5.3.5 L'effort scientifique spatial français en comparaison de celui des principaux partenaires européens

L'annexe 7 rassemble pour l'année 1990 les contributions de la France, de l'Allemagne, de l'Italie et de la Grande Bretagne, d'une part au programme scientifique obligatoire de l'ESA, d'autre part aux instruments emportés sur les missions de l'ESA, enfin l'effort national, hors ESA, de chacun de ces pays. La dernière colonne donne la part de la France en comparaison de l'effort total des pays de l'ESA.

On peut conclure de ce tableau:

- que la France est le premier état pour sa contribution financière totale à l'ESA (30%), mais que sa part est plus considérable pour les applications que pour la science
- que la France, qu'il s'agisse de sa contribution à l'ESA ou de son programme national, ou de l'ensemble, ne consacre à la recherche sur l'univers qu'une fraction du budget scientifique européen correspondant à sa part de PNB (18%)
- que l'Allemagne est actuellement le pays d'Europe qui consacre les budgets les plus importants, en valeur absolue, à la recherche spatiale, la France étant le second
- qu'en valeur relative, la France est le pays dont le ratio: "total science spatiale sur contribution totale à l'ESA" (ligne 6/ligne 1) est le plus faible, ce qui illustre le fait que la France fait un effort majeur vis-à-vis des programmes d'application dans le cadre ESA
- que la France ne tire pas le parti le plus grand des missions scientifiques de l'ESA puisque le ratio "contribution aux instruments emportés/contribution au programme scientifique de l'ESA" (ligne 3/ligne 2) est pour la France le 3ème parmi les quatre grands pays.

5.4 Interaction des agences spatiales avec les industriels.

S'agissant du programme scientifique, les industriels peuvent intervenir à deux niveaux: construction des satellites; construction des expériences. Durant le processus qui va de l'idée d'une mission à la décision de réalisation, l'industrie spatiale est déjà impliquée. Elle répond aux appels d'offre industriels que lancent les agences (ESA, CNES) pour des phases d'étude (A et B) puis pour des phases de construction d'expériences ou de satellites. Elle est également "cliente" des programmes de recherche et technologie dont l'orientation indique vers quelles technologies les agences se tournent pour l'avenir.

5.4.1 Construction des satellites

Lorsqu'une mission a été décidée, le choix d'un maître d'oeuvre industriel revient à l'ESA, si nous nous plaçons dans le contexte européen (la France n'a pas à l'heure actuelle de programme de satellite scientifique national). Les industriels français sont assez expérimentés pour emporter de nombreux contrats de maîtrise d'oeuvre. Par exemple, MATRA est maître d'oeuvre pour le satellite SOHO, Aérospatiale pour ISO et pour la sonde de rentrée dans l'atmosphère de Titan HUYGENS. Lorsqu'un industriel a emporté un tel contrat, il consulte le CNES pour la répartition des tâches entre laboratoires et industriels sous-traitants.

5.4.2 Construction des expériences

Dans les premiers temps de la recherche spatiale, les expériences étaient entièrement construites dans les laboratoires. Aujourd'hui, les expériences sont, pour certaines, devenues très complexes, et leurs différentes sous parties sont confiées à des laboratoires différents et/ou à des industriels. Le recours aux industriels ne fait l'unanimité ni chez les scientifiques, ni chez les payeurs: il est clair que la motivation pour le succès d'une expérience et les raisons de maintenir la cohérence des équipes se trouvent sans doute plus là où les idées sont nées, c'est-à-dire dans les laboratoires; par ailleurs *la réalisation industrielle coûte plus cher que celle qui est confiée aux laboratoires, mais surtout elle ne coûte pas aux mêmes organismes*. Mais il faudra probablement se résoudre à terme à accroître la part de réalisation industrielle, compte tenu du manque de personnel technique dans les laboratoires (voir section 8), et alors que le rythme de croissance du programme spatial est rapide. Cependant, si les laboratoires passent des contrats avec l'industrie, le contrôle des sous-traitants exige aussi du personnel.

Ceci amène à poser la question de la maîtrise d'oeuvre complète dans l'industrie: les disciplines des sciences de l'univers sont opposées à cette solution non adaptée à la réalisation d'instruments offrant les capacités ultimes autorisées par la technologie du moment. Un partage intelligent des tâches et une forte collaboration entre laboratoires et industrie permettront seuls d'atteindre ce but (voir section 8).

A l'intérieur du programme scientifique obligatoire, l'ESA se préoccupe que le retour à l'industrie soit en proportion des dépenses effectuées par le pays qui reçoit un contrat de maîtrise d'oeuvre de mission. C'est le principe du juste retour.

5.5 Le principe du juste retour.

La convention de l'ESA lui fait obligation, lorsqu'il s'agit de passer un contrat, de donner une préférence aux industries et aux organisations de ses états-membres, et d'appliquer une règle de répartition géographique des contrats. Cette dernière devrait assurer que le coefficient de retour *global* pour chaque pays est voisin de 1. Ce coefficient est le rapport du montant des contrats que ce pays a reçu au montant de ses contributions totales à l'ESA.

En réalité, l'ESA applique la règle du juste retour programme par programme, et non globalement. Pour ce qui nous concerne, le programme scientifique étant alimenté par des contributions qui sont définies par le PNB (par tête) de chaque état membre, le retour industriel y est proportionnel au PNB. La France reçoit ainsi en principe 18% des contrats industriels passés par l'ESA au titre du programme scientifique. En réalité, le conseil de l'ESA se réunissant au niveau des ministres a même fractionné l'application de la règle du juste retour jusqu'au niveau de sous-programmes ou de phases de programmes, ce qui complique et rigidifie le système, et augmente inévitablement le coût des programmes, puisque toute restriction à la concurrence va dans ce sens.

Quel jugement peut-on porter sur cette pratique appliquée au programme scientifique? Le rapport Pinkau, déjà cité, s'est penché sur cette question du point de vue de l'ESA. Nous ferons ici quelques commentaires additionnels.

Comme on l'a vu, les industriels français sont bien placés pour recevoir des contrats de maîtrise d'oeuvre. Ceci a pour résultat d'une part que les industriels d'autres pays parviennent plus difficilement à être maîtres d'oeuvre, et d'autre part que d'autres industriels français, qui ne sont pas les grands de l'industrie spatiale (les équipementiers par exemple) n'ont que peu de chance d'obtenir des contrats. Ceci crée à la fois un problème interne à la France, problème de politique industrielle qu'il lui appartient de gérer, et un problème externe, de relations grands pays-petits pays au sein de l'Agence. Les petits pays seraient réduits à ne fournir que des composants, alors que les plus grandes puissances spatiales se tailleraient une part du lion en se voyant confier les tâches les plus gratifiantes. Face à ces critiques, l'ESA tient bon, faisant valoir que sa politique industrielle favorise finalement le développement technique avancé des pays membres moins développés. Ainsi l'Espagne et l'Italie ont pu en quelques années parvenir à monter une industrie spatiale, et amener leurs industriels à assurer la maîtrise d'oeuvre de projets. Cette argumentation de l'ESA, qui maintient qu'aucun système meilleur que la règle du juste retour n'a été proposé, devra s'harmoniser avec la mise en vigueur en 1993 de l'Acte

Unique Européen, selon lequel le marché intérieur européen devrait être totalement ouvert et compétitif, sans clauses de retour qui apparaissent comme des privilèges. La Communauté Européenne et l'ESA discutent des modalités d'harmonisation de leurs textes fondamentaux respectifs.

Quoi qu'il en soit du résultat de ces discussions, du point de vue du programme scientifique (voir rapport Pinkau) et des directions d'agences, il semble clair que cette règle du juste retour représente un poids pour le programme scientifique qu'il faut tenter d'alléger au maximum.

Section 6

QUELS SONT LES PRINCIPAUX CHOIX SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUESA EFFECTUERA L'HEURE ACTUELLE ET A L'HORIZON 2000 ET AU-DELA?

L'existence et la poursuite d'un programme scientifique d'étude spatiale des sciences de l'univers dépendent d'abord et totalement de la volonté des bailleurs de fonds publics. Comme on l'a déjà souligné, la motivation d'un tel programme est avant tout désintéressée, même s'il y a des retombées économiques et technologiques importantes (voir section 7). Nous faisons donc l'hypothèse que ce soutien public ne fera pas défaut, à l'horizon 2000 et au-delà.

Il est ici frappant de citer le rapport du Comité consultatif sur l'avenir des programmes spatiaux (rapport Augustine), remis en décembre 1990 au Vice-Président des Etats-Unis en sa qualité de président du Conseil National de l'Espace. La première recommandation de ce rapport est la suivante: *"C'est notre conviction que le programme de science spatiale mérite la plus haute priorité de financement. Selon notre jugement, il occupe un rang supérieur à celui des stations spatiales, des avions spatiaux, des missions habitées vers les planètes et beaucoup d'autres entreprises majeures qui reçoivent souvent une plus grande visibilité. C'est cet effort pour la science qui rend possible la découverte et la compréhension de base, qui permet la connaissance fondamentale de notre planète en vue d'améliorer la qualité de la vie pour tous les peuples de la terre, et qui stimule l'éducation des scientifiques dont nous avons besoin pour l'avenir. La science donne vision, imagination et direction au programme spatial, et en tant que telle elle devrait être vigoureusement protégée et être autorisée à croître. Le programme scientifique devrait être maintenu à un niveau supérieur ou égal à ce qu'il est dans le budget de la NASA, même si le budget total croît."*

Les termes de cette recommandation (rédigée principalement par des non-scientifiques) peuvent être adoptés tels quels, s'agissant du programme scientifique de la France et de celui de l'ESA.

Analysons maintenant les principaux choix scientifiques et technologiques qui doivent être effectués à l'heure actuelle et dans les prochaines années jusqu'à l'horizon 2000 et au-delà, et qui sont de la responsabilité de la France. Ces choix se présentent selon deux horizons qui ne sont pas de même nature: les uns concernent la politique nationale en relation avec

celle de ses partenaires, les autres se réfèrent aux interfaces entre la recherche spatiale en sciences de l'univers et d'autres chapitres de l'activité spatiale. Nous tenterons ensuite d'apprécier leur pertinence et leur cohérence.

6.1 Le cercle de la politique nationale en matière de recherche spatiale scientifique.

6.1.1 En premier lieu, il est vital d'assurer la formation de jeunes chercheurs dans la pratique de la recherche spatiale. Les laboratoires français ont en effet de 25 à 30 ans d'existence. La première génération de chercheurs spatiaux aborde l'âge de la retraite, laissant derrière elle des conditions de réalisation des expériences bien différentes de celles qu'elle a connues: la compétition pour la sélection d'une expérience est très vive et se produit de plus en plus souvent dans un cadre international, on se dirige vers une part de plus en plus importante de réalisation d'instruments dans l'industrie, les délais de réalisation sont devenus très longs par rapport à la durée de vie d'un chercheur. Quelle peut alors être la motivation d'un jeune chercheur pour la recherche spatiale dans un laboratoire universitaire?

Afin de faire l'expérience "de la vision, de l'imagination et de l'inspiration" que développe la recherche spatiale, il est nécessaire que les jeunes aient accès à *la construction d'expériences de petite taille*, et n'attendent pas durant des périodes très longues les résultats des grandes missions. Ces expériences de petite taille seraient lancées avec des lanceurs modestes (puisque l'un des avatars les plus cuisants du programme spatial américain est que la Navette n'a pas rempli son rôle de transporteur et de lanceur à *bon marché*). Le programme ballons joue en principe le rôle, en France, de fournisseur de véhicules à relativement bon marché. En réalité, la restriction des crédits sur ce programme rend aléatoire son utilisation à cette fin. Faudra-t-il alors se tourner vers le système Pegasus, mis au point par un affrêteur privé, ensemble d'un avion B52 et d'une fusée que celui-ci lance vers l'altitude de 12000 m, et qui elle-même lâche des charges satellisables? Ou envisager de développer un lanceur classique léger? On reviendra à ce point à la section 6.2.

Les jeunes chercheurs sont aussi le seul garant que les laboratoires ne s'enfermeront pas dans leurs "spécialités" historiques, et qu'ils injecteront des *idées nouvelles* dans le champ de l'exploration de l'univers. Une certaine souplesse dans la composition des équipes sur les grands projets est bénéfique pour une solution partielle de ce problème. De même, et quoique ce rapport ne l'ait pas beaucoup mentionné jusqu'ici, la recherche spatiale qui touche à la physique fondamentale, étude de la gravité, vérification du principe d'équivalence ... pourrait être amenée à prendre de l'importance dans l'avenir. Il faudra de jeunes esprits pour conduire l'avancée de la connaissance dans ce champ nouveau. Des projets sont à l'étude (Gravity-Probe à la NASA, Space Test of the Equivalence Principle ou STEP à l'ESA, voir annexe 3.3).

Si les jeunes chercheurs doivent avoir l'opportunité de se lancer dans la recherche spatiale, il faut constater que les scientifiques *instrumentalistes* font souvent des carrières plus lentes que leurs autres collègues, car ils publient moins. Cet obstacle est une source d'inquiétude quant à de possibles recrutements.

6.1.2 Se pose ensuite la question de l'articulation du programme national avec le programme de l'ESA. Comme on l'a vu (section 5.3.4), l'Europe est encore loin derrière ses partenaires américains quant au niveau des ressources consacrées à la recherche spatiale. Faut-il donc renforcer l'Europe à travers l'ESA, ou au contraire faire croître les programmes nationaux?

D'une part, le programme national français a été fructueux, notamment par l'établissement de bonnes collaborations bilatérales. Tous les laboratoires ont obtenu de bons résultats (voir annexe 2) et travaillent d'arrache-pied à leur interprétation. Mais ceci durera-t-il? Une incertitude plane sur le futur à horizon de cinq ans, car les principales collaborations internationales sont fragilisées: les Etats-Unis sont devenus moins fiables depuis déjà plus de dix ans ce dont témoigne la remise en cause par eux et de façon unilatérale d'accords de type Memorandum of Understanding; l'Union Soviétique est instable politiquement, ce qui risque de mettre en cause les plans à long terme annoncés.

D'autre part, la science spatiale est une science chère (à titre d'exemple 1kg d'électronique embarquée coûte 1 MF, 1kg de matériel embarqué en optique, mécanique ou cryogénie coûte 1.2 MF). C'est pourquoi elle ne peut se permettre de duplication, sous peine de compromettre la science moins lourde, qui en sciences de l'univers requiert elle aussi des équipements non négligeables (voir annexe 4). Or l'examen des annexes 3.2 et 3.3 ne rassure pas totalement sur ce point de la duplication: nous l'avons explicité plus haut à propos des expériences X. Il est clairement dommageable que les programmes nationaux en Europe soient par certains aspects en concurrence avec ceux de l'ESA.

Il parait donc justifié de poursuivre à l'échelle nationale:

1) des programmes d'initiation des jeunes chercheurs. Ce n'est pas ce caractère d'initiation qui empêche de tels programmes de servir brillamment des idées scientifiques nouvelles.

2) des programmes bilatéraux particuliers qui sont d'une originalité suffisante sur la scène mondiale.

Pour les autres projets, une intégration européenne de plus en plus poussée doit être recherchée. Si la France adoptait une telle position, il lui serait sans doute très facile de la faire admettre à ses partenaires au sein de l'Agence, eux-mêmes tentés depuis quelques années, sur l'exemple français, de développer des programmes nationaux.

6.1.3 Le cas de la coopération franco-soviétique. Comme on l'a souligné (section 4.2), cette coopération a été extrêmement intéressante pour la France quant au rapport coût/résultats. Son avenir est incertain, et dépend de l'évolution des structures politiques et économiques en Union Soviétique. Au moment où la France doit redéfinir sa position par rapport à l'Union Soviétique, et quitter la place de partenaire privilégié (parce que le premier en date) qui a été la sienne, il convient de souligner ce que de son côté la France a apporté à cette coopération: des instruments bien étudiés, fournissant d'excellents résultats quand le contexte de la mission était favorable, et la capacité de gérer ces expériences avec une détermination et un dévouement remarquables. Les soviétiques connaissent la richesse de cet apport. Ne serait-il pas alors profitable pour les deux parties qu'un mode nouveau de coopération se noue, qui tienne compte du potentiel technique et des capacités de lancement considérables de l'Union Soviétique, et qui associe les deux pays en des "joint ventures" bien ciblées? Ainsi l'utilité des réalisations soviétiques serait valorisée par effet d'écho à l'intérieur du pays, on contribuerait peut-être à éviter qu'une régression intervienne dans les efforts spatiaux soviétiques, en contrepartie de quoi la France pourrait se garder de dupliquer des développements déjà bien avancés en URSS (on a adopté cette attitude pour certains équipements d'Hermès...).

6.1.4 L'entrée en scène du Japon. Les annexes 3 montrent sans ambiguïté la montée en puissance du Japon. Ce pays de 123 millions d'habitants (2.2 fois la France) développe dans une optique nationale un programme scientifique qui couvre de nombreux objectifs et qui le place en position de 4ème puissance mondiale (après les Etats-Unis, l'URSS, et l'ensemble des 13 pays d'Europe faisant partie de l'ESA) pour la recherche spatiale. Ce programme est conduit par l'Institute of Space and Astronautical Science (ISAS). ISAS a développé ses propres véhicules de lancement et son champ de tir, tandis qu'existe une autre agence (NASDA) chargée du programme spatial d'applications. Les budgets respectifs de ISAS et NASDA sont dans un rapport 1 à 5, le total du budget espace du Japon étant proche du budget du CNES. La stratégie d'ISAS ne lui interdit pas de monter des collaborations internationales, mais cette agence montre qu'elle peut aussi conduire seule des projets de grande ampleur. En témoigne le début d'un programme d'étude de la Lune (voir annexes 3, MUSES A a été lancé, LUNAR A est approuvé). Jusqu'à aujourd'hui, ayant misé ailleurs pour ses collaborations bilatérales, la France collabore très peu avec le Japon en sciences de l'univers. Faudra-t-il changer d'attitude? *Cette collaboration, dont les termes nous sont mal connus, aurait sans doute avantage à s'établir avec l'ESA, qui d'ailleurs a déjà essayé de collaborer avec le Japon, sauf s'il s'agissait de monter des projets bilatéraux particulièrement originaux.*

6.1.5 Comment conduire les très grandes missions spatiales? L'exemple du programme lunaire japonais, l'initiative Lune-Mars du Président Bush et les réflexions menées en France et à l'ESA sur l'éventualité d'un programme "Lune" européen amènent à se poser à nouveau la question de la duplication des efforts et

des dépenses, alors que les ressources ne croissent pas en proportion du coût de ces grandes aventures. Comme on l'a vu déjà (section 4.6), de telles entreprises ont un double aspect: celui d'alimenter le rêve d'exploration in situ de l'univers proche et en même temps celui de faire progresser la science. Faut-il que de tels projets se forment dans le contexte national, européen, mondial? La réponse est évidente, vue d'un point de vue français et dans l'optique d'éviter le gaspillage: un programme "Lune" ou un programme "Mars" s'achevant, peut-être au 21ème siècle, peut-être plus tard, par la colonisation de ces objets, ne peuvent être nationaux. Ils peuvent à la limite être européens, mais ce terme doit désormais être pris dans son acception complète: il faudrait associer à l'Europe spatiale traditionnelle l'URSS, ou la Russie, qui disposent d'emblée des lanceurs nécessaires.

La réflexion sur ces perspectives conduit à souhaiter le renforcement d'une instance de concertation mondiale sur les projets (il existe déjà IACG = InterAgency Cooperation Group, qui est intervenu pour coordonner les actions lors du passage de la comète de Halley) ainsi que celle d'une instance de coordination des réalisations. Les agences ESA, NASA, CNES, Interkosmos et ISAS sont concernées au premier chef par la mise en place ou l'animation de telles structures, qui ne devraient pas être un autre ONU, mais des organes technico-politiques au service des puissances spatiales.

6.2 Le cercle de la recherche spatiale en sciences de l'univers au sein des autres activités d'un programme spatial.

6.2.1 Financer les disciplines spatiales nouvelles. Les sciences de l'univers sont un des plus anciens thèmes de l'activité spatiale. Mais elles ne sont plus aujourd'hui les seules sciences à progresser grâce à l'emport d'expériences dans l'espace. C'est ainsi que l'observation de la Terre, érigée pour des motifs économiques ou stratégiques au rang d'application spatiale avant même qu'intervienne l'intermédiaire obligé qu'est la recherche fondamentale, devient en un second temps une discipline scientifique à part entière, sur laquelle repose fortement l'étude de l'évolution du climat due à l'effet de serre. De même, c'est ainsi que la physique de la matière condensée profite des acquis des vols en condition de microgravité.

Dans un rapport traitant des sciences de l'univers, il nous faut affirmer quelques points:

1) Il n'y a rien à gagner, ni pour les finances à injecter, ni pour les résultats à obtenir, à traiter ces disciplines comme des appendices (ou des préalables) de programmes d'application. Elles doivent être développées en dehors de toute pression politique ou industrielle. C'est ainsi qu'elles apporteront les meilleures bases aux programmes d'application.

2) Ces disciplines nouvelles doivent être financées au sein de nouveaux programmes obligatoires de l'ESA. Il est souhaitable qu'elles le soient sur la même base d'évaluation scientifique que les disciplines "majeures" que sont les sciences de l'univers plus anciennes.

3) S'agissant de l'observation de la Terre, de nombreuses techniques (radiométrie, imagerie, spectroscopie etc...) sont disponibles chez les astronomes. Il serait malencontreux de redévelopper à grands frais des instruments qui ont fait leur preuve ailleurs, dans l'étude du système solaire.

Ces remarques nous paraissent s'adresser plus à l'ESA qu'au CNES, encore que l'organisation du CNES ne permette pas encore de voir tous les programmes scientifiques d'observation de la Terre regroupés dans la Direction de la Recherche.

6.2.2 Retour sur les stations spatiales. Nous avons exposé (section 4.5) les motifs qui nous font dire que les stations spatiales habitées de façon permanente ne sont pas utiles pour le développement des sciences de l'univers. Pour le programme scientifique en sciences de l'univers, des stations robotisées peuvent apporter des résultats à bien moindre coût et à moindres risques.

6.2.3 La politique des lanceurs. L'Europe dispose d'un programme de lanceurs, Ariane. Le programme scientifique utilise Ariane 4 et fera appel à Ariane 5 quand cette fusée sera disponible (voir annexe 3.2). Mais un lancement Ariane est cher pour la ligne sciences du budget du CNES ou de l'ESA: 70 à 100 MUC (soit environ 500 à 700 MF). Sauf pour les très grandes missions spatiales, des lanceurs moins puissants qu'Ariane seraient suffisants. Aux Etats-Unis, le programme Explorer se limite à des fusées Thor Delta ou Scout.

Le gigantisme des lanceurs disponibles en Europe permet, mais peut-être aussi encourage, les missions de grande envergure. Non que celles-ci ne soient justifiées: elles le sont. Nous soulignons simplement la nécessité de disposer d'un lanceur plus petit, dont le coût de lancement se situe autour de 100 MF et qui permette de *lancer plus fréquemment* des missions de petite taille (1 tonne maximum). Le CNES vient de présenter un tel concept de petit lanceur à poudre.

Ainsi ce n'est pas le programme scientifique qui réclame un lanceur lourd post Ariane 5, qu'il soit de technique classique, à moteur combiné ou à propulsion nucléaire. Les deux bénéficiaires majeurs des programmes de lancement avancés sont d'une part le programme "Homme dans l'espace" et d'autre part les programmes habités "Lune" et "Mars", dont nous avons souligné le caractère mixte: caractère exploratoire (au sens de Christophe Colomb), et donc programmes décidés pour des motifs technologiques, culturels, ou de prestige, et caractère scientifique.

6.2.4 L'immense question de l'utilisation des données spatiales
Les expériences spatiales en sciences de l'univers fournissent de grandes quantités de données, qui sont transmises vers le sol par un système d'antennes et grâce éventuellement à des satellites relais: le débit de données est de 100 bit/sec⁽¹⁾

(1) Un bit est une unité d'information. Il faut 8 bits pour représenter un caractère. On appelle byte l'unité correspondante: 1 byte = 8 bits. Voir glossaire.

pour telle expérience sur Ulysses qui fait essentiellement des mesures électriques, de 1000 bit/sec pour l'ensemble des instruments embarqués sur cette même sonde ; il est de 1 million de bit/sec (1 Mbit/sec) pour la Faint Object Camera du Hubble Space Telescope, qui fait des images à pouvoir de résolution élevé etc... Ces données sont cependant moins nombreuses que celles qui proviennent des expériences d'observation de la Terre, où non seulement les mesures physiques sont enregistrées, mais où elles le sont répétitivement, puisque tous les phénomènes sont variables, avec des temps caractéristiques de variabilité très différents (100 millions de bit/sec, qu'on écrit 100 Mbit/sec, pour la future mission EOS= Earth Observing System, de la NASA).

Or, pour tirer le meilleur parti des données spatiales et assurer ainsi le retour scientifique des expériences et des missions, il faut:

- 1) disposer des données dans les laboratoires: question de transmission du satellite ou de la sonde vers le sol, puis de la station de collecte vers le laboratoire, à travers les réseaux numériques existants, ou si ceux-ci sont insuffisants, au moyen de disques optiques qui circulent par la poste
- 2) savoir retrouver les données, si on ne les a pas encore: question d'archivage et de disponibilité de répertoires et de catalogues
- 3) pouvoir les analyser et les traiter scientifiquement: question de documentation adéquate sur l'étalonnage des expériences, afin de passer des données "brutes" aux données élaborées, mais aussi question d'équipement informatique, et de personnel informaticien, car un interface doit nécessairement exister entre les bits d'information fournis par une expérience, et les utilisateurs.

Voyons comment se présente la mise en oeuvre et le financement de ces tâches.

La réception des données venant d'une expérience embarquée n'est pas une tâche légère. L'agence qui est responsable du projet intervient pour mettre en oeuvre les antennes de réception et pour assister les expérimentateurs, ou s'il s'agit d'un observatoire en orbite, pour alimenter en données les chercheurs qui ont présenté un programme d'observation accepté. Souvent se produisent des retards, ou simplement des difficultés dues à une compréhension encore imparfaite de l'expérience. Une amélioration constante de cette phase de recueil des données doit être recherchée.

En France, la tâche de conserver les données spatiales obtenues dans le programme national est assurée par le CNES. A l'ESA, on a réalisé l'archivage des données obtenues par les satellites IUE et EXOSAT. C'est pour IUE que l'effort a été conduit de la façon la plus remarquable. L'archive contient actuellement 200 milliards de byte (200 Gbyte) de données. Chaque laboratoire, spatial ou non, peut interroger l'archive dans un langage très clair; il peut accéder à une partie de celle-ci (80 Gbyte) sous forme de données déjà calibrées et prêtes pour l'analyse scientifique via le réseau commercial TRANSPAC. L'archivage des

données du Hubble Space Telescope a été prévu au niveau européen et au niveau NASA dès les débuts du projet, et en un an de fonctionnement, malgré les difficultés rencontrées par le télescope, il y a déjà plus de 260 Gbyte de données accumulées, soit la moitié de ce qu'a recueilli le satellite IUE en 13 ans de fonctionnement (un livre de poche de 500 pages équivaut à 1 Mbyte, un CD-ROM à 600 Mbyte, soit environ 220 000 pages dactylographiées ordinaires). Ceci montre l'échelle des problèmes: à mesure que les missions spatiales deviennent plus multivalentes et qu'elles mesurent leurs cibles avec des pouvoirs de résolution de plus en plus élevés, la quantité de données reçues augmente rapidement. C'est alors que l'utilité de catalogues bien pensés et tenus à jour apparaît clairement.

Comment interviennent alors les scientifiques utilisateurs?

Le traitement des données dans les laboratoires repose sur l'existence d'un matériel informatique et d'un personnel informaticien et scientifique performants et sur la disponibilité de crédits de fonctionnement. On retrouve ici la question déjà évoquée (section 5.3.3) de la nécessité de prévoir les crédits nécessaires à cette phase des opérations dès le début du lancement d'un projet: le budget consolidé d'une expérience spatiale doit d'emblée inclure les crédits qui permettront d'amener jusqu'à la phase d'exploitation scientifique les données qui seront recueillies, et ce budget doit spécifier qui assumera le coût de l'élaboration des données. Le CNRS ne peut être pris au dépourvu chaque fois qu'une expérience ou une mission spatiale réussit!

Pour conclure cette section, insistons encore sur deux faits:

- Les données spatiales peuvent être utilisées durant des années et des décennies. Des crédits sont donc nécessaires, sur un mode régulier (c'est-à-dire non lié à l'expérience-mère, qui peut être achevée depuis longtemps) pour traiter ou retraiter ces données acquises à grand prix, et les confronter aux théories au fur et à mesure que celles-ci se développent.
- La remarque qui précède s'applique aussi aux données provenant des missions spatiales à la construction desquelles nous n'avons pas participé. Ainsi le satellite IRAS a fourni à partir de 1985 une base de données unique sur le ciel infrarouge. Un travail considérable de dépouillement et d'analyse a été effectué par les chercheurs français bien que le CNES et l'ESA n'aient pas été impliqués dans la mission. Ce travail, non spécifique des laboratoires spatiaux, n'a cependant pu être mené que par des groupes ayant la capacité de traiter de grandes quantités de données.

6.2.5 La synergie entre le programme de recherche et le programme de R et T. Le CNES est soucieux de préparer les industriels nationaux et les laboratoires afin qu'ils puissent proposer de nouveaux programmes sur des bases technologiques pointues. C'est le but du programme R et T (Recherche et Technologie) que d'oeuvrer en ce sens. En ce qui concerne les sciences de l'univers, une enveloppe est réservée à cette fin, qui s'élève à environ 10% de la part R et T "Systèmes orbitaux"

laquelle représente 2/3 du budget R et T du CNES (391MF au total en 1991). Cela conduit à une enveloppe d'environ 25 MF.

La R et T soutenant le programme scientifique porte sur les thèmes principaux suivants:

- instrumentation
- capteurs
- techniques et technologies ballons.

La ligne R et T Science n'est pas la seule qui contribue au développement de techniques utilisables par le programme scientifique. En effet, des technologies "plate-formes" sont souvent qualifiées au cours d'une mission scientifique, de même pour les techniques "composants électroniques". Ces techniques seront ensuite utilisées à d'autres fins, en particulier celles des applications spatiales.

L'annexe 8 donne une série d'exemples de techniques utilisées pour la première fois dans l'espace à l'occasion de missions scientifiques et ayant d'autres retombées, soit dans le domaine spatial soit à l'extérieur.

L'ensemble des techniques développées à l'occasion du programme scientifique a donné lieu au dépôt par le CNES d'une trentaine de brevets depuis 20 ans, dont 2/3 se rapportent à des développements ballons. Ceci représente 20% du total des brevets déposés par le CNES dans la même période.

On ne saurait insister assez sur la nécessité de permettre à un programme de R et T bien défini et bien contrôlé de se poursuivre et se développer. Déjà en 1988 un rapport de la National Academy of Sciences and National Academy of Engineering soulignait que si le programme spatial américain subissait des déboires, c'était en partie à cause de la décroissance en monnaie constante des crédits consacrés à la R et T. En France, la ligne budgétaire R et T est une ligne fragile, celle sur laquelle on se rabat pour faire des coupes. Ce faisant, on sacrifie le long terme au court terme et on diminue la compétitivité des équipes françaises pour l'avenir. Bien entendu, la contrepartie de cette thèse est la bonne gestion par le CNES de ses crédits de R et T. La seule base valable est celle de la compétition ouverte entre équipes, et l'évaluation des résultats en même temps que ceux des expériences ayant volé.

6.3 Appréciation de la cohérence et de la pertinence des choix

Tous les choix que nous avons mentionnés plus haut ne sont pas encore effectués. Nous les avons analysés en soulignant un certain nombre de *sujets de préoccupation* qu'il est utile de rassembler ici.

6.3.1 L'intérêt scientifique du programme de recherche pourrait-il se tarir? Nous sommes loin de cette situation. Les programmes à l'étude décrits à la section 4 montrent que notre connaissance astronomique de l'univers est encore très incomplète, et que des domaines spectraux nouveaux sont encore à explorer (en particulier le submillimétrique). Notre

connaissance du système solaire requiert elle aussi que l'on s'approche d'objets de grande signification pour comprendre l'origine de ce système: missions vers les petits corps, vers Saturne et Titan etc...

6.3.2 Le programme spatial, national ou ESA, souffre et souffrira s'il se produit des "coups de barre" inconsidérés.

Toute grande entreprise a besoin d'un consensus affirmé sur la direction suivie pour se développer fructueusement. Ceci est particulièrement vrai du programme de recherche spatial, qui ne doit pas courir le risque d'être écrasé si d'autres grands programmes (en particulier d'application) dépassent les coûts approuvés.

6.3.3 La cohérence entre programmes nationaux et programmes conduits par l'ESA doit être vérifiée et confortée par des

mécanismes ayant force juridique, et agissant à intervalles proches. Comme l'ESA n'a pas le moyen d'imposer aux états-membres quelque ligne d'action contraignante que ce soit, dans son fonctionnement courant, il convient de restaurer la pratique d'une conférence ministérielle (ou d'un Conseil de l'ESA au niveau ministériel, ce que prévoit la Convention). Cette conférence devrait suivre, de façon régulière mais souple quant au calendrier de réunion, l'état de l'articulation entre programmes nationaux et programmes de l'ESA. S'agissant du programme scientifique, la collaboration internationale à l'intérieur de l'Europe étant de l'intérêt de tous pour un bénéfice mutuel, la ligne directrice pour la France et les autres états-membres de l'ESA devrait être de privilégier les programmes de l'ESA en cas de duplication prévisible.

6.3.4 Les ressources étant limitées, et ne pouvant croître beaucoup plus que la richesse des pays, il convient de les utiliser avec prudence. Lorsque les programmes voient leur coût dérapier, et qu'une surcharge se produit sur le budget scientifique, les agences doivent immédiatement réviser leur procédures de gestion et la qualité de leurs experts internes. Aucun pays, mais certainement pas la France, ne peut se permettre de manquer de réalisme technologique ou financier.

Pour les programmes les plus lourds (grands observatoires spatiaux, sondes d'exploration du système solaire), dont le coût total est de l'ordre de 1 milliard d'unités de compte (7 milliards de F) ou plus, il est maintenant clair que la duplication même à l'échelle mondiale est un gaspillage.

La redondance des observations, qui est nécessaire à la progression solide de la science, n'impose certainement pas que l'on dispose de deux observatoires ou de deux sondes similaires. Les limites des ressources (financières et humaines) sont telles que la duplication d'une mission dans un secteur donné conduit à repousser de cinq ou dix ans d'autres missions qui auraient pu être conduites plus tôt dans d'autres sous disciplines des sciences de l'univers. La spectroscopie dans l'ultraviolet lointain (inaccessible au HST) ou la spectroscopie gamma sont deux exemples de secteurs où manquent aujourd'hui des informations importantes pour l'interprétation des phénomènes physiques, alors qu'on assiste à une

multiplication déraisonnable des missions X à l'échelle mondiale (voir annexes 3).

Au risque de nous répéter (section 6.1.5), nous insistons donc pour que la coordination de ces très grands programmes s'effectue rapidement à l'échelle mondiale.

6.3.5 L'équilibre entre grandes, moyennes et petites missions doit être constamment recherché. Cela est une tâche difficile, puisque même à l'ESA, qui a affiché cette proposition dans son programme Horizon 2000, les moyennes et petites missions tendent à être des entreprises coûteuses, ne serait-ce que par le fait qu'elles doivent répondre aux souhaits de chercheurs de plusieurs pays, et que le lanceur minimum est Ariane. *L'échelon national nous paraît le mieux adapté à la réalisation de petites missions, à objectifs limités, dont la motivation serait d'entretenir le savoir-faire expérimental sur des échéances de temps pas trop longues et de favoriser l'émergence d'idées d'expériences chez les jeunes chercheurs.*

6.3.6 La base technologique du programme scientifique doit être renforcée. Le programme scientifique ne peut fournir des résultats neufs s'il met en oeuvre des équipements obsolètes: il ne suffit pas que les idées soient bonnes, il faut encore que les instruments soient à la pointe de la technologie. Les agences sont très convaincues de cette thèse, mais ce sont les financiers qui obtiennent souvent le dernier mot: quel programme peut-on mieux amputer, si les ressources sont tendues, que le programme de préparation de l'avenir? A terme, il nous paraît que, *pourvu que sa gestion soit strictement contrôlée*, le programme de R et T des agences est le meilleur pari sur l'avenir technologique des états membres qu'on puisse imaginer. N'est-ce pas en son sein qu'on développe par exemple la robotique, ou l'intelligence artificielle dont l'industrie bénéficiera nécessairement à terme proche? Nous insistons sur la nécessité, ici comme ailleurs, de pourchasser les duplications (il peut évidemment s'en produire entre CNES et ESA).

6.3.7 Evaluation des résultats. Il est sain pour le programme de recherche, qu'il s'agisse pour lui-même de réapprécier ses objectifs propres, ou qu'il s'agisse d'éclairer les instances qui le financent ou d'informer les représentations nationales, de disposer à intervalles raisonnables d'une *évaluation* des résultats obtenus, ainsi que des procédures employées pour y atteindre. L'évaluation ne se pratique pas encore suffisamment, bien que la France se soit lancée dans de tels travaux (action du Comité National d'Evaluation de la Recherche, dont le premier rapport est attendu). Le compte et l'évaluation des publications imputables à la recherche spatiale font partie des éléments qui doivent se trouver dans les bilans. Ceci reste largement à faire.

Section 7

RETOMBÉES DU PROGRAMME SCIENTIFIQUEEN SCIENCES DE L'UNIVERS

Le succès du programme scientifique d'une agence doit-il se mesurer en d'autres termes que ceux de la réalisation des objectifs qui lui étaient assignés? Comme les motivations d'un tel programme sont essentiellement désintéressées (voir section 2), et que le financement est totalement sur fonds publics, les bailleurs de fonds publics attendent-ils quelque chose en retour de cet investissement, et quoi?

Alors que le poids des programmes *d'application* augmente constamment dans les budgets spatiaux, nier que l'évaluation des retombées d'un programme *scientifique* soit nécessaire reviendrait au minimum à priver les décideurs d'un outil d'aide à la décision. Il est fondamental de réaffirmer l'apport culturel et le rôle dans l'avancée de la connaissance générale que joue le programme scientifique spatial, mais ceci n'interdit pas de faire apparaître l'interface du programme scientifique avec la société.

On distinguera dans la suite les retombées scientifiques, technologiques et économiques du programme scientifique, et on tentera d'identifier les agents bénéficiaires de ces retombées.

7.1 Retombées scientifiques.

Qu'il y ait des retombées scientifiques du programme spatial en sciences de l'univers est de l'ordre de l'évidence. Si les choses étaient différentes, les agences spatiales et les laboratoires seraient disqualifiés. Ce n'est de loin pas le cas!

Quantitativement, l'annexe 2 indique pour le programme national français, entre 1980 et 1990, quel a été le degré de succès scientifique et le degré de succès technique des expériences et des missions. Le premier devrait se mesurer en nombre de publications et en appréciation du taux de citations de ces articles afin de connaître leur impact sur la communauté scientifique mondiale. Comme on l'a vu (section 3), cette étude reste à faire. Quant au succès technique, il se mesure par le bon fonctionnement des appareils en ambiance spatiale, et il peut exister même si pour des raisons indépendantes des expérimentateurs, la mission n'a pas donné de résultats scientifiques (exemple des instruments emportés sur le sonde Phobos 1, qui s'est perdue trois mois après son lancement en 1988, après avoir reçu un ordre de télécommande erroné). Pour le programme national français, le taux d'échec est faible; tout au plus quelques expériences ont-elles donné des résultats

qui n'étaient pas originaux (exemple de l'instrument UFT qui n'a rien apporté par rapport au satellite IUE). Pour le programme scientifique de l'ESA, les succès se succèdent, et même s'il y a eu des difficultés considérables dans certains cas (exemple du satellite HIPPARCOS), le déploiement des efforts de l'Agence et des scientifiques responsables a permis de sauver la mise et de remplir la mission prévue.

Les bénéficiaires des retombées scientifiques du programme spatial sont d'abord les scientifiques professionnels, experts capables d'interpréter les données spatiales et de les intégrer dans une description compréhensive des objets étudiés. Mais le grand public reçoit, lui aussi, les images spatiales avec enthousiasme et grâce à elles modifie progressivement sa représentation de l'univers: les invités à la séance d'inauguration de la Cité des Sciences et de l'Industrie, en mars 1986, ne sont pas prêts d'oublier l'approche de la sonde GIOTTO vers le noyau de la comète de Halley, qu'on a pu leur présenter en direct ce même soir...

7.2 Retombées technologiques.

On sous-estime très souvent la contribution des programmes de recherche fondamentale au développement technologique. Par nature, la recherche fondamentale lorsqu'elle prévoit des expériences, tend à exiger que les instruments fonctionnent aux limites de performances des composants et que les technologies les plus avancées soient mises en oeuvre. Les qualités principales des expériences spatiales, imposées par l'ambiance spatiale, sont qu'elles sont légères, miniaturisées, peu gourmandes en énergie, mais surtout qu'on recherche une extrême fiabilité. Cet ensemble de critères de qualité, et le contrôle qui s'exerce en cours de construction pour satisfaire à ces exigences, sont en soi une retombée technologique inspirante pour d'autres disciplines.

Par beaucoup d'aspects, on peut comparer la recherche spatiale à la recherche pour la défense, et il serait légitime et fructueux d'entreprendre une étude comparative des retombées technologiques des deux types de programmes. Comme de telles études n'existent pas à notre connaissance, nous nous bornerons à donner quelques exemples.

Dans le domaine des détecteurs de lumière, les militaires ont développé des *capteurs infrarouges* pour repérer leurs cibles de nuit (voir section 3.1.2.6). Les astronomes ont poussé la sensibilité de ces détecteurs en les faisant travailler à la température de l'hélium liquide, et les ont optimisés pour opérer dans un environnement où le rayonnement est très faible (ce qui n'est jamais le cas dans l'atmosphère). Ces mêmes détecteurs trouvent aujourd'hui des applications technologiques très pointues dans les diagnostics de simulation d'écoulements supersoniques en soufflerie cryogénique.

C'est sous la pression des astronomes que sont développées aujourd'hui les *antennes spatialisables à haute fréquence*: celles-ci permettront de recueillir les ondes submillimétriques émises par les objets les plus froids de l'univers. La

technologie pour la construction de ces antennes pourra avoir des applications à long terme pour les télécommunications spatiales, en particulier intersatellites, qui tendent à occuper le créneau des fréquences radio les plus élevées, et pour les programmes d'applications météorologiques qui ajouteront les microondes à leur panoplie de longueurs d'onde d'observation. De même pour la montée en fréquence des récepteurs radio.

Enfin, il faut mentionner que certaines techniques seront vraisemblablement communes à l'astronomie et à l'observation de la Terre (caméras, spectroimageurs, capteurs bidimensionnels, jonctions SIS c-à-d supraconducteur/isolant/supraconducteur).

L'exploration in situ du système solaire a été conduite selon une série d'étapes dans l'observation: après qu'on ait observé une planète à distance rapprochée grâce aux caméras placées sur un orbiteur, l'idée naturelle suivante a consisté à larguer un ballon porteur d'instruments dans l'atmosphère, puis à faire descendre vers le sol, s'il existe, un véhicule robotisé. C'est ainsi que se déroulera le programme Mars 94-Mars 96 d'étude de la planète Mars, dont la responsabilité appartient aux soviétiques, et où la France a une participation importante dans le développement des véhicules.

La maîtrise d'oeuvre par le CNES du développement de l'aérostat martien a été l'occasion de nouvelles avancées dans la technique des peaux de ballon, et dans la maîtrise du déploiement et du vol des aérostats. Dans la perspective de l'exploration robotique de Mars, le CNES investit dans la technique des véhicules de surface (rovers), destinés à emporter les expériences de géophysique et les moyens de prélèvement d'échantillons (voir section 3.1.3). Si les soviétiques ont beaucoup d'avance dans la conception mécanique des véhicules, il y a une place toute trouvée pour les laboratoires et les industriels français du domaine de la robotique et de l'intelligence artificielle, qui occupent une position particulièrement bonne dans la compétition internationale. Le programme VAP (*Véhicule Automatique Planétaire*), tout en préparant la France à occuper une place importante dans l'exploration du sol de la Lune et de Mars, est un moyen efficace pour développer notre savoir-faire en intelligence artificielle: le VAP devra "voir" le paysage devant lui, c'est-à-dire calculer à partir d'une information stéréoscopique acquise par ses caméras de bord un modèle numérique de la topographie du terrain à traverser; puis il devra "décider" du chemin à suivre pour se déplacer sur ce terrain vers son objectif en évitant les obstacles, car le temps aller et retour des informations échangées avec la Terre est de l'ordre de la dizaine de minutes, par conséquent le VAP devra décider seul des manoeuvres impliquant des échelles de temps plus courtes. Ces contraintes vraiment spécifiques introduites par la nécessité de se déplacer dans des terrains souvent chaotiques et à grande distance radioélectrique de la Terre amènent à concevoir et tester des logiciels nouveaux et robustes d'intelligence artificielle.

A-t-on besoin de l'incitation d'un programme spatial pour construire des robots? La réponse est sans doute non, en principe; mais il faut retenir que les critères de qualité et de fiabilité imposés par le fonctionnement dans l'espace obligent évidemment les fabricants du robot martien à déployer le maximum de leurs capacités techniques. Il est notamment difficile de développer des techniques qui fonctionnent dans le vide ou un quasi vide et ces conditions d'utilisation posées pour les robots spatiaux conduisent à pousser les performances. Il vaut donc mieux se donner le défi de construire des robots très savants et habitués aux conditions les plus extrêmes que d'envoyer à grands frais des hommes en séjour prolongé dans l'espace, d'autant que ceux-ci ne pourront sans doute jamais aller aux confins du système solaire. On a cité plus haut les besoins de l'exploration de Titan: ce sont évidemment des robots qui s'en chargeront.

Les bénéficiaires de ces retombées technologiques se trouvent dans le champ d'autres sciences (cas des détecteurs), mais surtout dans celui des applications (cas des robots, des télécommunications, de la télédétection, qui profite des caméras développées par les astronomes, de l'industrie des bateaux de plaisance etc...). Il pourrait être dans celui de la vie quotidienne si des robots miniaturisés dérivés des robots spatiaux étaient utilisés par exemple pour l'assistance aux infirmes, comme font les japonais. Mais bien entendu le champ de la robotique est fort vaste et il n'est pas dans notre propos de le traiter ici.

Un ensemble d'exemples tirés du programme R et T du CNES sont donnés à l'annexe 7 et ont été commentés à la section 6.2.5

7.3 Retombées économiques.

Il semble qu'aucune étude économique n'ait isolé jusqu'à présent l'impact du programme scientifique des agences dans le champ des retombées. Par contre un certain nombre de travaux ont été consacrés aux retombées de l'activité spatiale prise globalement. Nous emprunterons au groupe de Strasbourg (Bureau d'Economie Théorique et Appliquée, BETA) les distinctions méthodologiques qu'il a établies entre deux types d'effets économiques résultant des programmes lourds:

- "Les effets directs s'inscrivent dans la logique du programme et proviennent de la réalisation des contrats passés dans le cadre des objectifs fixés par ce programme.

- Les effets indirects relèvent de phénomènes d'apprentissage liés à la technologie et aux savoir-faire, aux relations commerciales, à l'organisation et au facteur travail que les industriels stimulent par leur participation aux programmes" (L. Bach, G. Lambert, Problématique d'évaluation des effets directs des programmes spatiaux, BETA, 1991).

Autrement dit, les effets directs sont attendus, ils ont pour bénéficiaires les agences elles-mêmes, les industriels de l'espace, les producteurs de services spatiaux et les utilisateurs finaux de l'espace (par exemple les clients de la météorologie); les effets indirects au contraire n'ont pas été prévus initialement, ils représentent la part de résultats

susceptibles de diffuser à plus ou moins long terme dans l'ensemble de l'économie. Un très bel exemple de cette dernière catégorie est le succès de la méthode de gestion des tâches complexes PERT (Programme Evaluation and Review Technique), issue du programme spatial militaire américain, mais reprise à grande échelle par la NASA dès la fin des années 50, et surtout employée en de nombreux secteurs économiques.

Bien qu'aucune étude ne soit disponible analysant les effets économiques des crédits spécifiques du programme de recherche spatiale, il nous paraît possible de faire l'hypothèse suivante: les retombées économiques du programme scientifique sont certainement des deux types mentionnés plus haut; mais il est plus aisé, en l'absence d'étude, d'énoncer qualitativement les effets indirects que les effets directs.

Suivant toujours les concepts proposés par le BETA (L. Bach et al, La mesure des effets économiques des grands programmes de développement: l'expérience d'une évaluation des programmes spatiaux, 1990), on peut encore classer les effets indirects en *éléments matériels* ou marchands, et en *éléments immatériels* ou non-marchands. Dans la catégorie des éléments matériels on pourrait introduire les retombées technologiques isolées ci-dessus (section 6.2.5): comme on l'a vu, le programme scientifique aboutit de façon non nécessairement prévisible à la création de produits nouveaux, ou à l'amélioration de produits existants. Dans la catégorie des éléments immatériels on peut ranger tous les biens non vendables qui représentent un des apports majeurs de la recherche spatiale: transfert de savoir et constitution d'une connaissance partagée via séminaires et rapports d'où situation d'apprentissage permanent des équipes, habitude de travailler à l'intérieur de délais stricts, exigence de qualité sur les produits, nouveaux concepts de gestion, mise au point de nouveaux procédés etc...Il en résulte une image de qualité des laboratoires spatiaux, qu'ils soient universitaires ou industriels, image enviable qui devrait d'ailleurs susciter la réflexion et l'interrogation plus vive des responsables de l'organisation de la recherche.

Ainsi, nous retiendrons comme effet économique important des programmes de recherche spatiaux l'influence structurante qu'ils exercent sur le mode de production des connaissances, par le modèle d'organisation des communautés scientifiques en découlant: rassemblement de communautés autour d'un projet, création de consensus afin d'emporter les décisions, habitude des discussions critiques aux étapes du projet. On peut concevoir que les communautés utilisant des moyens moins importants en soient contristées et déplorent ce rôle de la recherche spatiale. On constate cependant qu'une convergence se trouve exister entre les critères de réussite des programmes spatiaux (en particulier le programme de recherche) et les nouvelles exigences de qualité de la production en général. Le programme de recherche spatiale se trouve de fait placé dans une position exemplaire qui mériterait d'être étudiée plus en détail.

Section 8

DIFFICULTES ET CONTRAINTES SPECIFIQUES

DES LABORATOIRES DE RECHERCHE

QUI SE CONSACRENT AUX SCIENCES SPATIALES DE L'UNIVERS

Les laboratoires spatiaux français en sciences de l'univers sont rassemblés dans l'annexe 1. Ils sont huit, tous liés au CNRS, sauf le Service d'Astrophysique du CEA. On y a joint le Laboratoire de Météorologie Dynamique, qui se consacre exclusivement à l'observation de la Terre, alors que certains de huit premiers ont dans ce secteur une activité partielle.

8.1 L'état actuel des laboratoires spatiaux

L'annexe 9 donne les statistiques concernant le personnel et le budget des huit laboratoires spatiaux en sciences de l'univers stricto sensu, en 1990 (colonne "spatial"). On y trouve en comparaison les chiffres concernant les laboratoires "sol" de la discipline, ainsi que l'état des ressources de l'ensemble des laboratoires (sol + espace).

En grosse masse, les laboratoires spatiaux représentent en 1990 un peu plus de la moitié (55%) des dépenses consolidées de la discipline sciences de l'univers telle que définie dans ce rapport: 733 MF (salaires compris) à comparer à 1333 MF au total (sol et espace). 37% du personnel de la discipline y travaille (185 chercheurs en poste, 520 ITA⁽¹⁾, 32 ingénieurs sur contrats à durée déterminée, 57 doctorants et 37 chercheurs visiteurs étrangers).

La répartition des tâches dans les laboratoires spatiaux entraîne un rapport ITA/chercheurs différent de celui des laboratoires "sol": 2.8 contre 1.8 (en ne comptant que les personnels permanents en poste).

Il faut noter que la part du "spatial" dans les disciplines des sciences de l'univers est passée de 42% en 1985 à 55% en 1990. Cette évolution rapide reflète l'abondance croissante de données astronomiques venant des satellites observatoires et des sondes interplanétaires.

Ces laboratoires ne se consacrent pas tous exclusivement aux disciplines spatiales. Par exemple, le Service d'Aéronomie a des activités en physique de l'atmosphère à partir du sol, le CRPE fait des travaux de recherche en télécommunications. On

1 ITA: Ingénieurs, Techniciens, Administratifs.

peut faire l'hypothèse qu'il s'établit une compensation entre les travaux de recherche au sol dans ces laboratoires et la part d'activité spatiale qui s'effectue dans les laboratoires "non spatiaux" de la discipline. Nous ne cherchons pas à corriger les chiffres bruts figurant dans le tableau pour de tels effets, ces chiffres sont de bons indicateurs à quelques pour cents près.

8.2 Le partage des tâches entre laboratoires spatiaux, industrie, agences, laboratoires "fondamentalistes"

8.2.1 La conception des projets spatiaux. A ce stade, la part essentielle de la responsabilité revient aux laboratoires spatiaux en interaction avec les autres laboratoires de la discipline, puisqu'il s'agit de concevoir le projet en fonction des grandes problématiques scientifiques que les données que l'on veut acquérir dans l'espace peuvent aider à résoudre.

8.2.2 Les études de faisabilité et de définition; la réalisation: maîtrise d'oeuvre, sous-traitance. Dès le stade des études de faisabilité, des tests de concepts instrumentaux sont effectués en laboratoire, ainsi que des études détaillées. Un partage des tâches intervient entre laboratoires spatiaux, industrie et agences de programmes (CNES, ESA), partage dont les termes dépendent du projet et du degré de nouveauté des technologies à mettre en oeuvre. Cette phase s'accompagne parfois de transferts de technologies des laboratoires vers les industriels.

Au stade de la réalisation, la part de l'industrie tend à croître, encore que certains laboratoires continuent de réaliser le maximum des expériences chez eux et évitent la sous-traitance. L'industrie peut aller jusqu'à la maîtrise d'oeuvre d'un instrument. On a vu à la section 5.4 que les scientifiques préfèrent clairement que la maîtrise d'oeuvre s'effectue dans les laboratoires, voire dans un centre technique d'agence spatiale (Centre Spatial de Toulouse pour le CNES, ESTEC pour l'ESA). Mais on doit noter que ce n'est que par ce transfert de la construction des expériences des laboratoires vers l'industrie que l'on a pu réaliser les expériences récentes *les plus complexes* (on a déjà cité la caméra ISOCAM sur le satellite ISO, où Aérospatiale a contribué à l'optique et à la mécanique, mais sous maîtrise d'oeuvre du Service d'Astrophysique du CEA, et plus récemment les expériences destinées à l'observatoire solaire SOHO, sous-traitées entre plusieurs industriels sous maîtrise d'oeuvre laboratoire), et *un plus grand nombre d'expériences* (un laboratoire spatial peut aujourd'hui mener deux ou trois grandes expériences de front, avec un potentiel d'ingénieurs et techniciens à peu près constant).

La contrepartie de cette situation nouvelle est évidemment une tension forte sur la ligne "Instruments" du budget scientifique du CNES (voir annexe 6). Celle-ci a cru de 123 MF à 171 MF (TTC, courants) entre 1987 et 1991, mais de façon non régulière, et les crédits disponibles sur cette ligne restent extrêmement tendus.

8.2.3 L'étalonnage et les tests. Dans la phase finale qui précède le lancement d'une expérience spatiale, on étalonne et on mesure les performances ultimes de l'instrument construit. Ces performances sont souvent très au-delà des spécifications du contrat initial, lequel se limitait à celles dont la faisabilité était assurée au moment des phases d'étude. Le rôle des laboratoires spatiaux redevient essentiel dans cette phase, car leur position charnière se manifeste: d'une part ils sont les gardiens soigneux des intentions de mesure des scientifiques, d'autre part leur intervention au début et à la fin de la phase de réalisation impose qu'ils assurent tout au long du déroulement une relation étroite entre scientifiques et ingénieurs des laboratoires d'un côté, et ingénieurs de l'industrie de l'autre.

C'est là un point essentiel, auquel une grande attention doit être portée. Ainsi seront évitées d'autres catastrophes comme celle du Hubble Space Telescope. *Si la gestion d'un projet scientifique spatial est purement industrielle, ou si elle est de la responsabilité de permanents des agences et laisse les scientifiques et ingénieurs de laboratoires largement en dehors du processus d'évaluation de la qualité des réalisations, ceci ouvrira à nouveau la porte à des problèmes du type de ceux enregistrés pour le HST.* La mission d'enquête commanditée par la NASA, et présidée par L. Allen, a magistralement étudié l'erreur d'optique qui affecte le HST, et les faiblesses de gestion qui ont conduit à ce désastre; le rapport Allen est un modèle d'évaluation scientifique.

8.2.4 Les opérations en vol. Les opérations en vol demandent elles aussi la présence d'une double équipe au centre de contrôle: une équipe de scientifiques pour planifier les observations, faire face aux imprévus et préparer quasiment en temps réel des décisions, une équipe spécialiste du contrôle des satellites. Ces deux équipes doivent travailler en un même lieu, avec une organisation très stricte si on veut optimiser le retour scientifique d'une mission spatiale. Une évolution récente donne aux laboratoires spatiaux responsables des expériences la charge de fournir une partie du personnel scientifique nécessaire lors des opérations en vol.

8.2.5 La calibration des données, leur distribution et leur archivage. Nous envisageons ici non le problème général (voir section 6.2.4), mais la responsabilité spécifique des laboratoires par rapport aux données issues des expériences dont ils ont eu la charge.

Les données acquises dans l'espace doivent être mises en forme et calibrées pour être exploitables par les scientifiques. Une participation importante de ceux qui ont étalonné et testé les instruments est indispensable au cours de cette phase, qui implique en parallèle les spécialistes des centres d'archivage (par exemple ceux du CNES) et des réseaux numériques de distribution vers tous les laboratoires susceptibles de les utiliser: ceux-ci ne se limitent évidemment pas aux laboratoires spatiaux, français ou étrangers s'il y a

collaboration, ils incluent en principe tous les laboratoires de la discipline.

Dans ce secteur, une évolution considérable s'est produite depuis dix ans. Les expériences spécialisées, conçues, construites et exploitées scientifiquement par une même équipe en un même laboratoire (il y en a plusieurs de ce type dans les tables de l'annexe 2) ne constituent plus la majeure partie de l'activité des laboratoires spatiaux, si l'on en juge par les budgets. Ce sont les instruments destinés aux grands observatoires spatiaux et aux missions interplanétaires, instruments qui ont une vocation de service pour une communauté scientifique large, qui tendent à prendre le dessus dans l'activité des laboratoires.

Mais, comme on l'a déjà souligné (section 6.2.4), les moyens existants en France et à l'ESA pour assurer la phase de mise en forme des données, leur archivage et leur distribution sont beaucoup trop faibles en proportion des moyens consacrés à la réalisation des expériences et des missions. Les agences spatiales (CNES, ESA) considèrent que la charge de ces travaux revient, en sciences de l'univers, aux agences de recherche fondamentale, leur vocation étant restreinte à la construction et à la bonne "opération" en orbite des missions spatiales. Ce point de vue se heurte à une disproportion de moyens malsaine. A la section 5.3.3, nous avons déjà noté que la NASA, quant à elle, finance la phase de traitement des données, y compris le salaire des chercheurs post-doctoraux et les outils informatiques nécessaires à l'exploitation scientifique des données. Nous avons repris une proposition mieux adaptée au contexte français, celle de *l'élaboration d'un budget consolidé complet avant que ne soit prise une décision concernant une expérience ou une mission spatiale.*

8.3 Le personnel des laboratoires spatiaux.

Comment les laboratoires spatiaux français réussissent-ils à mener des projets très performants dans des structures où le personnel est majoritairement sur un statut de fonctionnaire et où donc des rigidités considérables se font sentir?

8.3.1 Les ambiguïtés de la situation actuelle. Le personnel des laboratoires spatiaux est fourni dans sa grande majorité par le CNRS. S'y ajoute un petit nombre de postes appartenant au CEA, au Centre National d'Etudes des Télécommunications (CNET), et aux universités. Le nombre de contrats à durée déterminée financés par le CNES, quoique très contrôlé pour des raisons de politique sociale, est en croissance (il y en a 32 en 1990, à comparer à la population totale d'ITA: 520 (annexe 9)).

Le CNRS a très souvent fait remarquer que le rapport $(\text{investissement} + \text{fonctionnement}) / (\text{investissement} + \text{fonctionnement} + \text{salaires})$ est chez lui trop faible (27%). Ce rapport serait trompeur si on l'appliquait sans plus de critique aux secteurs de la recherche où le personnel est essentiellement CNRS mais où les investissements publics transitent par d'autres canaux. C'est ce qui se passe pour la physique lourde: physique

nucléaire et des particules (avec le CERN), pour l'astronomie au sol (avec l'ESO) et bien sûr pour l'astronomie spatiale.

D'après les chiffres de l'annexe 9, ce rapport (inv + fonc)/ (total) vaut:

- 70% pour les laboratoires spatiaux
- 36% pour les laboratoires au sol du même secteur.

On constate qu'il est élevé dans les laboratoires spatiaux. Notons d'emblée que ces chiffres attribuent aux seuls laboratoires spatiaux des crédits, par exemple la totalité de la contribution de la France à l'ESA, qui servent aussi indirectement les chercheurs "sol" qui utilisent des données spatiales (celles d'IUE, IRAS, EXOSAT, Hubble Space Telescope etc...). Si l'on disposait du nombre des chercheurs "sol" clients des expériences spatiales pour leur plus grand avantage, on pourrait corriger les rapports ci-dessus dans le sens de diminuer le premier et d'augmenter le second. Les bases statistiques nécessaires à cette correction nous ont manqué.

Quoi qu'il en soit, l'écart entre les deux rapports ci-dessus reflète, pour les laboratoires spatiaux, l'importance des investissements par rapport aux frais de personnel en poste. Le coût des instruments est effectivement élevé lorsqu'on le compare à ce qui prévaut pour les instruments au sol de la même discipline ou à ce qui se passe dans d'autres disciplines. Une comparaison significative n'est possible pour les instruments que si l'on inclut tous les coûts salariaux quelle que soit leur source. Nous n'avons pas pu l'établir quantitativement.

L'annexe 9 donne également la répartition "investissement + fonctionnement rapportée au nombre de chercheurs et d'ingénieurs de recherche". Un chercheur ou un ingénieur de recherche dans un laboratoire spatial coûte par an, en moyenne et hors salaire, 1.838 MF, tandis que le même dans un laboratoire sol de la même discipline coûte 0.364 MF. La même remarque que précédemment s'applique, et ces deux chiffres devraient être corrigés dans le sens d'une baisse du premier et d'une remontée du second, si l'on tenait compte de l'usage grandissant que font les chercheurs "sol" des données spatiales disponibles dans les bases de données. Le premier chiffre montre une fois de plus que la recherche spatiale est chère, et que le chiffre cité aura tendance à s'envoler si, à personnel permanent constant, on se tourne dans l'avenir vers plus de sous-traitance industrielle.

Nous suggérons qu'une comptabilité analytique globale soit instaurée, afin que l'on connaisse le coût réel des projets et qu'on puisse identifier correctement et complètement les canaux de financement. Une telle démarche permettra alors d'évaluer proprement l'impact des décisions budgétaires dans le domaine de la recherche spatiale par rapport aux budgets globaux, et d'assurer la cohérence de la politique scientifique décidée. Il faut une mémoire et une cohérence des

décisions sur au moins dix ans si l'on veut éviter toute espèce d'avatar.

8.3.2 Les difficultés du recrutement des ingénieurs. La section 8.2 a montré que le rôle des laboratoires spatiaux évolue vers plus de tâches de définition et de caractérisation d'expériences, ainsi que vers des responsabilités de maîtrise d'oeuvre, plutôt que vers des tâches de réalisation (sauf pour les petites expériences). Il s'en suit une évolution corrélative des profils de techniciens et ingénieurs nécessaires dans les laboratoires.

La modification des profils de qualification se fait, mais trop lentement. La partage des compétences entre les organismes de recherche et leurs ministères de tutelle d'une part, et le ministère du budget d'autre part, ne facilite pas une évolution rationnelle des pyramides de qualification au sein des corps d'ingénieurs, techniciens et administratifs de la recherche. En particulier, les qualifications trop basses de beaucoup de postes d'administratifs dont dispose le secteur de la recherche sont totalement inadaptées aux besoins de gestion de grosses affaires presque toujours menées en collaboration internationale. Les besoins en travaux de type dactylographie sont devenus faibles en comparaison des besoins de gestion de projets et de ceux du secrétariat des chercheurs et ingénieurs responsables des instruments ou des missions.

Les règles des concours de recrutement des ingénieurs, techniciens et administratifs du CNRS imposent des procédures très lourdes et très lentes (6 à 7 mois entre le moment où un poste est attribué à un laboratoire et le moment où la personne recrutée commence effectivement à travailler!!). De tels délais sont incompatibles avec la mise en oeuvre, souhaitée par les ministères de tutelle, de la mobilité des personnels les plus qualifiés: après 5 à 10 ans de carrière au CNRS, un ingénieur peut être embauché dans une industrie spatiale, mais les stricts calendriers d'expériences n'encouragent pas les responsables de laboratoires à laisser décroître la force de travail disponible, quand les remplacements au CNRS se font si lentement.

Ces dysfonctionnements se traduisent par un recours grandissant aux contrats à durée déterminée financés par le CNES sur le budget des instruments. Cette solution est aujourd'hui la seule en oeuvre pour mener les projets à bien dans les délais. On fait ainsi appel à des compétences certes à la page mais qui n'ont pas le temps de s'inscrire dans le savoir-faire collectif des laboratoires. Le poids infligé à la ligne "instruments" du budget scientifique va dans le même sens que si on augmentait la sous-traitance industrielle, mais il est moins élevé.

Il faut enfin souligner la difficulté à recruter et à garder les ingénieurs de haut niveau avec les salaires de la fonction publique, dans un secteur en développement rapide où l'industrie souffre d'un déficit permanent en cadres techniques et offre des salaires très motivants. La première génération d'ingénieurs des laboratoires créés il y a trente

ans va partir en retraite. Par ailleurs, on constate, en étudiant les arrivées et départs dans les laboratoires spatiaux entre 1985 et 1990, que 29 départs n'ont pas été compensés (annexe 9), en dépit des efforts récents du CNRS. La difficulté est liée aux conditions de recrutement et surtout de salaire. *Les carrières offertes par les organismes publics sont trop médiocres pour que les meilleurs ingénieurs puissent y être recrutés.* Contrairement à l'industrie, les laboratoires spatiaux ne peuvent pas, pour des raisons de salaire, recruter d'ingénieurs venant des plus grandes écoles, et ils ne peuvent intéresser que des jeunes ingénieurs venant des "petites écoles". Un groupe de travail CNES/CNRS se penche sur ces difficultés.

Il n'y a peut-être pas lieu d'être totalement négatif sur ce dernier point. L'exemple des laboratoires spatiaux confirme une remarque déjà notée par divers responsables de la recherche: la capacité d'innovation technologique en France, ainsi qu'une attitude de dévouement intense à la réalisation en cours, se trouvent très souvent chez les ingénieurs sortant des "petites écoles", chez qui le goût de l'innovation n'est pas d'emblée tué au profit de l'attrait éduqué vers les tâches de gestion.

8.3.3 La formation des ingénieurs du spatial: le rôle des laboratoires spatiaux. Nous devons dès à présent faire face à un déficit en ingénieurs spécialisés dans la recherche spatiale: il s'agit d'ingénieurs ayant acquis une spécialité à l'école et l'ayant complétée, souvent sur le tas, par une connaissance de problèmes spécifiques (résistance aux vibrations des pièces mécaniques et optiques, protection de l'électronique contre les rayons cosmiques, fortes contraintes thermiques, faible puissance électrique disponible sur les plate-formes...).

Ce n'est certainement pas en essayant seulement de compenser le différentiel de salaire avec l'industrie que les difficultés notées à la section 8.3.2 se résoudront, même si, bien entendu, une réduction du déficit des salaires dans les laboratoires aiderait à améliorer la situation.

Parce qu'ils sont très exigeants, par la nature des expériences qu'ils construisent, sur les performances ultimes qu'ils recherchent, les laboratoires spatiaux sont une excellente école de formation pour spécialiser des ingénieurs en techniques spatiales. *Il faut donc organiser la contribution de ces laboratoires à la formation d'ingénieurs, dont nos industries spatiales ont besoin.* D'autres industries peuvent aussi profiter de ces compétences: les ingénieurs formés dans les laboratoires spatiaux savent traiter par exemple les questions d'électronique pour les TGV, le matériel agricole, les engins militaires, et en général les problèmes de cohabitation de signaux électriques.

Parce qu'ils sont parmi les seuls laboratoires de recherche où on gère des projets chers, les laboratoires spatiaux peuvent aussi assurer la formation de cadres pour les autres projets de science lourde.

Les laboratoires seront alors le lieu de passage d'un flux permanent d'ingénieurs et techniciens se formant, soit par des stages, soit par une embauche pour quelques années avant de rejoindre l'industrie spatiale (ou d'autres industries). Il ne fait guère de doute que l'intérêt particulier du travail sur des expériences scientifiques utilisant une technologie ultrapointue, assorti à l'ambiance de travail de la recherche, sont des motivations assez fortes pour qu'une fraction de ces ingénieurs reste dans la recherche et assurent ainsi la pérennité du système, sous la réserve que quelques conditions minimales soient remplies:

- les conditions de travail doivent être correctes, ce qui veut dire (après plus de 25 ans d'existence des laboratoires) que les locaux doivent être décentes et le personnel technique et administratif suffisamment qualifié pour les épauler;
- les contraintes liées au calendrier très strict des expériences spatiales doivent être reconnues, et les compensations financières normales pour le travail hors horaires doivent être versées;
- le travail de formation, qu'il faudra organiser avec des IUT, des écoles d'ingénieurs et des filières universitaires de formation d'ingénieurs doit être reconnu comme une part importante de la fonction des ingénieurs de laboratoires spatiaux.

8.3.4 Relations avec l'industrie du point de vue de la formation. Le rôle nouveau qu'on vient de proposer de donner aux laboratoires spatiaux dans la section 8.3.3 ne peut être effectif que dans le cadre d'une collaboration étroite avec l'industrie spatiale. Celle-ci devrait naturellement se développer au sein de la collaboration qui s'instaure dans la réalisation des projets et qui a été décrite à la section 8.2. On devra en particulier faire appel aux compétences des ingénieurs de l'industrie spatiale pour contribuer à la formation des futurs ingénieurs, et organiser avec ces industries les stages qui sont une part nécessaire de ce type de formation.

8.4 Questions de propriété intellectuelle

Il y a eu peu d'intérêt jusqu'à présent pour les droits de propriété intellectuelle en matière de recherche spatiale, ni pour l'importance que les découvertes obtenues dans les laboratoires peuvent avoir au plan économique. Or il s'agit de défendre le droit des chercheurs à garder un accès prioritaire sur les données obtenues lors d'expériences spatiales, et à tirer le bénéfice (pour eux ou pour l'organisme dont ils dépendent) des innovations auxquelles leur travail peut avoir conduit.

Les agences spatiales jouent un rôle particulier dans ces questions. D'une part, l'ESA a établi un règlement relatif aux conditions des transferts d'information et de données. D'autre part, le CNES, représentant la France à l'ESA, représente aussi les scientifiques français en tant que leurs droits sont concernés.

L'enjeu pour les scientifiques est le suivant: pour réaliser une expérience ou une mission spatiale, ils sont amenés à communiquer des idées originales et, au terme du processus, ils obtiennent des résultats originaux. Les agences devraient au minimum leur attribuer le crédit de leurs résultats lorsque ceux-ci sont cités, et demander une autorisation lorsque ces résultats ou procédés sont transmis à des industriels dans le cas où l'expérience scientifique se poursuit par un passage à l'opérationnel.

Mais, s'agissant des procédures de transfert de savoir-faire entre les laboratoires et les industriels lors de sous-traitances, il convient que les laboratoires soient sensibilisés à la nécessité de prendre, s'il y a lieu, des brevets et licences. Il y va de la conservation et de la valorisation de savoir-faire qui devraient profiter à notre pays.

Enfin dans les collaborations ESA/NASA, les problèmes de partage des données se posent. C'est encore le CNES qui est garant des intérêts français.

Un groupe de travail a commencé d'étudier ces questions au CNES.

Section 9

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES**9.1 Collaboration et compétition: la fin d'une dialectique?**

Les grands programmes spatiaux, américains, qu'ils soient civils ou militaires -Apollo, Système de Transport Spatial (ou Navette), IDS (ou guerre des étoiles), Homme dans l'espace-, et les programmes semblables en URSS, sont nés et se sont développés dans le contexte de la *compétition* Est-Ouest: ils sont un des produits de cette compétition, mais non sa seule forme. Dans une période de tension internationale vive, la compétition en ces domaines a pris le pas sur la collaboration, au risque mainte fois souligné de dépenses importantes et redondantes. Chacun sait pourtant que la collaboration permettrait de réaliser les mêmes projets à moindre coût, alors que leur ampleur et leur prix ne cessent d'augmenter. Si la conjoncture internationale évolue de façon durable et autorise, en matière de science et technologie lourdes, une remise en cause des affichages pour le seul prestige, on pourra peut-être repenser la conduite des grands programmes spatiaux dans le sens d'une *collaboration* accrue entre les grandes puissances traditionnelles, mais aussi entre chacune de celles-ci et l'ESA auxquelles s'ajoutent d'éventuels nouveaux partenaires.

A plus forte raison la collaboration doit-elle croître dans le domaine scientifique. La dialectique compétition/collaboration apparaîtra sous peu comme totalement anachronique, puisque pour les grandes missions scientifiques, il en va de la possibilité même de leur réalisation. Il s'agit de pouvoir construire et de gérer des équipements que chacun des grands pays, quelle que soit sa puissance, ne peut plus prendre en charge seul; il s'agit aussi de ne négliger aucun des apports que peuvent engager les pays plus petits mais riches; à terme, et cela concernera sans doute l'observation de la Terre avant les sciences de l'univers, compte tenu des enjeux de société liés à l'évolution du climat, les pays en développement devront aussi se joindre, sous une forme adéquate, à de grands programmes scientifiques spatiaux.

Explicitons le champ de cette collaboration:

- A l'intérieur des disciplines des sciences de l'univers, non seulement faut-il favoriser par les moyens classiques que sont les colloques et articles la libre circulation des idées qui vont donner lieu aux missions et expériences, mais encore serait-il profitable et rationnel (voir section 6.1.5) de renforcer une *instance de concertation mondiale sur les projets*, où pourraient être affichés et discutés les projets à

l'étude (on a déjà cité IACG) et une *instance de coordination des réalisations*.

Si ces deux instances ne se mettent pas en place, le meilleur profit ne sera pas tiré des ressources intellectuelles et financières disponibles, et beaucoup d'argent sera gaspillé inutilement. Il revient aux grandes agences (NASA, Interkosmos, ESA, CNES, ISAS) d'initier le processus de mise en place de ces instances.

- Les grands domaines voisins que sont l'observation de la Terre et les sciences de l'univers ont également à collaborer entre eux. Il n'est pas utile de développer à nouveau pour les besoins de l'observation de la Terre quantité d'instruments et de capteurs qui sont déjà maîtrisés par des sciences plus anciennes dans l'espace (voir section 6.2.1). La *chasse à la duplication* est un impératif sévère qui doit s'imposer à tous, l'objectif étant comme précédemment de faire plus à l'intérieur de ressources limitées.

9.2 La place de l'Europe

Considérant les capacités intellectuelles et économiques des pays d'Europe, et la remarquable qualité des résultats déjà acquis, il nous semble que le statut de l'espace en Europe doit être plus celui d'un ciment d'unité qu'un ferment de divergences. Appliquant cette proposition à la recherche spatiale, ceci suppose plusieurs évolutions:

- Les ressources financières du programme scientifique spatial devront augmenter; nous rappelons que pour l'ensemble du programme de l'ESA et des programmes nationaux (sciences plus applications) elles sont plus faibles en volume que les ressources civiles de la NASA par un facteur 3.
- Les activités scientifiques devront se recentrer autour de l'ESA pour toutes les grandes missions, avec les réserves faites à la section 6.1.2, qui justifient l'existence d'un programme national (au moins pour la France).
- La structure de décision relative à l'harmonisation des programmes nationaux et du programme de l'ESA devra être consolidée. Une conférence ministérielle ou un conseil de l'ESA au niveau ministériel devraient assurer la cohérence des programmes et l'économie des ressources (voir section 6.3.3).
- La Communauté Economique Européenne ne devrait plus être un partenaire muet de la recherche spatiale. Elle-même se préoccupe du rôle que la Commission pourrait jouer par rapport aux activités spatiales (Rapport Gibson, septembre 1991). Sans analyser ici ce rapport, et nous limitant aux aspects scientifiques des activités spatiales, nous proposons que deux points soient considérés à cet égard. D'une part, la CEE pourrait être le maître d'ouvrage de certains projets, dont l'ESA et les laboratoires qui lui sont liés seraient les maîtres d'oeuvre: ce serait là une manière pour la CEE d'injecter des crédits, si elle le désire, pour l'accomplissement de ses propres programmes, dans un système où

elle n'a pas et ne doit pas avoir de responsabilités techniques ou d'orientation. D'autre part, la CEE sera tôt ou tard concernée par la question de l'archivage, de la distribution et du traitement des données (le "segment sol"): elle dispose de crédits de recherche qui devraient permettre de soutenir tant le segment sol que l'analyse des données et la circulation de jeunes chercheurs appliqués à cette tâche.

- Enfin une évaluation du programme scientifique spatial par des instances extérieures aux agences responsables est certainement une pratique saine. Aux Etats-Unis, les documents-programmes de la NASA sont examinés par les instances du National Research Council, et les scientifiques qui donnent leur avis dans ce cadre sont tout aussi brillants et dévoués à la cause du programme spatial que ceux qui ont élaboré les documents de la NASA. Ainsi les instances qui décident sont-elles saisies au vu d'un programme mais aussi au vu de son appréciation par une partie de la communauté scientifique qui ne fait pas partie du lobby des promoteurs. En Europe, il conviendrait de trouver sous quels auspices une telle responsabilité pourrait s'exercer; on peut penser à la Fondation Européenne de la Science et à son Comité pour la Science Spatiale.

9.3 Le poids des nouvelles orientations du programme spatial

Les plans à long terme du CNES et de l'ESA (1991-2005) sont l'un et l'autre dominés par la place que tiendra le programme vols habités dans la programmation des dépenses des prochaines années.

Rappelons ici que les sciences de l'univers sont, -avec l'observation de la Terre, le programme de construction de lanceurs, les télécommunications spatiales, la localisation de mobiles sur la Terre, et le programme de recherche et technologie-, des composantes de l'activité spatiale qu'on a nommées "l'espace utile", c'est-à-dire la partie de cette activité dont les bénéfices pour les hommes sont presque immédiatement perceptibles.

Nous exprimons à nouveau l'inquiétude que les nouvelles orientations du programme spatial, qui l'engagent vers l'homme dans l'espace, n'imposent inéluctablement des restrictions budgétaires sur "l'espace utile", si le schéma qui se déroule à propos de la Station Spatiale Freedom se reproduit en Europe (voir section 2.5). Aujourd'hui, les perspectives pessimistes et à court terme conduisent à redouter des restrictions portant sur les crédits d'équipement. Demain il faudra aussi assurer le *fonctionnement* des stations spatiales, et les coûts annoncés font frémir : on parle d'un milliard et demi de francs par an pour la France (qu'on peut comparer par exemple au budget scientifique du CNES, annexe 6).

Du point de vue des scientifiques, et quoiqu'ils ne puissent ignorer l'enthousiasme que peut susciter chez certains la perspective d'une civilisation, la nôtre, installée dans tout le système solaire, l'existence de stations spatiales habitées sur de longues périodes et aménagées en bases de vie n'est pas

une exigence intrinsèque à l'avancée de leur science. Il apparaît aux scientifiques, qu'ils appartiennent aux sciences de l'univers ou aux disciplines de l'observation de la Terre, que ce projet, présenté comme d'intérêt pour le développement technologique, serait pour eux avantageusement remplacé par un grand programme de développement de la robotique et de l'intelligence artificielle, dont les ressorts et les résultats peuvent remplir vis à vis de l'industrie tous les objectifs d'un programme de recherche technologique avancé.

Il faut enfin cesser de "vendre" le programme "Homme dans l'espace" au grand public et aux contribuables comme s'il était question d'une future conquête scientifique ou comme s'il s'agissait d'un outil scientifique polyvalent.

GLOSSAIRE

APM: Attached Pressurized Module. Partie du programme Columbus destinée à être attachée à la Station Spatiale Freedom.

BCRD: Budget Civil de Recherche et de Développement. Agrégat de tous les budgets publics de recherche français (hors CNET). En 1991, il s'élève à 48.67 milliards de F (avant annulations dues à la guerre du Golfe).

bit: unité d'information, formée de 0 et de 1, permettant de représenter n'importe quel nombre dans un système binaire.

bit/sec: unité de transfert d'information, permettant de calculer la rapidité de transmission d'une observation.

byte: unité d'information, consistant en 8 bits et pouvant représenter un caractère ou un nombre.

CNES: Centre National d'Etudes Spatiales (France)

électron-Volt: unité d'énergie qu'on utilise indifféremment avec la longueur d'onde (mesurée en sousmultiples du m) ou la fréquence (mesurée en Herz) pour caractériser l'énergie des photons. 1 eV correspond à 1240 nm ou à $2.42 \cdot 10^{14}$ Hz. Les multiples de l'électron-Volt sont le kiloeV (keV), le million d'eV (MeV), le milliard d'eV (GeV).

EOS: Earth Observing System. Ensemble de satellites prévus par la NASA à l'intérieur du programme d'observation de la Terre Mission to Planet Earth.

ESA: European Space Agency (aussi nommée ASE en français)

Gbyte: gigabyte, ou 1 milliard de byte. Unité d'information utilisée pour décrire par exemple le contenu d'une archive.

HST: Hubble Space Telescope. Voir annexe 3.1

Interkosmos: Conseil spatial de l'Académie des sciences soviétique.

ISAS: Institute of Space and Astronautical Science. Agence spatiale japonaise pour le programme de recherche spatiale.

ISO: Infrared Satellite Observatory. Mission de l'ESA, voir annexe 3.2.

Kelvin: unité de température. 1 degré Kelvin = 1 degré Celsius, mais le zéro de l'échelle Kelvin est -273 degrés Celsius.

Mbyte: mégabyte, ou 1 million de byte. Unité d'information.

MTFF: Man Tended Free Flyer. Partie du programme Columbus constituant un laboratoire autonome orbitant.

MUC: million d'unités de compte. 1 MUC=6.97 MF.

NASA: National Aeronautics and Space Administration (Etats-Unis).

Orbiteur: satellite artificiel en orbite autour d'une planète ou d'un de ses satellites.

Rover: véhicule autonome pouvant être largué sur une planète et s'y déplacer.

SPC: Science Programme Committee. Instance de décision du programme scientifique à l'ESA.

TGE: Très Grand Equipement. Equipement scientifique de classe internationale, de coût supérieur à 100 MF.

VLBI: Very Long Baseline Interferometry. Technique d'interférométrie à plusieurs antennes, dont la base peut être plus grande que le diamètre de la Terre si on utilise des télescopes en orbite. Voir section 2.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(Ces références sont classées par date de publication)

Economic effects of space and other advanced technologies, ESA SP-151, 1980

Science Spatiale Horizon 2000, ESA, 1984

Space science in the twenty first century, National Academy Press, Washington, 1988

Les sciences de l'univers, Séminaire de Prospective du CNES, Cap d'Agde, septembre 1989

Report by the 1989 Science Programme Review Team to the Council of the European Space Agency, ESA, 1990 (rapport Pinkau)

Les effets économiques indirects des programmes de l'Agence Spatiale Européenne, ESA BR-63, 1990

L. Bach, P. Cohendet, G. Lambert, M.J. Ledoux, La mesure des effets économiques des grands programmes de développement: l'expérience d'une évaluation des programmes spatiaux, BETA, Université L. Pasteur, Strasbourg, 1990

Le programme scientifique: les sciences de l'univers; rapport au conseil d'administration du CNES, octobre 1990

The Hubble Space Telescope Optical Systems Failure Report, NASA, novembre 1990 (rapport L.Allen)

Report of the Advisory Committee on the Future of the US Space Program, US government Printing Office, décembre 1990 (rapport Augustine)

L. Bach, G. Lambert, Problèmes d'évaluation des effets directs des programmes spatiaux, BETA, Université L. Pasteur, Strasbourg, 1991

The decade of discovery in astronomy and astrophysics, National Academy Press, Washington, 1991

Présentation succincte de la position de l'Agence Spatiale Européenne vis à vis du droit communautaire, ESA/C-WG/SEA(91)5, 1991

The European Community and Space: A Report by an Advisory Panel, Commission of the European Communities, septembre 1991 (rapport Gibson)

REMERCIEMENTS

Les auteurs expriment leur reconnaissance aux personnes dont les noms suivent, qui les ont aidés en leur transmettant de l'information ou en exprimant leur avis sur le texte:

M. P. Couturier (INSU/CNRS)

MM. J. Breton, Mme G. Debouzy, MM. A. Esterle, F. Gaizin, F. Rocard (CNES)

Mme A. Chabreuil (CNES/CEE DG XII)

MM. R. Bonnet, P. Benvenuti, M. Coradini, E. Morel, H. Olthof, B.G. Taylor, W. Thiébaud, S. Volonté, W. Wamsteker (ESA)

M. D. Vidal-Madjar (Ministère de la recherche et de la technologie)

MM. M. Combes, R. Knoll, J. Lequeux, J.L. Steinberg (Observatoire de Paris)

Mme L. Koch-Miramond (Service d'Astrophysique, CEN Saclay)

M. R. Gendrin (Centre de Recherche en Physique de l'Environnement)

M. L. Bach, Bureau d'Economie Théorique et Appliquée, (Université Louis Pasteur, Strasbourg)

ANNEXES

Septembre 1991

ANNEXES

1. Les laboratoires spatiaux dans le domaine des sciences de l'univers
2. Les expériences réalisées dans les laboratoires français et ayant volé entre 1980 et 1990. Le cadre de réalisation est bilatéral ou Agence Spatiale Européenne. Les budgets indiqués sont en Francs courants.
(source: CNES)
3. Les observatoires orbitaux et sondes interplanétaires
 - 3.1 en fonctionnement
 - 3.2 approuvés et en construction
 - 3.3 à l'étude ou à l'état de proposition(source: ESA et CNES)
4. Coût pour la France des grandes missions spatiales en sciences de l'univers et comparaison aux dépenses effectuées au sol pour les très grands équipements
(source: rapport du Conseil des Grands Equipements Scientifiques, Ministère de la Recherche et de la Technologie, 1991)
5. Coût des grandes missions en cours à l'ESA en sciences de l'univers
(source: ESA)
6. Le budget scientifique du CNES de 1987 à 1992, et sa décomposition
(source: documents budgétaires annuels du CNES)
7. Comparaison de l'effort scientifique spatial français à celui des principaux partenaires européens de la France (unité: MUC 1990; 1 MUC= 6.97MF)
(source: ESA)
8. Exemples de techniques et technologies spatiales développées à des fins scientifiques par le CNES et utilisées ou utilisables dans d'autres domaines
(source: CNES)
9. Personnel et budget consolidé (toutes origines) en sciences de l'univers (astronomie, système solaire, géophysique externe) en 1990. On a séparé "spatial" et "sol". Les budgets sont en MF TTC.
(source: INSU)

ANNEXE 1

LES LABORATOIRES SPATIAUX DANS LE DOMAINE
DES SCIENCES DE L'UNIVERS

NOM	IMPLANTATION	STATUT	DIRECTEUR	PERSONNEL	
				CHER - * CHEURS + IR	ITA (IE, T, A)
Service d'Aéronomie (SA)	Verrières le Buisson Université Paris VI	Laboratoire propre du CNRS	P. Bauer	28 + 22	58
Institut d'Astrophysique Spatiale (IAS) (anciennement LPSP)	Verrières le Buisson/ Orsay	Laboratoire propre du CNRS	A. Gabriel	22 + 16	51
Département de Recherche Spatiale de l'Observatoire de Paris (DESPA)	Meudon	Unité de recherche associée au CNRS	M. Combes	29 + 21	33
Service d'Astrophysique du CEA (Sap/CEA)	Saclay	Laboratoire du Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay	C. Césarsky	11 + 30	49
Laboratoire d'Astronomie Spatiale (LAS)	Marseille	Laboratoire propre du CNRS	P. Cruvellier	17 + 21	57
Centre de Recherche en Physique de l'Environnement planétaire (CRPE)	Issy-les-Moulineaux St Maur des Fossés	Laboratoire propre du CNRS et Division du CNET	G. Sommeria	40 + 34	53
Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements (CESR)	Toulouse	Laboratoire propre du CNRS	G. Vedrenne	25 + 12	30
Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement (LPCE)	Orléans la Source	Laboratoire propre du CNRS	C. Béghin	13 + 13	20
			TOTAL	185 + 169	351
Laboratoire de Météorologie Dynamique	Paris/ENS et Palaiseau	Laboratoire propre du CNRS	R. Sadourny	33 + 19	27

* hors boursiers

IR= Ingénieur de recherche, IE= Ingénieur d'étude, T= Technicien, A= Administratif

Source: INSU

NOTE: L'observation de la Terre, traitée dans le chapitre 3 (A. Lebeau), se pratique dans plusieurs des 8 laboratoires ci-dessus, en plus des sciences de l'univers telles que définies dans ce chapitre. Elle est la spécialité du Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD), qui figure en dernière ligne du tableau ci-dessus, du Groupement de Recherche en Géodésie Spatiale (GRGS), et un peu de l'Institut de Physique du Globe de Paris.

ANNEXE 2.1 : SCIENCES DE L'UNIVERS. / ASTRONOMIE ET PHYSIQUE SOLAIRE

VEHICULE	LANCEMENT	EXPERIENCE	LABORATOIRE RESPONSABLE	COUT CNES (MF)	OBJECTIFS SCIENTIFIQUES	COMMENTAIRES
VENERA et PROGNOZ (URSS)	1981-1983	SIGNE	CESR	6	Etude et localisation des sursauts gamma	Succès scientifique et technique
PVH/ SALIOUT (URSS)	1982				PVH=PREMIER VOL HABITE (pour la France)	
		PIRAMIG	SA LAS	2	Clichés de la lumière zodiacale	Fonctionnement nominal
		PCN	IAP	0.5	Clichés de l'environnement de la station SALIOUT 7	idem
		SIRENE	CESR	1.4	Expérience d'astronomie X	Echec, non imputable au CESR
FUSEE-SONDE (NASA)	1982	TRC2	LPSP	<1	Imagerie hte résol. de la chromosphère solaire en UV	Succès scientifique et technique
ASTRONI (FR/URSS)	1983	UFT	LAS	10	Télescope de 80cm et spectromètre UV	Succès sc. et technique partiel
SPACELAB1 (ESA/NASA)	1983				Premier vol du laboratoire Spacelab de l'ESA	
		FAUST	LAS	3.6	Images à grand champ du ciel UV	Echec scientifique, succès tech.
		CAMERA GC	LAS	5	Astronomie UV à grand champ	Succès scientifique et technique
SPACELAB3 (ESA/NASA)	1985				3ème vol du laboratoire Spacelab de l'ESA	
		CAMERA GC	LAS	1	Astronomie UV à grand champ	Echec, non imputable au LAS
PHOBOS (FR/URSS)	1988				Exploration de Mars et de son satellite Phobos	
		IPHIR	IAS	1	Oscillations solaires en intensité	Succès sc., succès tech. de l'IAS
		LILAS et APEX	CESR	2	Etude des sursauts gamma (haute et basse énergie)	Succès scientifique et technique
GRANAT (FR/URSS)	1989	Maitrise d'oeuvre	CNES		Mission d'astronomie des hautes énergies	
		SIGMA	CNES,CEA,CESR	150	Imagerie gamma de basse énergie (0.03-2MeV)	Succès scientifique et technique
		PHEBUS	CESR	9	Détection de sursauts gamma avec résol. spectrale	idem
GAMMA1 (FR/URSS)	1990				Mission d'astronomie des hautes énergies	
		GAMMA1	CFA,CESR,CNES	25	Spectroscopie de sources de haute énergie (>30MeV)	Echec tech. non imputable à FR.
		SPECTRE2	CESR	1.4	Expérience soviétique d'astronomie X	Succès scientifique et technique
ULYSSES (ESA/NASA)	1990				Vent solaire hors écliptique, survol des pôles du Soleil	
		KET	CEA	5	Electrons du ray cosmique, électrons du vent solaire	Succès scientifique et technique
		HUS	CESR	3	Sursauts gamma, émission X de Jupiter et du Soleil	idem

ANNEXE 2.2 : SCIENCES DE L'UNIVERS / SYSTEME SOLAIRE

VEHICULE	LANCEMENT	EXPERIENCE	LABORATOIRE RESPONSABLE	COUT CNES (MF)	OBJECTIFS SCIENTIFIQUES	COMMENTAIRES
PROGNOZ 9 (URSS)	1983	H et D	SA	1.4	Hydrogène et Hélium interplanétaires	Succès scientifique et technique
VEGA 1 et 2 (URSS/FR/div.)	1984			140	Mission vers Venus et la comète de Halley	
		Support général	CNES	33		
		CAMERA TV	LAS,SA	17	Images du noyau et de l'enveloppe de C/Halley	Succès scientifique et technique
		TKS	Obs Besançon,SA	12	Comp. chimique de la coma et du noyau de C/Halley	Succès sc., échec partiel technique
		IKS	LPSP, DESPA	40	Température et dimensions du noyau de C/Halley	idem
		PUMA	SA	1	Spectromètre de masse pour poussières cométaires	Succès scientifique et technique
		APV.V	LPCE	1	Ondes dans le plasma cométaire	Succès scientifique et technique
		BLOC.METEO	SA	1	Pression dans l'atmosphère de Vénus	Succès tech., non exploité scient.
		ISAV	SA	6	Comp. chimique de l'atmosphère de Vénus	Succès scientifique et technique
		MALACHITE	SA,CEA,LPCE	22	Comp. chimique des aérosols de Vénus	Echec scientifique et technique
SALIOUT (URSS)	1985	COMET	LPSP	2.5	Collecte de matière venant d'essaims cométaires	Succès scientifique et technique
GIOTTO (ESA)	1985				Mission de rendez-vous avec la comète de Halley	
		HMC	LPSP	5	Images du noyau de C/Halley	Succès scientifique et technique
		NMS	CRPE	2	Spectromètre de masse pour ions thermiques	idem
		COPLERNIC	CESR	7	Distribution 3-D des électrons et des ions positifs	idem
		HOPE	SA,LAS	3.6	Composition de la coma de C/Halley	idem
PHOBOS (URSS)	1988				Mission vers Mars et son satellite Phobos	
		ISM	IAS, DESPA	14	Comp. minéralogique du sol de Mars et Phobos	Succès scientifique et technique
		AUGUSTE	SA	18	Comp. chimique de l'atmosphère de Mars	Succès sc. et tech. partiel
		ASPEC/DION	LPCE	8	Injection d'ions dans le sol de Phobos	Echec sc. non imputable au LPCE
		FREGAT	LAS	1	Etalonnage de la caméra TV	Succès
		Sur le "Lander":				
		STENOPEE	SA	2.5	Mesure des mouvements propres de Phobos	Echec sc. non imputable au SA
		MICROCAMERA	SA	<1	Petites caméras placées sur l'atterrisseur (Lander)	idem
GALILEO (NASA)	1989				Mission d'étude de Jupiter	
		PWS	CRPE	2.3	Ondes du plasma de Jupiter	En cours, succès tech., pb NASA

ANNEXE 2.3 : SCIENCES DE L'UNIVERS / GEOPHYSIQUE EXTERNE

VEHICULE	LANCEMENT	EXPERIENCE	LABORATOIRE RESPONSABLE	COUT CNES (MF)	OBJECTIFS SCIENTIFIQUES	COMMENTAIRES
GEOS 1 et 2 (ESA)	1977-1978	S300	CRPE,LPCE	10	Etude de l'environnement plasma/particules de la Terre Ondes électromagnétiques et électrostatiques dans l'ionosphère	Succès scientifique et technique
		S310	CESR	<1	Détection des électrons et protons dans l'ionosphère	idem
ISEE1 et 2 (ESA/NASA)	1977	ONDES	CRPE,DESPA	5	Etude des zones frontières de la magnétosphère Densité de plasma dans le vent solaire (32 mesures/sec)	Succès scientifique et technique
		PARTICULES	CESR	3.5	Détection des particules énergétiques (1 à 10 keV)	idem
ISEE3 (ESA/NASA)	1978	RADIO	DESPA	2.5	Vent solaire, magnétosphère, comète Emissions radio solaires, terrestres, cométaires	Succès scientifique et technique
ARCAD3 (FR/URSS)	1981			20	Couplage entre phénomènes ionosphériques et magnétosphériques	
		Maitrise d'oeuvre	CNES			
		DYCTION	CRPE (LGE)		Spectromètre pour mesure des ions thermiques	Succès scientifique et technique
		TBF	idem		Composantes élect. et magn. des ondes UBF et TBF	idem
		TRAC	idem		Electronique de traitement du magnétomètre	idem
		SIR	idem		Senseur IR d'horizon terrestre pour restitution d'attitude	idem
		SPECTRO 1 et 2	CESR		Spectromètres à protons et électrons + spectro de masse	idem
		ISOPROBE	LPCE		Etude du plasma thermique et des ondes HF	idem
SPACELAB1 (ESA/NASA)	1983	PICPAB	LPCE,CRPE	4	Premier vol du laboratoire Spacelab de l'ESA Injection de particules énergétiques dans l'ionosphère	Succès scientifique et technique
VIKING (FR/SUEDE)	1986	ONDES	CRPE,LPCE	1	Ondes HF dans le plasma ionosphérique	Succès scientifique et technique
ULYSSES (ESA/NASA)	1990	STO	DESPA,CRPE	7	Vent solaire hors écliptique, survol des pôles du Soleil Ondes radio (Soleil, planètes) et locales (plasma)	Succès scientifique et technique

ANNEXE 3.1

**LES OBSERVATOIRES ORBITAUX ET LES SONDES
INTERPLANETAIRES
EN FONCTIONNEMENT**

1.ASTRONOMIE

DOMAINE SPECTRAL	MISSION	CADRE DE REALISATION	LANCEMENT/ LANCEUR	DUREE DE VIE	OBJECTIFS SCIENTIFIQUES
Gamma	GRANAT	URSS/Fr/Dk	1989/Proton	2 ans	Localisation des sources X et gamma, imagerie gamma à basse énergie (0.02-2MeV)
	GAMMA1	URSS/Fr	1990/Progress	2 ans	Imagerie de sources gamma de hte énergie
	Gamma-Ray Observatory (GRO)	NASA/All.	1991/Navette	5-10 ans	Grand Observatoire Spectroscopie à large bande et imagerie (1MeV-30GeV)
Rayons X	GINGA	Japon	1987/M2	>3 ans	Sources X compactes: spectroscopie et variabilité
	ROSAT	NASA/All.	1990/Delta	5 ans	Télescope imageur X (0.1-2 keV)
Ultraviolet	International Ultraviolet Explorer (IUE)	NASA/ESA	1978/Delta	12-15 ans	Télescope UV de 45cm pour spectroscopie basse et moyenne résolution. Fonctionne toujours.
Ultraviolet et Visible	Hubble Space Telescope (HST)	NASA/ESA	1990/Navette	15 ans	Grand Observatoire Télescope de 2.4m pour spectroscopie et imagerie UV et visible des étoiles, galaxies et planètes
Visible	HIPPARCOS	ESA	1989/Ariane 4	3 ans	1er satellite astrométrique
Ondes infrarouges, sub millimétriques et millimétriques	Cosmic Background Explorer (COBE)	NASA	1989/Delta	1 an pour la partie cryogénique	Rayonnement cosmologique à 3 degrés K; recherche d'anisotropies

ANNEXE 3.1 (SUITE)

2.SOLEIL, SYSTEME SOLAIRE, GEOPHYSIQUE EXTERNE

OBJET	MISSION	CADRE DE REALISATION	LANCEMENT/ LANCEUR	OBJECTIFS SCIENTIFIQUES
Soleil + Milieu Interplanétaire	ULYSSES	ESA/NASA	1990/Navette	Vent solaire hors de l'écliptique; survol des poles N et S du Soleil
	SOLARA	Japon	1991/M3	Observation du Soleil en rayonnement X et gamma
Vénus	PIONEER 12	NASA	1978/Atlas	Sonde en orbite autour de Vénus, observe toujours son atmosphère
	MAGELLAN	NASA	1989/Navette	En orbite autour de Vénus, géologie, géodésie et altimétrie par radar
Lune	MUSES A	Japon	1990/M2	Qualification des techniques gravitationnelles nécessaires à LUNAR A
Petits corps (Astéroïdes, comètes)	GIOTTO réactivée (GIOTTO E.M.)	ESA	1985/Ariane	A survolé la comète de Halley en 1986. Ranimée en 1990 pour survol de la comète Grigg-Skjellerup en juillet 1992
Jupiter + Petits Corps	GALILEO	NASA/All.	1989/Navette	Etude de Jupiter et de ses satellites en 1995-97 au moyen d'un orbiteur et d'une sonde de pénétration dans l'atmosphère Survole de l'astéroïde Gaspara prévu en 1992, durant le trajet vers Jupiter

3.2 LES OBSERVATOIRES ORBITAUX ET SONDES INTERPLANETAIRES APPROUVES

L.ASTRONOMIE

DOMAINE SPECTRAL	MISSION	CADRE DE REALISATION	LANCEMENT/ LANCEUR	DUREE DE VIE	OBJECTIFS SCIENTIFIQUES
Rayonnement cosmique	Advanced Composition Explorer (ACE)	NASA	1997/Delta	?	Abondance des éléments et de leurs isotopes dans les rayons cosmiques
Rayons X	ASTRO-D	Japon	1993/M3	2 ans	Imagerie et spectroscopie à haute sensibilité de sources X
	Satellito (per) Astronomia X (SAX)	Italie/All./ Pays Bas	1993/Atlas	2 ans	Imagerie, spectroscopie et variabilité (0.1-200 keV)
	SPECTRUM X *	URSS/NASA/ Europe	1994 ou 1995/Proton	2 ans	Spectroscopie, imagerie, polarimétrie de sources X
	X-Ray Timing Explorer (XTE)	NASA	1996/Delta	2 ans	Spectroscopie à large bande et variabilité de sources X compactes (1-200 keV)
	Advanced X-Ray Astronomy Facility (AXAF)	NASA	1998/?	15 ans	Grand Observatoire Imagerie haute résolution et spectroscopie du ciel X
	X-Ray Multi-mirror Mission (XMM)	ESA	1998/Ariane 4 ou Ariane 5	10 ans	"Pierre angulaire" de l'ESA Spectroscopie et imagerie dans le domaine X mou à très haute sensibilité
Ultraviolet	Extreme Ultraviolet Explorer (EUVE)	NASA	1992/Delta	2 ans	Spectroscopie large bande de sources X brillantes (8-90nm)
	Orbiting and Retrievable Far and Extreme UV Spectrometer (ORFEUS)	NASA/All.	1992/Navette	1 semaine	Télescope de 1m pour spectroscopie de haute sensibilité (40-120nm)
	SPECTRUM-UV *	URSS/Ital.	1994-95?/Proton	2 ans	Télescope de 1.7m pour spectroscopie (90-900nm) et imagerie à grand champ
	Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer (FUSE)	NASA	1999/Delta	2 ans	Télescope de 70cm, à incidence rasante pour spectroscopie à longueurs d'onde <120nm
Infrarouge	Infrared Space Observatory (ISO)	ESA	1993/Ariane4	18 mois	Télescope de 60cm refroidi par cryogénie pour spectrophotométrie, spectroscopie et imagerie de sources IR
	Infrared Telescope in Space (IRTS)	Japon	1994/Navette	6 semaines	Télescope de 15cm pour imagerie et spectroscopie de sources IR
Ondes submillimétriques	Submillim. Wave Astronomy Satellite (SWAS)	NASA	1995/Scout	12-18 mois	Télescope de 55cm non refroidi pour étude spectroscopique du plan galactique (480-550GHz)
Ondes radio	RELICT2	URSS	1992/Proton	2 ans	Anisotropie à grande échelle et spectroscopie du rayonnement cosmologique à 3 degrés Kelvin
	RadioAstron *	URSS/Europe/ USA.	1994-95?/Proton	2 ans	Antenne de 10m pour radio-interférométrie à très longue base (VLBI) en orbite
	VLBI Space Observatory Program (VSOP)	Japon/USA/ Europe	1995/M5	2 ans	Observations radio-interférométriques à longue base

ANNEXE 3.2 (SUITE)

2.SOLEIL, SYSTEME SOLAIRE, GEOPHYSIQUE EXTERNE

OBJET	MISSION	CADRE DE REALISATION	LANCLEMENT/ LANCEUR	OBJECTIFS SCIENTIFIQUES
SOLEIL	FLURECA	ESA	1992/Navette	Détermination de la "constante" solaire; fluctuations et variations du flux solaire
	Solar and Heliospheric Observatory (SOHO)	ESA/NASA	1995/Atlas	"Pierre angulaire" de l'ESA (avec CLUSTER) Étude de la couronne solaire, de l'héliosphère et de la structure interne (au moyen des oscillations)
	KORONAS	URSS	1993-94	2 satellites d'observation du Soleil dans les rayonnements X et gamma
	ATLAS *	NASA	1991 ou 92/ Navette	Revol de Spacelab1. Emporte un spectrographe UV solaire
Lune	LUNARA	Japon	1996/M5	Orbiteur lunaire + pénétrateurs pour étude de la structure interne de la Lune
Mars	MARS OBSERVER *	NASA	1992/Titan	Sonde en orbite autour de Mars pour étude de l'atmosphère et de la géologie de la planète
	MARS 94 *	URSS/Fr/ Europe	1994/Proton	Sonde en orbite martienne à la fin 95 + station au sol + pénétrateur
Saturne + Petits Corps	CASSINI/ HUYGENS *	NASA/Europe	1995/Titan	Sonde en orbite autour de Saturne + capsule larguée dans l'atmosphère de Titan. Survol d'un astéroïde en 1997
Petits corps (Astéroïdes, comètes)	Comet Rendez-vous and Asteroid Fly-By (CRAF)	NASA/ESA	1996/Titan	Survol d'un astéroïde et de deux comètes (Kopff en 2000, Wild2 en 2001)
Milieu Interplanétaire	Tethered satellite (TSS)	NASA/Ital.	1991/Navette	Sondage de l'ionosphère terrestre au moyen d'un câble conducteur
	INTERBALL	URSS/Fr	1992/Proton?	Interaction du vent solaire avec la magnétosphère terrestre
	GEOTAIL	Japon/NASA	1992/Delta	Magnétosphère terrestre en aval du vent solaire
	REGATTA *	URSS	1993?	Vent solaire et magnétosphère terrestre (satellite stabilisé par une voile solaire)
	FREJA	Suède/All.	1992/Longue Marche CZ-2C	Phénomènes ionosphériques et magnétosphériques aux hautes latitudes geomagnetiques et aux altitudes < 2000 km
	WIND	NASA	1992	Vent solaire
	POLAR	NASA	1993	Aurores polaires
	Combined Released Radiation Effect Satellite (CRRES)	NASA	199?	Aurores polaires et ionosphère terrestre au moyen de traceurs chimiques
	CLUSTER	ESA	1995/Ariane 5	"Pierre angulaire" de l'ESA (avec SOHO) 4 sondes pour l'étude de la magnétosphère terrestre à petite échelle

NOTE: Les missions marquées d'une astérisque ont une date de lancement encore ouverte
L'ordre de lancement de SpectrumX, Spectrum UV et Radioastron n'est pas encore fixé

3.3 LES OBSERVATOIRES ORBITAUX ET LES SONDES INTERPLANETAIRES A L'ETUDE

1.ASTRONOMIE

DOMAINE SPECTRAL	MISSION	CADRE DE REALISATION	LANCEMENT/ LANCEUR	STATUT	OBJECTIFS SCIENTIFIQUES
Gamma	INTEGRAL	ESA/NASA + URSS?	2000/Titan ou Proton	Etude	Imagerie gamma avec positionnement fin et spectroscopie à haute résolution
Rayons X	SPECTROSAT	All.	1996	Proposition	Spectroscopie à haute résolution de sources X (0.6-25nm)
	Schmidt X-Ray	NASA/Ital.	1996	Proposition	Télescope à grand champ et haute résolution (0.1-2keV)
Ultraviolet	Santa Maria	NASA/Ital./ Espagne	1995	Etude	Observatoire UV pour imagerie et spectroscopie (20-700nm)
	TRUST	Ital.	> 2000	Proposition	Télescope pour imagerie à grand champ et haute résolution dans bandes spectrales choisies
Visible	LOMONOSOV	URSS	2000?	Proposition	Astrométrie et photométrie (comme Hipparcos)
	PRISMA	ESA	2000	Etude	Astérosismologie et variabilité magnétique des étoiles
Infrarouge	Space Infrared Telescope (SIRTF)	NASA	2000?/Titan	Etude	Grand Observatoire Télescope de 90cm refroidi à l'hélium pour imagerie et spectroscopie de sources IR
	EDISON	NASA/Gde Bretagne	>2000	Proposition	Télescope de 2.5m refroidi passivement pour spectrophotométrie et spectroscopie de sources IR faibles
Ondes submillimétriques	MOSES	Suède/Pays Bas/Finlande	1995 ou 1996	Etude	Télescope de 70cm pour observation des raies de H ₂ O et CO dans l'atmosphère de la Terre et le milieu interstellaire
	AELITA	URSS	fin des années 90?	Proposition	Télescope de 1m refroidi cryogéniquement pour photométrie multibandes et polarimétrie (300m-3mm)
	Submillimeter and Infrared Line Survey (SMILS)	NASA	> 2003	Etude	Télescope Cassegrain 2.5/ 3.7m non refroidi, pour survey submill. et IR lointain de la Galaxie
	Far Infrared + Submm. Space Telescope (FIRST)	ESA	2003?/Ariane 5	2 à 3 ans	"Pierre Angulaire" de l'ESA Télescope de 4.5 m non refroidi pour spectroscopie hétérodyne et imagerie à haute sensibilité
	Large Deployable Reflector (LDR)	NASA	> 2003	Etude	Télescope déployable de 10/20m pour imagerie submm et IR lointain, photométrie et spectroscopie

ANNEXE 3.3 (SUITE)

2. SOLEIL, SYSTEME SOLAIRE, GEOPHYSIQUE EXTERNE

OBJET	MISSION	CADRE DE REALISATION	LANCEMENT/ LANCEUR	STATUT	OBJECTIFS SCIENTIFIQUES
SOLEIL	Orbiting Solar Laboratory (OSL)	NASA	>2000	Proposition	
	Solar Probe (VULCAN)	NASA	>2000	Proposition	Observations in situ du plasma du vent solaire à très proche distance du Soleil
Mercurie	Mercury Orbiter	NASA	2007	Proposition	
Venus	Atm/Surf Probe	NASA	2009	Proposition	
Lune	Lunar Orbiter	NASA	2000	Etude	1ère étape de l'initiative Bush. Orbiteur polaire pour cartographie de la Lune
Mars	MESUR (Mars Environment Survey)	NASA	>2000	Etude	Réseau de stations géophysiques sur Mars
	MARSNET	ESA/NASA	>2000	Etude	Réseau de 3 stations sur Mars, à l'intérieur du réseau MESUR
	MARS 96	URSS	1996/Proton	Etude	Orbiteur autour de Mars + module de descente (ballon et petit rover)
	MARS 98	URSS	1998?/Proton	Proposition	Orbiteur autour de Mars + descente d'un grand rover
	MARS 2001	URSS	2001-2003	Proposition	Retour d'échantillons martiens
Petits corps (Astéroïdes, comètes)	NEAR	NASA	2003	Proposition	Survol d'astéroïdes envoi d'un opérateur sur un gros astéroïde
	Comet Nucleus Sample Return (CNSR)	NASA	2002	Proposition	Mission cométaire: -lander sur un astéroïde -lander sur une comète
	ROSETTA	ESA/NASA	2005?	Etude	"Pierre Angulaire" Rendez-vous avec une comète et retour d'un échantillon du noyau
Jupiter	Jupiter Grand Tour	NASA	2006	Proposition	Etude en profondeur du système jovien. Lander sur 2 satellites galiléens
Uranus/Neptune	Orbiter/Probe	NASA	2003	Proposition	Etude comparative des systèmes Uranus et Neptune
Pluton	Flyby	NASA	1997-98?	Etude	1ère reconnaissance du système Pluton/Charon
Milieu Interplanétaire	PLASMA	ESA		Proposition	
	IMPACT	All./Suède		Proposition	

NOTES : 1) Une partie seulement de ces missions à l'étude verra le jour

2) Les budgets des "pierres angulaires" FIRST et ROSETTA sont identifiés à l'ESA, elles sont approuvées en principe, mais leur ordre de réalisation n'est pas décidé.

ANNEXE 4

TRES GRANDS EQUIPEMENTS ASTRONOMIE SOL ET
ESPACE

	1990			1991			1992			1993			1994		
	PERS	EXPL	CONS	PERS	EXPL	CONS	PERS	EXPL	CONS	PERS	EXPL	CONS	PERS	EXPL	CONS
ASTRONOMIE AU SOL															
ESO HAE	24	25	15	28	24	31	29	24	37	29	24	42	29	24	42
CEN CHRS	7	10	0	7	10	0	8	11	0	8	11	0	8	11	0
IRAH CHRS	17	13	0	18	13	0	18	14	0	18	14	0	18	14	0
TOTAL ASTRO. AU SOL	48	46	15	53	47	31	55	49	37	55	49	42	55	49	42
		61			78			86			91			91	
ASTRONOMIE SPATIALE															
HIPPARCOS CHES	0	21	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
ISO CHES	0	0	120	0	0	90	0	0	65	0	1	29	0	1	9
CEA	7	0	10	7	0	2	7	0	2	7	0	2	7	0	2
TOTAL	7	0	130	7	0	92	7	0	67	7	1	31	7	1	11
SIGMA CHES	0	3	0	0	3	0	0	2	0	0	1	0	0	1	0
CEA	4	2	0	4	2	0	4	2	0	4	2	0	4	2	0
TOTAL	4	5	0	4	5	0	4	4	0	4	3	0	4	3	0
SOHO CLUSTER CHES	0	0	78	0	0	153	0	0	191	0	0	177	0	0	178
CEA	0	0	3	1	0	4	2	0	2	2	0	1	2	0	1
TOTAL	0	0	81	1	0	157	2	0	193	2	0	178	2	0	179
TOTAL ASTRO. SPATIALE	11	26	211	12	6	249	13	5	260	13	5	209	13	4	180
		237			255			265			214			184	
TOTAL ASTRONOMIE															
	59	72	226	65	53	280	68	54	297	68	54	251	68	53	182
		298			333			351			305			155	

TABLEAU J - 2 ASTRONOMIE

(NF 90, puis NF 91)

	1990			1991			1992			1993			1994			
	PERS	EXPL	CONS	PERS	EXPL	CONS	PERS	EXPL	CONS	PERS	EXPL	CONS	PERS	EXPL	CONS	
PLANÉTOLOGIE																
MARS 94	CNES	0	0	25	0	0	36	0	0	38	0	0	16	0	0	7
CASSINI	CNES	0	0	0	0	0	21	0	0	26	0	0	95	0	0	83
	CEA	0	0	0	0	0	4	2	0	3	2	0	2	1	0	1
	TOTAL	0	0	0	0	0	25	2	0	29	2	0	97	1	0	84
TOTAL PLANÉTOLOGIE		0	0	25	0	0	61	2	0	117	2	0	113	1	0	91
			25			61			117			113			91	

Source: Rapport du Conseil des Grands Equipements Scientifiques (Ministère de la recherche et de la technologie, Février 1991)

ANNEXE 5

COUT DES GRANDES MISSIONS EN COURS A L'ESA
 (hors instruments et personnel, payés par les états-membres)
 Unités: MUC = Millions d'unités de compte au taux 1990/91, MF = millions de F 1991
 (1MUC = 7 MF)

NOM	STATUT	COUT TOTAL RAMENE A L'ANNEE D' APPROBATION (MUC)	NIVEAU APPROBATION (MUC)	ANNEE APPROBATION	COUT POUR LA FRANCE (MF)
EXOSAT	mission achevée (ESA)	151	124.5	1978	257.7
HUBBLE SPACE TELESCOPE	en orbite, lancement 1990 (NASA/ESA)	152			340
Développement Opérations		117 35	61 28	1977 1982	
ULYSSES	en orbite, lancement 1990 (ESA/NASA)	120.3	103	1981	210
HIPPARCOS	en orbite, lancement 1989 (ESA)	286.6	244	1983	453
GIOTTO E.M. (Extended Mission)	réactivation (ESA)	6.7	6.8	1991 pour la réactivation	9
INFRARED SPACE OBSERVATORY (ISO)	lancement 1993 (ESA)	389.7	387	1987	537
STSP (SOHO + CLUSTER)	lancement 1995 " 1ère Pierre Angulaire" ESA/NASA	479.2	460	1984	811
HUYGENS	lancement 1996 (ESA)	189.6	192	1987	271
XMM	lancement 1998 " 2ème Pierre Angulaire" (ESA)	407.2	400	1984	661

NOTE: La colonne 5 indique l'année d'approbation, sauf pour ISO, STSP, HUYGENS et XMM, pour lesquels l'année indique les conditions économiques (c'est à dire celles qui fixent la valeur de l'unité de compte) correspondant au niveau d'approbation.

SOURCE: document ESA/SPC(91)25

ANNEXE 6

**LIGNE SCIENCES DE L'UNIVERS DU BUDGET DU
CNES (MF courants TTC)**

RUBRIQUE	1987	1988	1989	1990	1991	1992 (Prévisions)
Contribution de la France au budget Science de l'ESA	223	233	258	273	288	325
Construction d'instruments (pour satellites, sondes, ballons)	123	85	120	149	171	192
Satellite Topex-Poseidon		95	170	164	232	147
Programme national Ballons (hors instruments)	18	18	18	19	23	24
Fonctionnement de la station d'Aire sur Adour	3	3	4	4	4	5
Soutien des laboratoires spatiaux	20	18	18	19	19	25
TOTAL:	388	452	588	629	737	718
<i>% BUDGET SCIENCE/DOTATION CNES TOTALE</i>	7.7%	8.3%	9.1%	8.8%	9.1%	8.4%

NOTE: La ligne "Sciences de l'Univers" du budget du CNES inclut:

- les sciences de l'univers au sens du chapitre 2 du rapport de l'Office Parlementaire (astronomie, physique solaire, étude du système solaire, géophysique externe)
- les sciences de la Terre et de son environnement (chapitre 3 du même rapport)

ANNEXE 7

**COMPARAISON DE L'EFFORT SCIENTIFIQUE
SPATIAL FRANCAIS A CELUI DES PRINCIPAUX
PARTENAIRES EUROPEENS DE LA FRANCE**

(MUC 1990)
1 MUC = 6.97 MF

	France	Allemagne	Italie	Grande Bretagne	Total des pays ESA	France/ (Total des pays ESA)
1 Contribution totale à l'ESA	511.4	430.3	269.3	127.83	1687.88	0.30
2 Contribution au programme scientifique obligatoire de l'ESA	38.9	49.6	29.5	33.57	216.21	0.18
3 Contribution aux instruments emportés par les missions ESA	10.9	17.6	3.1	14.13	58.94	0.185
4 Total science ESA (lignes 2+3)	49.8	67.2	32.6	47.7	275.15	0.18
5 Projets scientifiques spatiaux nationaux et bilatéraux	13.6	29.6	9.3	4.34	78.22	0.17
6. Total Science Spatiale (lignes 4 + 5)	63.4	96.8	41.9	52.04	353.37	0.18
7. Total Science Spatiale / Contribution totale ESA (ligne 6 / ligne 1)	0.124	0.225	0.155	0.41	0.21	
8. Contribution aux instruments ESA / Contribution au programme scientifique ESA (ligne 3 / ligne 2)	0.28	0.35	0.105	0.42	0.27	

SOURCE: document ESA SOL(91)4

ANNEXE 8

EXEMPLES DE TECHNOLOGIES SPATIALES DEVELOPPEES A DES FINS SCIENTIFIQUES ET UTILISABLES DANS D'AUTRES DOMAINES

TECHNOLOGIE DEVELOPPEE	PROJET SCIENTIFIQUE A L'ORIGINE	AUTRES UTILISATIONS
Mémoires à bulles magnétiques	Expérience SIGMA sur GRANAT	Mémoires en cassettes pour stockage de données à l'usage des cosmonautes de l'avion spatial Hermès. Stockage de données de l'expérience Végétation (sur SPOT4?)
DATA (Dispositif d'Acquisition et de Traitement Adaptatif)	Expérience SIGMA sur GRANAT	Satellite Topex-Poseidon, indirectement gestion de charges utiles de télécommunications
ASTRES (Operating System DATA)	Expérience SIGMA sur GRANAT	Avion spatial Hermès; système de transmission par fibres optiques SILEX du satellite relais de transmission ARTEMIS de l'ESA
Technologie d'assemblage de composants électroniques "Report chip carrier"	Expérience SIGMA sur GRANAT	Technologie haute densité d'intégration pour tout projet
Senseur stellaire	Expérience SIGMA sur GRANAT	Pointage fin du satellite militaire de reconnaissance HELIOS
Amplificateur "état solide" à 12 GHz	Satellite Topex-Poseidon	Charges utiles hyperfréquences à faible masse
Oscillateurs ultrastables	Système de positionnement DORIS	TELECOM2 et probablement les suites du programme ARGOS
Mémoires à semi-conducteurs	MARS 94	Mémoires numériques de stockage
Système de compression d'images	MARS 94	Imagerie pour l'observation de la terre
Décodeur VITERBI	MARS 94	Système de transmission de données aux standards internationaux
Réseau holographique UV très haute densité	Mission FUSE (NASA)	Industrielles
Robotique mobile	VAP (Véhicule Automatique Planétaire)	Industrielles
Matrice de capteurs CCD amincis	Pierre Angulaire XMM de l'ESA	Expériences d'observation de la Terre (GOMOS sur la Plateforme Polaire du programme Columbus, satellite GLOBSAT ...)
Assemblage par thermosoudure des peaux de ballons	Programme Ballons	Assemblage des bateaux pneumatiques Zodiac
Matériaux complexes VENERA	idem	Composites souples pour bateaux ZODIAC et voiles complexes
Matériaux linéaires et irradiés	idem	Supercongélation
Assemblage de matériaux non thermosoudables	idem	Voiles
Matériaux polymères	idem	Structures spatiales gonflables
Gonflage en vol	idem	Treuillage, transport

SOURCE: CNES

ANNEXE 9

**PERSONNEL ET BUDGET CONSOLIDE EN 1990
(TOUTES ORIGINES)**

	"SPATIAL"	"SOL"	TOTAL
1. PERSONNEL			
Chercheurs en poste (NC)	185	462	647
ITA (Total en poste)	520	838	1358
CDD	32	-	32
Boursiers	57	83	140
Chercheurs invités	37	43	80
TOTAL PERSONNEL	831	1426	2257
2. SALAIRES du PERSONNEL	220 MF	306.7 MF	606.7 MF
3. INVESTISSEMENT + FONCTIONNEMENT	512.8 MF	213.8 MF	726.6 MF
4. BUDGET TOTAL (SALAIRES + INVESTISSEMENT + FONCTIONNEMENT)	732.8 MF	600.5 MF	1333.3 MF
5. MVT ITA DE 85 A 90			
Arrivées - Départs	- 29	- 67	- 96
6. (INVT + FONCT) / SALAIRES	2.33	0.55	1.20
7. (INV + FONC) / (NC + NIR)	1.838 MF	0.364 MF	0.744 MF

NOTE: Le tableau concerne, pour des raisons de classement CNRS, les 8 laboratoires spatiaux de l'annexe 1, hors Laboratoire de Météorologie Dynamique.

Les crédits sont en MF TTC 1990.

Les salaires ont été calculés sur la base:

chercheur et ingénieur de recherche	350 kF/an
ingénieur d'étude	300 kF/an
technicien et administratif	200 kF/an
autre	150 kF/an

NC= Nombre de chercheurs, NIR = Nombre d'ingénieurs de recherche (voir annexe 1)

CDD= Contrat à durée déterminée

SOURCE: INSU

OFFICE PARLEMENTAIRE
D'EVALUATION DES CHOIX
SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES

EXPERTISE n°3

OBSERVATION DE LA TERRE

(Contribution au rapport présenté par Paul LORIDANT, Sénateur de l'Essonne,
sur les ORIENTATIONS DE LA POLITIQUE SPATIALE FRANCAISE ET EUROPEENNE)

André LEBEAU

ANDRE LEBEAU

ETUDES

Lycée Saint-louis

Ecole Normale Supérieure de la rue d'Ulm (Promotion Sciences 1952)

DIPLOMES

Agrégé de l'Université (Sciences physiques 1956)

Docteur ès Sciences (1956)

CARRIERE

1956-1958 Membre de la deuxième expédition Antarctique française de l'année géographique internationale (Construction de la station Dumont d'Urville: Terre Adélie)

1958-1960 Service national dans la Marine Nationale en qualité d'ingénieur de l'armement (ingénieur en chef de l'armement de réserve)

1961-1964 Créateur et Directeur du groupe de recherche ionosphériques (jouissant du double statut de laboratoire propre du CNRS et du département du CNET)

1965-1975 Directeur des programmes et du plan puis Directeur Général Adjoint chargé des programmes de politique industrielle (1972) au Centre National d'Etudes Spatiales.

1975-1980 Directeur Général Adjoint et Directeur des programmes futurs et des plans de l'Agence Spatiale Européenne.

1980-1983 Directeur de la mission du Musée des Sciences et de l'Industrie de la Vilette.

Depuis 1980 Professeur titulaire au Conservatoire National des Arts et Métiers, Chaire de Techniques et programmes Spatiaux. Président du Département Economie et Gestion

Depuis 1986 Directeur de la Météorologie Nationale

1987-1990 Président des Expéditions polaires Française (Missions Paul-Emile VICTOR)

Depuis juin 1990 Président du Conseil d'EUMETSAT.

ACTIVITES

Membre de l'Académie Astronautique Internationale et de l'Académie Nationale de l'Air et de l'Espace.

Membre du Conseil Consultatif des terres Australes et Antarctiques Françaises et Président (1980-1986) du Comité Scientifique des TAAF.

OEUVRES

Les courants électriques dans l'ionosphère des régions polaires (Thèse 1965)

L'espace en héritage, Ed O.Jacob, 1986

Choix stratégiques et grands programmes civils (avec Patrick Cohendet) Economica 1987

L'écrivain public et l'ordinateur (avec Jean-Jacques SALOMON)

DECORATIONS

Chevalier de la Légion d'Honneur

Commandeur de l'Ordre National du Mérite

DISTINCTIONS

Médaille d'Argent de la jeunesse et des Sports

Médaille Franck Malina de la Fédération Astronautique Internationale.

Ce rapport a été préparé à la demande Monsieur le Sénateur Loridant par un groupe de travail composé, outre moi-même, de Gérard Brachet, Michèle Chevrel, Alain Gaubert, Michel Lefebvre, Gérard Mégie et Claude Pastre.

La communauté scientifique a été consultée par l'intermédiaire de Gérard Mégie et de Michel Lefebvre.

La rédaction est le fruit d'un travail collectif et le contenu exprime l'opinion commune des membres du groupe.

André Lebeau

1. Préambule.	7
2. Position du problème.	9
2.1. Catégories d'objectifs civils.	10
2.2. Caractères principaux de ces catégories de programmes.	10
2.3. Commentaires généraux sur les programmes d'observation de la Terre.	13
a. Fondements techniques et industriels.	13
b. L'homme dans l'espace.	14
c. La symbiose recherche scientifique / application.	16
d. Besoins spécifiques en moyens de lancement.	20
3. Etat des lieux en Europe et dans le Monde.	21
3.1 Observation à haute définition et gestion des ressources de la planète.	21
3.2 Maîtrise du système climatique et de ses interactions avec la biosphère.	25
3.3 Systèmes ancillaires de télécommunication et de transfert de données.	29
4. Analyse de problèmes horizontaux.	
4.1 Une analyse générale de la contrainte de	33

continuité.	33
4.2 Problèmes techniques et industriels.	35
4.3 Problèmes institutionnels.	43
4.4 L'organisation du segment terrien.	47
4.5 Le développement des applications.	53
5. La recherche scientifique.	54
6. Scénarios pour l'Europe et pour la France.	69
6.1 Aspects programmatiques.	69
6.2 Organisation des responsabilités institutionnelles.	78
7. Conclusions et recommandations.	83

1. Préambule.

Les programmes spatiaux d'observation de la Terre servent un double objectif, connaissance de la planète Terre et maîtrise de sa gestion.

Ces objectifs s'inscrivent dans le contexte du *changement global*, c'est-à-dire des transformations de l'environnement planétaire engendrées par l'activité de la société humaine et susceptibles, en retour, de perturber, voire de menacer le développement de cette société. Ils relèvent plus généralement d'une prise de conscience du caractère limité des ressources de la planète et de la fragilité de certaines composantes de l'environnement.

Il s'agit de comprendre le fonctionnement de l'écosystème terrestre dans sa globalité - objectif qui est très loin d'être atteint -, d'en prévoir, dans la mesure où elle est prévisible, l'évolution, d'en assurer la surveillance permanente ; il s'agit aussi de fournir aux décideurs les bases nécessaires à la conduite du développement socio-économique, singulièrement dans la mesure où ce développement interagit avec l'environnement terrestre.

L'observation spatiale de la Terre sert donc à la fois une *science*, la connaissance de la planète, et une *technique*, la gestion des ressources de cette planète. Ces deux dimensions sont indissolublement liées. **L'attention croissante que ce secteur de la connaissance scientifique reçoit des cercles politiques et médiatiques ne tient évidemment pas à son importance scientifique intrinsèque ; elle tient à la relation privilégiée qu'il entretient avec des enjeux socio-économiques majeurs.**

La constatation de cette évidence entraîne une conséquence non moins évidente, c'est qu'une **attention particulière doit être portée, dans la conception des programmes, à la relation entre recherche de connaissances nouvelles et fourniture de service**, ou encore, pour utiliser le vocabulaire de la technique spatiale, entre *science et application*.

Dans tout ce domaine, la science est au service de l'application présente ou future, mais naturellement la quête de l'application ne doit pas brider la science au risque de la stériliser. **La maîtrise de cette symbiose science-application dans la conception des programmes est une contrainte capitale**; une contrainte qui ne reçoit pas toujours l'attention nécessaire.

Par ailleurs, l'état de l'art en matière de techniques spatiales ancillaires - lanceurs et plates formes - suffit à pourvoir aux exigences des programmes d'observation de la Terre. Il n'est nul besoin de technologies spatiales nouvelles et exotiques comme préalable à leur développement; tout au contraire, les technologies disponibles sont insuffisamment utilisées. En revanche, des efforts majeurs de développement sont requis pour la création ou le perfectionnement des instruments d'observation qui, en l'état actuel du savoir-faire, demeurent très insuffisants.

Cela comporte deux conséquences:

- d'abord la conception des programmes d'observation de la Terre doit être gouvernée par une logique des besoins de ces programmes, et non par une logique du progrès de la technique spatiale. Nous verrons que tel n'est pas toujours le cas.

- ensuite les problèmes programmatiques que pose ce secteur sont d'abord des problèmes à court et moyen terme, des problèmes d'utilisation des moyens disponibles. Il s'agit assez souvent, en Europe notamment, de faire ce qui aurait pu ou dû être fait hier.

Dans tout programme spatial correctement conçu, un équilibre doit s'établir entre un volet orienté vers l'acquisition de techniques nouvelles, vers une nouvelle génération d'engins astronautiques, et un volet consacré à l'exploitation des techniques acquises, à l'occupation du terrain conquis. Le programme spatial d'observation de la Terre appartient pour l'essentiel à la seconde catégorie; il constitue une justification majeure des efforts consentis hier dans l'acquisition de la technique spatiale, il ne saurait servir d'alibi à une fuite en avant.

Nous serons amenés à souligner à différentes reprises, dans ce rapport, qu'une importance égale s'attache au segment terrien et au segment spatial. Cependant, il n'y a pas symétrie entre les problèmes que posent ces deux éléments, ne serait-ce que parce que ceux qui s'attachent au second ne se posent que moyennant l'existence du premier. Nous avons mis l'accent sur la recherche de solutions au développement du segment spatial et nous ne sommes pas entrés, à ce stade, dans le détail des démarches qu'appelle la création d'un segment terrien efficace, nous bornant à en préciser les objectifs.

2. Position du problème .

L'importance du rôle de la technique spatiale dans l'observation de la Terre tient à deux caractères qu'elle est seule à posséder:

- elle permet d'observer avec le même instrument, et donc de façon homogène, toute la surface du globe indépendamment de l'accessibilité ou de l'habitabilité des zones concernées: continents, océans, glace de mer, inlandsis polaire.
- elle fournit le recul nécessaire à l'appréhension des structures à grande échelle: courants océanographiques, systèmes dépressionnaires.

Du fait de ces qualités intrinsèques, elle se présente, non pas comme un complément aux systèmes d'observation disposés à la surface de la Terre, mais à l'inverse comme la technique principale dans tout le domaine, soit qu'elle le soit déjà, soit qu'elle ait vocation à le devenir.

Nous nous proposons dans ce qui suit d'aborder les programmes spatiaux d'observation de la Terre comme un tout cohérent. Cependant l'analyse d'un domaine aussi vaste et aussi complexe exige que l'on y introduise des catégories.

Nous utiliserons, pour organiser cette présentation, des catégories fondées sur les objectifs des programmes.

Il s'agit en l'occurrence d'objectifs civils; nous avons exclu du champ de l'étude les satellites à objectif militaire ou stratégique. Ce parti pris n'est pas sans inconvénient. Il existe en effet des relations profondes et diverses entre les programmes civils et militaires d'observation. L'infrastructure industrielle et technique est souvent commune; tel est le cas en France pour les programmes Spot et Helios, aux Etats-Unis pour les satellites météorologiques civils Tiros et militaires DMSP. D'ailleurs les satellites civils d'observation à haute définition fournissent - on l'a mesuré à l'occasion de la guerre du Golfe - des informations militaires et stratégiques précieuses, et, à l'inverse, les observations des satellites militaires recèlent sans aucun doute des potentialités scientifiques importantes, largement inexploitées en raison des difficultés d'accès à ces données. Cependant les données du satellite altimétrique Geosat de l'US Navy ont été mises pendant 3 ans à la disposition des chercheurs et les projets suivants GFO (Geosat Follow On) le prévoient et tiennent compte des aspects recherche sur le climat.

On peut identifier des cas où une programmation ayant un tronc commun peut être envisagée ; c'est ainsi que le système GPS, malgré les difficultés d'accès, est largement utilisé. Mais c'est aussi le cas des données radiométriques des plate-formes météorologiques militaires DMSP disponibles en temps différé ; il est tout à fait envisageable de programmer des satellites qui remplissent à la fois des objectifs militaires (opérationnalité, temps réel ou peu différé, maîtrise du système) et des objectifs civils (temps différé mais précision du système améliorée)

Il reste que les mécanismes de décision par lesquels sont créés les programmes militaires, leurs modalités d'exploitation et les structures impliquées en font une catégorie nettement à part.

2.1 Catégories d'objectifs civils.

Nous distinguerons quatre catégories :

1. l'observation à haute définition de la surface des continents à des fins de gestion de ressources : il s'agit des satellites dont l'archétype est le Landsat américain (initialement nommé satellite technologique de ressources terrestres: earth resources technological satellite, ERTS), et dont le type le plus avancé aujourd'hui est Spot.

2. l'observation de l'atmosphère, des océans et de certains aspects de la surface des continents à des fins de maîtrise du système climatique et de ses interactions avec la biosphère : cet objectif s'inscrit, nous l'avons dit, dans le contexte du changement global.

3. les systèmes de télécommunication spécialisés souvent embarqués sur les satellites des catégories 1 et 2 : système Argos embarqué sur le satellite météorologique Tiros, système MDD (dissémination de données) et DCP (data collection platform) embarqués sur les Meteosat, etc.

4. la connaissance de la Terre solide, par l'observation du géoïde, des mouvements de l'écorce terrestre, du champ magnétique interne, etc.

2.2 Caractères principaux de ces catégories de programmes.

C'est un fait d'observation que les catégories 1 et 2 sont nettement distinctes. Cela tient à la nature des activités qu'elles servent.

1. Les programmes relevant de la première catégorie intéressent, pour l'essentiel, l'observation des zones de la surface terrestre soumises à souveraineté nationale et à appropriation; ils permettent une meilleure connaissance des ressources renouvelables et non renouvelables qui sont contenues dans ces zones; ils fournissent des observations utiles au développement de nombreuses activités socio-économiques, au premier rang desquelles l'agriculture. Il en résulte que l'exploitation de ces programmes suscite une activité de caractère commercial.

Par ailleurs la technique spatiale fournit dans ce domaine un service largement nouveau; elle ne se substitue que partiellement à une technique existante, l'observation aéronautique, sévèrement limitée par les contraintes de souveraineté et incapable de ce fait, comme du fait de ses limitations techniques, d'assurer une couverture globale. Cela fait qu'il n'existait à l'origine des programmes ni marché de substitution, ni structure d'utilisation, ni même perception du besoin chez les usagers potentiels, situation radicalement différente de celle qui prévalait, par exemple, dans le domaine des télécommunications ou de la météorologie spatiales. L'utilisateur final est en général incapable, faute de détenir l'expertise nécessaire, d'exploiter lui-même les observations pour la solution de son problème ; le développement des usages de l'observation à haute définition spatiale passe donc par le développement d'un réseau de sociétés de service, intermédiaires indispensables entre le fournisseur de données brutes et l'utilisateur final. Un tel processus est nécessairement lent, et il exige de la part des états promoteurs qu'ils interviennent pendant toute la phase de constitution du marché et qu'ils fassent preuve d'une grande volonté de continuité. Faute de l'avoir compris, ou de disposer de mécanismes capables d'y pourvoir, les Etats-Unis ont gâché l'avance dont ils disposaient dans ce domaine.

La création d'un marché et d'une activité commerciale nouvelle est donc un aspect distinctif de ce secteur. L'importance de cette dimension commerciale ne doit cependant pas occulter, comme c'est trop souvent le cas, les aspects stratégiques, politiques, scientifiques d'un programme comme Spot. En l'absence de perspectives à court terme d'équilibre commercial, ces aspects sont suffisants pour justifier que de tels programmes soient entrepris.

2. Les programmes relevant de la seconde catégorie ont un caractère marqué de service public qui prévaut sur des aspects commerciaux tout à fait accessoires. Leur articulation avec les enjeux socio-économiques se place à deux niveaux :

- la prévision du temps s'exerce à des fins de sécurité des biens et des personnes, mais aussi au bénéfice des nombreuses activités économiques soumises à l'aléa météorologique: transport, agriculture, pêche, génie civil, construction, etc.,
- la prévision de l'évolution du climat est indispensable pour fonder les décisions politiques qui permettront de la contrôler et d'en limiter les effets négatifs.

Ce sont deux aspects d'un même problème, celui que pose la compréhension sous tous ses aspects du système que forment l'atmosphère et les océans dans leur interaction avec les parties émergées et avec la biosphère. Mais dans un cas l'objectif est de fournir directement aux acteurs socio-économiques un service quotidien, la prévision météorologique, dans l'autre il est de fournir aux décideurs politiques des éléments de référence.

3. La catégorie 3 revêt une nature différente des précédentes La disponibilité de satellites d'observation a conduit à l'idée de les utiliser comme relais de télécommunication pour concentrer ou pour diffuser les informations concernant leur domaine d'activité. C'est ainsi que les satellites géostationnaires Meteosat sont utilisés de deux façons comme satellites de télécommunication spécialisés : le système DCP (Data collecting platform) collecte et concentre les informations émises par des balises généralement connectées à des stations météorologiques automatiques, le système MDD permet de redistribuer les informations météorologiques élaborées dans toute la zone couverte par le satellite. De la même façon le système Argos embarqué sur le satellite Tiros permet de collecter des données et de localiser des plates-formes sur toute la surface du globe.

L'importance de cette catégorie pour l'étude de l'environnement vient de la nécessité absolue dans certains domaines d'associer aux mesures par satellites des mesures in situ. Les programmes d'étude des océans et de leur interaction avec l'atmosphère tels TOGA et WOCE ne peuvent être conçus sans la collecte et la localisation non seulement de bouées de surface mais aussi de données de flotteurs subsurfaces, de courantomètres, de marégraphes ; c'est vrai aussi pour la surveillance des zones polaires, des bassins hydrologiques, des volcans, des zones à risque.

4. La catégorie 4 ,connaissance de la Terre solide, étudie un système nettement différent du système climatique objet de la catégorie 2, et les objectifs qu'elle s'assigne sont essentiellement d'ordre scientifique. On espère qu'à terme plus ou moins lointain les travaux dans ce domaine apporteront des retours socio-économiques - prévi-

sion des tremblements de terre ou des éruptions volcaniques par exemple - mais le progrès des connaissances fondamentales sur la terre solide est l'objectif principal des programmes envisageables à échéance prévisible.

Comme toute catégorisation, celle que nous avons adoptée n'a pas un caractère rigoureux; elle définit des pôles autour desquels se regroupent les programmes, mais les frontières entre catégories ne sauraient être tracées avec précision. C'est ainsi que certaines techniques d'observation, comme l'imagerie optique ou radar, peuvent être mises indifféremment au service de la catégorie 1 ou de la catégorie 2. Cependant, l'ensemble des projets passés ou présents peut le plus souvent être classé sans ambiguïté dans les catégories que nous avons définies.

2.3 Commentaires généraux sur les programmes d'observation de la Terre.

Les programmes d'observation de la Terre appellent un certain nombre de commentaires généraux qui s'appliquent indistinctement à toutes les catégories que nous venons d'évoquer, et qui concernent:

- a- leurs fondements techniques et industriels,
- b- leur relation avec les programmes "homme dans l'espace",
- c- l'imbrication entre recherche scientifique et application dans leur domaine,
- d- leurs besoins spécifiques en moyens de lancement.

a. fondements techniques et industriels.

Il convient de distinguer d'une part les satellites météorologiques géostationnaires et d'autre part les satellites en orbite circulaire basse, généralement en orbite polaire héliosynchrone, encore que des orbites d'inclinaison plus faible soient nécessaires pour certains satellites expérimentaux.

Les satellites utilisés en orbite polaire sont très généralement dotés d'une stabilisation "trois axes", et constitués d'une plate-forme et d'une charge utile nettement distinctes. La plate-forme est caractérisée pour l'essentiel par la masse qu'elle peut emporter, par l'énergie qu'elle peut fournir à la charge utile, et par la précision de la stabilisation qu'elle assure. C'est la composition de la charge utile, et non la plate-forme, qui est spécifique de la mission du satellite.

On peut dire, en première approximation, qu'une capacité industrielle de construire des satellites d'observation se fonde sur deux expertises distinctes: construire des plates-formes, et construire les instruments d'observation qui constituent la charge utile. Les progrès de l'observation de la Terre sont gouvernés par le progrès des techniques instrumentales. Quant à la plate-forme, elle a un rôle ancillaire. On lui demande d'avoir une fiabilité aussi élevée que possible une précision de stabilisation et une capacité d'emport massique suffisantes, bref de satisfaire aux besoins des instruments emportés et de la mission.

Il en résulte que la démarche logique de conception d'un programme part des instruments d'observation. C'est donc la démarche de développement des instruments d'observation qui doit constituer l'élément essentiel d'une stratégie technique, dès lors que les bases industrielles en matière de plate-forme sont assurées.

Lorsque la charge utile est définie, il convient de voir si elle peut s'accommoder d'une plate-forme existante, ou si elle exige soit une extrapolation soit un développement entièrement nouveau. Lorsque, comme c'est le cas en Europe et singulièrement en France, on a maîtrisé à l'occasion de programmes antérieurs la technique des plates-formes, il n'y a aucun intérêt à lancer de nouveaux développements dans ce domaine si les besoins instrumentaux ne l'exigent pas, et surtout ces développements nouveaux doivent être taillés à la mesure des exigences instrumentales. Nous verrons que la simplicité biblique de cette logique a été quelque peu perturbée, dans la conception du programme d'observation européen, par une interférence fâcheuse avec le programme d'infrastructure orbitale et plus précisément avec la plate-forme polaire du programme Columbus.

b. Homme dans l'espace, (Programme Columbus).

Il n'existe aucune relation significative entre les programmes "Homme dans l'espace" et les besoins de l'observation de la Terre.

Cela tient à plusieurs facteurs.

En premier lieu, la continuité est une contrainte capitale qui s'impose aux programmes d'observation. Nous reviendrons plus loin sur l'analyse de cette notion. En l'état actuel de l'astronautique humaine et à horizon prévisible, la continuité ne saurait être conciliée avec la présence humaine, et ce d'autant plus que les orbites que

privilégie l'observation de la Terre sont peu accessibles aux vols habités. Il s'agit de l'orbite géostationnaire, pour laquelle n'existe actuellement aucun projet d'intervention humaine, et des orbites polaires. Ces orbites passent dans des zones qui sont exposées aux radiations émises par les aurores polaires et par les éruptions solaires; ce sont donc des orbites dangereuses pour les astronautes et sur lesquelles on n'envisage pas de placer de façon permanente des véhicules habités. La seule forme d'intervention humaine envisageable est une intervention de courte durée destinée à remettre en état ou à modifier un véhicule automatique en orbite. C'est le concept de plate-forme "desservie" qui a beaucoup occupé les agences spatiales (NASA et ESA) dans un passé récent. Il n'est pas viable, pour un certain nombre de raisons dont chacune est suffisante:

- en premier lieu ni les Etats-Unis ni l'Europe ne prévoient de disposer d'un système de lancement de véhicules habités en orbite polaire;

- envisagerait-on, ce qui est concevable, d'adapter la navette spatiale ou Hermès à ce type de mission, l'altitude, voisine de mille kilomètres, qu'utilisent les satellites d'observation de la Terre demeurerait inaccessible. Il faudrait donc doter ces satellites d'un système de propulsion supplémentaire leur permettant de réduire, puis d'accroître, leur altitude d'environ 700 km à chaque intervention;

- enfin la conception d'un véhicule desservi et l'intervention des astronautes sur ce véhicule sont des techniques extrêmement complexes et nullement maîtrisées. La complexité des opérations d'intégration d'un véhicule spatial automatique en milieu industriel donne une idée de leur difficulté.

Au total, le concept de plate-forme polaire desservie en orbite polaire utilisée à des fins opérationnelles est aujourd'hui une dangereuse utopie.

L'expérience a montré qu'en matière de technique spatiale, c'est toujours une démarche extrêmement hasardeuse de vouloir utiliser à des fins opérationnelles des techniques non démontrées.

Ajoutons que, la faisabilité technique de l'intervention humaine s'avérerait-elle, dans un futur plus ou moins lointain, il resterait à examiner si elle est économiquement rentable.

On ne peut certes exclure que la mise au point des techniques du vol habité en orbite de faible inclinaison permette, à horizon de plusieurs

décennies, une transposition aux orbites polaires ; mais il s'agit là d'une perspective lointaine, incertaine, et qui ne saurait avoir dans l'immédiat aucune incidence sur la conception des programmes d'observation.

c. la symbiose recherche scientifique / application dans le champ de l'observation de la Terre.

Le développement des applications à finalité socio-économique de l'observation exige un effort systématique de recherche scientifique étendu à tout le domaine. Il existe à cet égard une profonde imbrication, une véritable symbiose, entre ces deux dimensions, de sorte que, dans la conception d'ensemble du programme d'observation il est vain et artificiel de vouloir les séparer. C'est pourtant ce que tendent à produire certaines particularités des structures impliquées dans la conception et dans la mise en oeuvre des programmes.

Le besoin d'un effort systématique de recherche procède de deux causes:

- la nécessité de faire progresser les techniques d'observation et les méthodes d'interprétation qui sont, en l'état de l'art, très insuffisantes pour donner accès à tous les paramètres physiques significatifs,
- la nécessité de faire progresser la connaissance scientifique de l'environnement terrestre.

Ce besoin concerne plus particulièrement la catégorie 2 (maîtrise du système climatique), mais il marque aussi très fortement la catégorie 1, et, naturellement, il constitue l'essentiel de la catégorie 4.

La double nécessité de faire progresser les techniques d'observation et simultanément de mettre en oeuvre les techniques maîtrisées tend à structurer les programmes selon deux catégories de projets, ceux dont l'objectif principal est de permettre ce progrès, et d'acquérir à cette occasion des connaissances nouvelles, et ceux dont l'objectif est d'assurer une surveillance permanente fondée sur l'usage de technologies maîtrisées. Il est d'usage, pour désigner ces deux types de satellites, d'utiliser les qualificatifs d'"expérimental" et d'"opérationnel".

Les satellites opérationnels sont naturellement assignés à la fourniture d'un service, mais il est essentiel de bien mesurer l'importance de la symbiose qui existe entre les

deux catégories. La conception des satellites opérationnels se nourrit du progrès des techniques d'observation que les satellites expérimentaux ont permis d'accomplir, mais, à l'inverse, le flux de données qu'il fournissent constitue une base de connaissances indispensable à la recherche scientifique. Il existe donc entre ces deux types de projets une véritable synergie qu'il convient de cultiver; c'est ce qu'ont fait dans le passé les Etats-Unis, en menant en parallèle la série opérationnelle des Tiros et la série expérimentale des Nimbus.

Par ailleurs, il convient de ne pas confondre, dans le cadre de la catégorie 2, le concept de satellite opérationnel avec celui de satellite météorologique. S'il est vrai que ce sont les besoins de la prévision du temps qui ont donné naissance aux premiers satellites opérationnels d'observation, il n'y a aucune raison de borner leur usage à la satisfaction des besoins de la météorologie. Le concept de satellite opérationnel dérive de la notion de besoin permanent, et doit être ajusté au champ des besoins permanents qu'il est possible de satisfaire avec des techniques suffisamment maîtrisées pour qu'on les mette en usage continu.

Contexte scientifique général

L'observation spatiale a permis, au cours des trois dernières décennies, un progrès rapide des connaissances sur les processus qui régissent l'équilibre global de la planète.

Dans le domaine atmosphérique, les satellites météorologiques, lancés à des fins opérationnelles, ont donné une vision claire et quantifiée de la dynamique de l'atmosphère de l'échelle synoptique à l'échelle globale. Plusieurs missions spécifiques ont permis une première approche de la composition chimique de l'atmosphère et de sa variabilité. Les programmes d'observation à haute résolution de la surface terrestre (Spot, Landsat) ont montré la possibilité d'étudier, depuis l'espace, les variations spatiales et temporelles de la couverture végétale, à des échelles de temps et d'espace compatibles avec les cycles saisonniers. Enfin la géodésie spatiale, par l'interférométrie à très longue base et la visée laser sur satellite qui ont permis la détermination de plus en plus précise des déformations de la croûte terrestre, a largement contribué aux progrès de la tectonique et de la sismologie.

L'apport de l'observation spatiale à l'étude de la Terre est déjà considérable et pourtant des lacunes importantes subsistent dans notre connaissance du système Terre, qui

vont nécessiter, au cours des prochaines années, un effort accru d'observation. La nécessité de surveiller et de prédire l'évolution de l'environnement terrestre conduit aujourd'hui à se demander quelles vont être les signatures de cette évolution à long terme et comment les distinguer du "bruit" lié à une variabilité naturelle qui couvre toutes les échelles de temps et d'espace, de la milliseconde au million d'années, du millimètre à l'échelle de la terre entière. L'objectif principal, au cours des prochaines années, des missions à finalité scientifique (ERS-1, Topex-Poséidon) sera de comprendre la circulation océanique à grande et moyenne échelle, et son couplage avec l'atmosphère. A partir de la connaissance simultanée des mouvements atmosphériques et océaniques ainsi obtenue, la voie sera alors ouverte pour aborder la quantification précise à l'échelle globale des bilans. Le bilan d'énergie, directement lié au cycle de l'eau, est la clé de la compréhension du fonctionnement du système climatique dans son aspect physique et radiatif. Le bilan de matière, et notamment les échanges de constituants minoritaires entre l'atmosphère et la surface des continents et des océans, conduit à la quantification de la part prise par les émissions anthropiques dans les changements de composition chimique de l'atmosphère et les effets qu'elles induisent à l'échelle globale : effet de serre additionnel, diminution de la couche d'ozone, augmentation des propriétés acides et oxydantes de la basse atmosphère.

Les contraintes liées aux aspects recherche

Une démarche logique sur le plan scientifique, impose tout d'abord de déterminer les problèmes principaux qui limitent actuellement notre compréhension du système. C'est à partir de ces objectifs scientifiques que devront être définis les moyens nécessaires en matière d'observation et ceux qu'il faudrait mettre en place à court ou moyen terme en se fondant sur les technologies disponibles ou en passe de l'être. La compréhension d'un système aussi complexe que celui de l'environnement terrestre nécessite une approche multi-variables impliquant l'observation simultanée à des échelles spatiales et temporelles identiques de l'atmosphère, des océans et de la surface terrestre. Il y correspond une définition précise des missions spatiales traduites par des charges utiles cohérentes en termes de moyens d'observation.

C'est là qu'apparaît la principale difficulté.

Lorsque l'on considère les futurs programmes d'observation de la Terre, tous se placent au delà de l'horizon 1997 et plus vraisemblablement à l'horizon 2000, compte tenu des coûts financiers et des difficultés technologiques. Les missions d'observation

de la Terre, pour la plupart en orbite polaire, ont été conçues au début des années 1980 en termes de plate-formes multi-missions. Elles associent des objectifs qui vont de la météorologie opérationnelle à la compréhension des cycles physico-chimiques de l'atmosphère ou à l'observation géodésique. Or - et plusieurs exemples l'ont démontré dans le passé - la cohabitation sur un même véhicule d'instruments en trop grand nombre, remplissant des missions à finalités différentes, certaines opérationnelles, d'autres de recherche, est génératrice de conflits. Elle entraîne par là-même des compromis en termes de charge utile et d'orbitographie, qui peuvent conduire à une dégradation de la finalité scientifique. Malheureusement, dans la plupart des cas, une logique instrumentale, voire une logique "politique", prévaut sur une logique purement scientifique. et peut conduire à repousser dans le temps certaines recherches ; l'exemple américain le montre, où les instruments destinés à l'étude de la chimie de l'atmosphère ne seront pas mis en orbite avant 2003. Il importe donc de trouver un mécanisme qui permette que les nécessaires discussions avec les agences spatiales soient conduites de façon globale, en termes de priorités scientifiques et non uniquement en termes de compromis politico-technologiques.

Les flux de données.

La gestion du flux de données que fournissent les satellites d'observation, qu'ils soient expérimentaux ou opérationnels, est un autre aspect des programmes qui doit faire l'objet d'une conception globale.

Ces flux sont énormes. L'acheminement des données, leur stockage, leur accessibilité aux différentes catégories d'utilisateurs sont autant de problèmes qui doivent recevoir des solutions adaptées à la diversité des objectifs: progrès des connaissances, fourniture de services, constitution d'un marché.

On commettrait une erreur de premier ordre en considérant que les véhicules spatiaux et leurs charges utiles épuisent les difficultés de conception d'un programme ; la conception du système terrien chargé de gérer les données pose des problèmes non moins difficiles et dont dépend, en définitive, l'efficacité des programmes.

d. Besoins spécifiques en moyen de lancement.

Les satellites géostationnaires d'observation de la Terre s'accommodent aisément des moyens de lancement utilisés pour les satellites de télécommunication. Ils font communément partie, dans le manifeste d'Ariane 4, d'un lancement double.

Les satellites polaires au contraire posent un problème spécifique dont la conception des programmes de transport spatial devra tenir compte. D'une part les orbites polaires ne se prêtent pas aisément à des lancements multiples, d'autre part la charge utile d'un lanceur adapté au marché des télécommunications est très élevée lorsqu'on l'utilise en orbite polaire, de 2,8 tonnes à 6,2 tonnes pour Ariane 4, 10 à 12 tonnes pour Ariane 5, ce qui excède largement les besoins de la plupart des satellites d'observation (Advanced Tiros N a une masse de 1700 kg, ERS 1 de 2200 kg, Spot IV de 2700 kg). Il semble donc indispensable de prévoir un moyen de lancement spécifique pour l'orbite polaire. La fréquence des lancements étant moins grande qu'en orbite géostationnaire et la fiabilité d'un système de transport ne pouvant être maintenue que s'il est fréquemment utilisé, il y aura également lieu d'examiner si ce système doit être propre à l'Europe ou assis sur une base plus large.

Par ailleurs, si, pour d'autres raisons, des moyens de lancement de petits satellites devenaient opérationnels, il y aurait lieu d'en tenir compte dans une programmation. Il faut donc participer à la réflexion entreprise pour la mise en route de moyens de lancement de ce type.

3. Etat des lieux en Europe et dans le monde

3.1 Observation à haute définition et gestion des ressources de la planète.

Le premier, et le plus ancien, programme de satellites d'observation des terres émergées à haute résolution est le programme américain Landsat, qui a maintenant près de 20 ans derrière lui.

Initié par la NASA en 1972 avec le lancement du premier satellite de la série, alors baptisée "Earth Resources Technology Satellites" (ERTS), il a véritablement défriché le secteur d'application de l'observation spatiale à l'étude des ressources des continents. Quoique de performances encore modestes (avec une résolution au sol de l'ordre de 80 mètres) les capteurs de trois premiers satellites, rebaptisés ultérieurement Landsat-1, Landsat-2 (lancé en 1975) et Landsat-3 (lancé en 1978), ont permis de révéler le potentiel considérable d'une observation homogène des différentes parties des terres émergées et des zones côtières, et cela par "images" couvrant 185 x 185 km de côté, donc incomparablement plus vastes que les "imagettes" fournies par la photographie aérienne, lesquelles dépassent rarement 10 x 10 km.

L'intérêt international soulevé dès les années 1970 par les images des premiers satellites Landsat, grâce en particulier à un programme de recherche scientifique très vaste organisé par la NASA pour l'analyse de ces images, conduisaient de nombreux pays ayant une certaine ambition spatiale à s'interroger sur l'état de dépendance dans lesquels ils risquaient de se trouver à terme, s'ils ne faisaient pas l'effort de développement permettant de maîtriser les technologies correspondantes. Tel était le cas en France, au Japon et même en Inde, sans parler de l'Union Soviétique et de la Chine qui conduisaient déjà des programmes de reconnaissance à vocation militaire.

En France, en particulier, les études du système SAMRO (Satellite Militaire de Reconnaissance Optique) conduites sous l'égide de la Délégation Générale pour l'Armement, simultanément avec les études de futurs satellites d'observation optique conduites par le CNES, confirmaient l'intérêt de ce secteur d'application des techniques spatiales et la grande convergence des technologies nécessaires pour les besoins civils et pour les besoins militaires. Cette convergence conduisait le CNES à proposer en 1976 l'engagement du programme Spot à ses partenaires de l'Agence Spatiale Européenne afin de doter l'Europe d'une capacité propre dans ce domaine. Devant le peu d'intérêt soulevé par cette proposition (à l'exception notable de la Suède et, plus tard, de la Belgique), le gouvernement français décidait en septembre 1977 de réaliser ce programme (légèrement simplifié) dans un cadre national.

Exploitant des technologies de détecteur plus modernes que celles des satellites Landsat américains, permettant une meilleure résolution géométrique des images, le système Spot s'affirmait d'emblée

comme un concurrent potentiel sérieux au programme américain. Cette situation était confirmée lors de la décision du gouvernement français d'engager la réalisation du satellite Spot-2 en 1981 : simultanément, en effet, la décision d'exploiter les satellites Spot sur une base commerciale était prise, sur la base de diverses études de marché qui indiquaient qu'il existait de réelles possibilités, à la condition de consacrer suffisamment d'efforts au développement du marché. A cet égard la création d'une entité commerciale chargée de cet effort, la société Spot-image, avec des actionnaires institutionnels et industriels autour du CNES, avait lieu dès la mi-82.

Pendant ce temps les Américains s'engageaient sur une voie comparable, tout d'abord en transférant la responsabilité des satellites Landsat, dont le numéro 4 venait d'être lancé en mars 82, à la NOAA (National Ocean and Atmosphere Administration) avec pour mission de préparer le transfert vers l'industrie. Cette "commercialisation" du programme était accélérée par l'administration Reagan qui aurait souhaité pouvoir effectuer le transfert sans financement budgétaire additionnel au-delà du satellite Landsat n°5, mis en orbite en 1984. Une loi spécifique était adoptée par le Congrès en 1984 et à l'issue d'un appel d'offres la proposition conjointe des sociétés Hughes Aircraft et RCA astronautics réunies à cet effet dans une "joint venture" intitulée Eosat était retenue. Dès septembre 1985, Eosat se voyait chargée de la commercialisation des produits des satellites Landsat, le gouvernement américain conservant à travers la NOAA la propriété et le contrôle des satellites. En outre, la société Eosat recevait une subvention de 250 millions de dollars pour construire le satellite n°6 de la série, le lancement (prévu en 1992) étant assuré gratuitement par la NASA.

Cette approche de la "commercialisation" du programme Landsat était dans ses grandes lignes peu différente de l'approche française, cette dernière reposant toutefois sur une coopération beaucoup plus étroite entre le CNES et la société Spot-image, de manière à gérer la transition de manière plus progressive en fonction du développement effectif du marché et des contraintes techniques du système. Les années 1986 à 1990 ont montré que cette approche était bien la bonne, alors que la coopération entre la NOAA et Eosat était exécrable, se traduisant presque chaque année par une crise publique et des interventions du congrès pour trouver in extremis les quelques millions de dollars nécessaires à l'exploitation des satellites Landsat pour l'année budgétaire en cours! 1986 voyait le lancement du satellite Spot-1 et le démarrage de l'exploitation commerciale au mois de mai. L'excellent fonctionnement technique de Spot-1 permettait de repousser à début 1990 le lancement de Spot-2, initialement prévu pour fin 88.

Sur le plan commercial, les deux systèmes, Landsat et Spot, ont vu leur marché croître régulièrement au cours des cinq dernières années, de manière plus spectaculaire toutefois pour Spot-image qui passait de 55 MF en 1987 (première année pleine) à plus de 200 MF prévu pour 1991, avec en outre une répartition de marché beaucoup plus internationale, la France n'y apparaissant que pour 18%.

Cette croissance permet aujourd'hui à la société Spot-image de financer 50% des coûts d'exploitation du système Spot inscrits au budget du Centre National d'Etudes Spatiales, cette proportion devant atteindre 100% dans les 3 ou 4 prochaines années.

Il est difficile de dire si une situation comparable a été atteinte aux Etats-Unis, la société Eosat ne publiant pas ses résultats, mais il est certain, en revanche, que cette société n'a pas réussi à asseoir sa crédibilité auprès des autorités américaines, à tel point que l'incertitude subsiste aujourd'hui sur le mode de financement du satellite Landsat-7 qui devrait prendre la relève de Landsat-6 vers 1997. D'ailleurs, même si ce financement était trouvé au niveau fédéral, le rôle de la société Eosat est remis en question.

Le contraste entre la situation des deux programmes est aujourd'hui très frappant : Spot n'a que cinq ans d'existence, a établi une réputation internationale tout à fait remarquable, connaît une croissance de revenus très soutenue et dispose d'un atout incomparable de continuité grâce à la disponibilité du satellite Spot n°3 (déjà construit) et à l'engagement dès 1989 de la réalisation du satellite n°4, contenant certaines améliorations de performances par rapport à ses prédécesseurs. Ce dernier devrait être prêt au début de 1995 et son lancement pourrait avoir lieu en 1997 si Spot 2 et 3 fonctionnent de manière satisfaisante. Cette situation permettrait de préparer la phase ultérieure, conventionnellement baptisée "Spot Nouvelle Génération" dans de bonnes conditions techniques, organisationnelles et financières. Le scénario envisagé à cet égard est décrit au chapitre 6.1.

Mais les Américains et les Français ne sont pas tout à fait les seuls dans le monde à conduire des programmes de satellites d'observation des terres émergées à haute résolution : il convient de rappeler que l'Union Soviétique mène de tels programmes, initialement pour des besoins exclusivement militaires, depuis de très nombreuses années. Ce n'est qu'en 1987, toutefois, qu'ils ont commencé à en faire une promotion ouverte en dehors du cercle restreint des pays "satellites". Cette promotion, à travers des organisations telles que "Soyuzcarta", a permis de mieux connaître les performances de leur systèmes d'observation de type photographique (Camera KFA 1000 etc.) mais le nombre relativement restreint d'images disponibles ne leur a pas permis de faire une réelle percée sur le marché. On notera toutefois leur politique de valorisation commerciale de leurs produits, qui se traduit par un alignement sur les prix pratiqués par Eosat et Spot-image. Plus récemment en mars 1991, la mise en orbite de la plateforme ALMAZ leur permet de proposer de l'imagerie Radar de bonne qualité, toujours sur une base commerciale. A cet égard un accord a été signé en août 1991 avec la filiale américaine de Spot-image pour la commercialisation de ces données en Amérique du Nord. Les prochains mois nous diront si ces produits ont un réel intérêt sur le marché.

L'autre pays conduisant un programme important d'observation de la terre à haute résolution est le Japon. Dès 1987 la NASDA (Agence spatiale Japonaise) mettait en orbite un satellite de technologie

semblable à Spot, quoique de performances moindre (MOS-1A), suivi par un deuxième satellite identique (MOS-1B) en 1990. Ces deux satellites, exploités sur une base expérimentale, n'ont pas fait l'objet d'une politique de commercialisation. Il pourrait en être autrement du satellite JERS (Japan Earth Resources Satellite) dont le lancement est prévu au printemps 92. Il comportera un radar imageur à ouverture synthétique fonctionnant en bande L et un instrument optique possédant une résolution au sol de 18 mètres, du même ordre que celle de Spot, mais disposant de nombreuses bandes spectrales d'observation dans l'infrarouge moyen. Ce dernier point est significatif d'une avance technologique réelle dans les systèmes de détection à l'état solide par rapport aux détecteurs de ce type disponibles en Europe et aux Etats-Unis.

Un satellite d'observation encore plus avancé (ADEOS) est prévu par les Japonais pour la période 1995-1996. Ses performances sur le plan résolution au sol-richesse spectrale pourraient en faire un concurrent redoutable sur le marché si une politique d'exploitation commerciale est mise en œuvre. Car c'est là que se situe la principale incertitude sur le programme japonais : au-delà d'un effort technologique considérable se traduisant par des satellites aux performances toujours plus avancées, une politique de valorisation commerciale de cet effort n'a pas encore été formellement décidée. De nombreuses informations en provenance du Japon, toutefois, confirment qu'elle est très sérieusement envisagée, mais avec une approche graduelle et prudente. Il est donc probable que la vraie concurrence à attendre pour la fin de la décennie et le début du 21^e siècle viendra du Japon.

L'état des lieux au début des années 90 ne serait pas complet si l'on ne mentionnait ici le satellite ERS-1 de l'ESA mis en orbite en juillet 1991, dont la mission principale concerne surtout les océans et les glaces polaires. Son radar imageur à synthèse d'ouverture fonctionnant en bande C présente toutefois un intérêt réel pour l'observation des terres émergées dans les zones où le couvert nuageux obère trop l'observation optique. Tel est le cas dans les pays de la ceinture équatoriale. C'est la raison pour laquelle l'Agence Spatiale Européenne a prévu de faciliter la commercialisation des produits ERS-1 à travers un consortium de sociétés spécialisées dans cette activité : le consortium formé en janvier 1991 par les sociétés Eurimage basée à Rome, Radarsat International basée à Ottawa et Spot-image basée à Toulouse. Il est trop tôt pour se prononcer sur le potentiel commercial réel des données ERS-1 mais l'existence d'un certain marché n'est contesté par personne, en particulier dans les secteurs industriels du pétrole et des ressources minérales. Les prochaines années nous apprendront si les autres applications sur les terres émergées (agriculture, forêt, cartographie, etc.) feront appel aux données-images fournies par les radars à synthèse d'ouverture.

Au Canada, où le programme de satellite Radar "Radarsat" a été engagé par le gouvernement canadien en 1989, les autorités sont convaincues de ce potentiel commercial, à tel point qu'une société de commercialisation des produits de Radarsat a déjà été constituée, alors que le satellite ne sera pas lancé avant 1995. D'ici là, elle apprend son métier en distribuant les données des satellites Spot et Landsat

au Canada et en participant au consortium ERS cité plus haut. Pour l'instant aucune décision n'a encore été prise pour un éventuel successeur au premier satellite Radarsat, mais de nombreux contacts bilatéraux ont eu lieu ces derniers mois, y compris avec le CNES en France, afin de rechercher une coopération susceptible de faciliter la poursuite de ce programme.

Cette recherche de mécanismes permettant d'assurer la continuité de service pour un système d'observation de la terre ayant une vocation mi-commerciale mi-service public (ce qui est le cas de Radarsat) illustre parfaitement le problème fondamental que rencontre ce type de programme : en l'absence d'un marché suffisamment développé pour permettre l'autofinancement complet du système (exploitation et renouvellement des satellites) il convient d'obtenir un financement public pour réaliser les investissements principaux, assurer les développements indispensables pour obtenir des performances compétitives et combler s'il y a lieu, le déficit d'exploitation. Ce financement public peut être justifié par la mission de service public confiée au système, comme c'est le cas pour un satellite à vocation météorologique ou de surveillance de l'environnement, ainsi que par la nécessité de rester au niveau le plus avancé sur le plan technologique ou par des considérations de politique étrangères. La combinaison de tous ces facteurs rend difficile et complexe le processus de décision, la tendance naturelle des décideurs étant de ne juger l'intérêt de tels programmes qu'à l'aune de leurs retombées commerciales immédiates, même si une telle approche n'est pas réaliste. Le débat américain actuel sur la poursuite du programme Landsat n'a pas d'autre origine et le programme Spot n'a pas échappé à cet écueil, comme l'ont montré les difficiles décisions d'engagement de Spot-3 en 1987 et de Spot-4 en 1989.

Pour Radarsat comme pour Landsat et Spot, la continuité du système ne pourra être assurée que si les décideurs canadiens (et des pays coopérants le cas échéant) abordent le problème avec le réalisme et le recul nécessaires.

3.2 Maîtrise du système climatique et de ses interactions avec la biosphère

Les satellites en service ou les projets en cours sont soit des systèmes opérationnels, soit des satellites à caractère expérimental. On considérera ces deux catégories successivement.

1. Les satellites opérationnels

Les satellites opérationnels actuels sont prioritairement à usage météorologique, mais constituent également un élément essentiel de la recherche dans le domaine de l'environnement climatique. La mise en oeuvre de ces satellites fait l'objet d'une coordination internationale au sein de l'Organisation Météorologique Mondiale, organisation subsidiaire de l'ONU. Le système mondial d'observation sa-

tellitaire ainsi constitué comporte un sous-ensemble de satellites géostationnaires et un autre de satellites en orbite basse quasi polaire.

La mission météorologique des satellites géostationnaires est la surveillance des phénomènes à développement rapide et la mesure de leurs déplacements, orages, cyclones, évolution des nappes de brouillard. Ces satellites sont utilisés pour les études des phénomènes météorologiques où intervient un cycle diurne. Ils fournissent également la seule base de données disponible pour l'étude du rôle de la couverture nuageuse à l'échelle mondiale dans les mécanismes du climat. Ils ont enfin une mission accessoire de collecte de données de plates-formes de mesures situées dans des zones d'accès difficile et, dans le cas des satellites Meteosat, de diffusion des informations.(catégorie 3).

Le sous-ensemble de géostationnaires comporte en principe cinq satellites. Les USA entretiennent normalement deux satellites GOES, l'un sur l'Atlantique Ouest, l'autre sur le Pacifique Est. Ils n'en ont plus qu'un seul en service aujourd'hui, qui occupe une position médiane.; en effet leur programme de remplacement par une nouvelle série très perfectionnée a rencontré de graves difficultés et pris trois ans de retard. Les USA étudient d'ailleurs la possibilité d'avoir recours à un satellite Meteosat de secours pour garantir la couverture opérationnelle de leur secteur. La troisième position de géostationnaire est tenue par un satellite du service météorologique japonais sur le Pacifique ouest. Sur la quatrième position, celle de l'océan Indien, il est prévu que l'URSS lance un satellite avant la fin de 1991.; ce programme soviétique ayant déjà souffert de nombreux délais, il ne s'agit pas là d'une date très sûre. L'Inde a installé un radiomètre produisant de l'imagerie météorologique sur un de ses satellites de télécommunication, mais elle n'en communique pas les données à d'autres pays. Enfin, Meteosat, le satellite européen d'Eumetsat, observant l'Europe et l'Afrique, complète la ceinture de satellites géostationnaires.

Meteosat, à l'origine un projet français, a été développé par l'Agence Spatiale Européenne en tant que programme préopérationnel, puis pris en charge par Eumetsat à partir du troisième exemplaire lancé en 1988. Eumetsat et l'ESA travaillent actuellement à la définition de la génération suivante, qui doit être décidée prochainement pour prendre la suite de Meteosat vers la fin du siècle. Cette décision est une échéance importante à ne pas manquer pour l'Europe, qui doit assurer la continuité et le progrès des performances de cette composante essentielle du système mondial d'observation. La répartition des responsabilités entre Eumetsat et l'ESA constitue pour l'instant un problème ouvert auquel une solution doit être trouvée rapidement. L'important est d'avoir un schéma clair de gestion du programme, évitant la dilution des responsabilités.

Les satellites en orbite polaire ont plutôt pour mission de fournir les données quantitatives nécessaires à la compréhension de la dynamique de l'atmosphère et de l'océan superficiel. Leurs instruments essen-

tiels sont des radiomètres travaillant dans l'infra-rouge ou les hyperfréquences pour reconstituer la distribution de température et d'humidité dans l'épaisseur de l'atmosphère. Ils emportent également des radiomètres imageurs qui permettent entre autres choses de déterminer la température superficielle des océans, la couverture de neige des continents, l'étendue des glaces de mer.

Bien que l'Union soviétique entretienne des satellites météorologiques en orbite polaire, les seules données utilisées de manière opérationnelle dans le monde entier proviennent aujourd'hui de deux satellites de la National Oceanic and Atmospheric Administration américaine (NOAA). Ces deux satellites sont familièrement dénommés "satellite du matin" et "satellite de l'après-midi", parce que leurs plans orbitaux ont été choisis de manière à ce qu'ils passent, à nos latitudes, au-dessus de chaque point du globe, l'un en début de matinée, l'autre au tout début de l'après-midi.

Les Etats-Unis cesseront à partir de 1997 d'entretenir le "satellite du matin" faute de ressources suffisantes. Il faut savoir que les USA disposent d'un système militaire de deux satellites en orbite polaire, dupliquant le système civil, et auquel la NOAA a accès mais pas le reste du monde. L'abandon de l'un des satellites civils ne dégrade par conséquent que de manière limitée la capacité américaine d'observation météorologique.

Lors de discussions initiées par le Groupe des sept Pays les plus industrialisés, les Européens se sont offerts à prendre le relais des USA pour le maintien d'un satellite météorologique polaire. L'ESA et Eumetsat s'emploient à mettre sur pieds un tel programme, non sans difficultés. L'ESA conçoit en effet son programme comme ayant pour objet de mettre en orbite, le plus tôt possible, en tant que composante polaire de son programme COLUMBUS, le plus grand nombre possible d'instruments originaux. Eumetsat, organisation à vocation opérationnelle, souhaite que l'ESA réalise la tête de série de satellites destinés à assurer véritablement la continuation du satellite américain, c'est-à-dire emportant des instruments éprouvés, en nombre raisonnable pour limiter le coût récurrent du système. En l'absence d'une autorité politique supérieure à ces deux organisations intergouvernementales, il s'est jusqu'ici avéré difficile de nouer un dialogue fructueux.

2. Les satellites expérimentaux.

Le système météorologique opérationnel décrit plus haut est nettement insuffisant pour satisfaire les besoins d'un système mondial d'observation du système climatique. Pour les paramètres déjà mesurés, il faudrait un meilleur échantillonnage spatio-temporel et une précision de mesure supérieure. Il faudrait également mesurer d'autres quantités concernant l'océan, la physico-chimie atmosphérique et la biosphère.

Il n'est pas possible de dire aujourd'hui quelle est la meilleure combinaison instrumentale à mettre en oeuvre de manière permanente pour assurer la nécessaire surveillance de l'environnement climatique. Aussi les prochaines missions spatiales à caractère expérimental vont-elles avoir un double rôle à jouer. Elles permettront, d'une part, de sélectionner et de mettre au point les instruments opérationnels du futur, et en même temps elles contribueront, plus ou moins imparfaitement, mais de manière irremplaçable, au déroulement des recherches en cours. Cette situation constitue une contrainte importante pour la conception du segment terrien de ces missions expérimentales: les données doivent en être plus largement et plus facilement accessibles qu'il n'est de tradition en ce domaine. Les agences spatiales ont pris conscience du caractère aigu de ce problème et travaillent à y apporter des solutions.

Un assez grand nombre de programmes expérimentaux américains, japonais et européens sont pertinents pour la surveillance de l'environnement climatique.

L'étude de la circulation océanique ressort de missions spécifiques, dont certaines à caractère préopérationnel ou opérationnel, ERS-1 (lancé en Juillet 1991) et ERS-2 en Europe, MOS-1, JERS-1 et ADEOS au Japon, Radarsat au Canada, et d'autres à caractère plus scientifique, comme la mission TOPEX-POSEIDON développée en coopération franco-américaine.

L'observation du bilan radiatif amorcée par l'expérience américaine ERBE des satellites NIMBUS et NOAA sera poursuivie par l'instrument français ScaRaB sur les satellites soviétiques METEOR. Dans le domaine atmosphérique, la mission UARS, en 1991, permettra une première approche des problèmes stratosphériques.

Des instruments destinés aux études physico-chimiques seront placés de façon plus ponctuelle sur des satellites dont les missions ne sont pas centrées sur ces objectifs particuliers: observation des champs d'ozone sur les satellites européen ERS-2, soviétique METEOR ou japonais ADEOS; mission ATLAS sur la navette spatiale américaine, expérience MIRAS sur la station soviétique MIR.

Enfin dans le domaine des Sciences de la Terre, le développement des deux systèmes complémentaires de positionnement DORIS et GPS apportera des informations précieuses sur les mouvements des plaques, des glaciers et la surveillance sismique.

Au delà de ces programmes décidés, conduisant à des mises sur orbite devant intervenir d'ici à 1995, l'image se brouille quelque peu. Le Japon (NASDA), les USA (NASA), et l'Europe (ESA) travaillent à la définition de leurs plates-formes d'observation de la Terre destinées à être lancées vers 1998. Ces projets font l'objet d'une certaine coordination, au sens où chacun des partenaires s'est engagé à accepter sur sa plate-forme des instruments fournis par les autres. Ceci a pour objet de tenter d'éviter la trop

grande duplication et de limiter l'hétérogénéité des charges utiles de ces engins, tous prévus pour emporter une masse considérable d'instruments, entre 2500 et 3500 kg chacune. En parallèle, la NASA prévoit de lancer plusieurs petits satellites, appelés "Earth probes", accomplissant des missions spécifiques qui nécessitent une orbite particulière ou utilisent un instrument incompatible avec l'environnement d'une grosse plate-forme.

Ce concept de grosse plate-forme - "tous les oeufs dans le même panier" - fait l'objet de vives critiques de la part de plusieurs scientifiques et également dans les milieux opérationnels qui auraient éventuellement à assurer la permanence de certaines observations dont l'intérêt serait démontré par les missions expérimentales. C'est en fait un résidu du concept du début des années 80 qui prévoyait que ces observatoires spatiaux seraient visités et entretenus par des astronautes, les instruments pouvant ainsi être réparés ou remplacés en tant que de besoin. Une fois abandonné le concept de la réparation en orbite, on se retrouve dans la situation traditionnelle où, pour remplacer un instrument, il faut lancer une nouvelle plate-forme.

Ce concept de grosse plate-forme n'a donc d'intérêt indiscutable que pour faire voler un certain ensemble d'instruments une seule fois, à titre de démonstration. Dans une telle circonstance, en effet, le regroupement sur une plate-forme unique, avec un seul lancement, diminue le coût. Cela laisse cependant entier le problème d'absence d'une conception pour le long terme permettant le passage vers une observation permanente pour les instruments démontrés par la mission expérimentale.

3.3. Télécommunications spécialisées

La disponibilité de satellites d'observation a conduit à l'idée de les utiliser comme relais formations à collecter ou à diffuser. Ces systèmes utilisent les possibilités des satellites stationnaires comme Meteosat avec un avantage de permanence d'accès mais des problèmes de couverture et peut-être de coût, et les possibilités des plate-formes polaires à défil comme c'est le cas pour le système français Argos embarqué de manière opérationnelle les satellites NOAA.

Le service MDD des satellites Meteosat actuels permet une diffusion en direction des services météorologiques des pays africains de messages alphanumériques et de cartes fac-similé. Il constitue un cas particulier n'existe que sur Meteosat. Il permet de pallier la faiblesse des réseaux de télécommunication en Afrique les autres satellites météorologiques opérationnels géostationnaires ou en orbite polaire sont en revanche ces systèmes de collecte de données, c'est à dire de la possibilité de recevoir des messages d'observations et

coûteuses dotées d'émetteurs de faible puissance. Argos permet en plus de déterminer la position géographique de la plate-forme émettrice.

L'importance de la collecte de données pour l'étude de l'environnement vient de la nécessité absolue dans certains domaines d'associer aux mesures par satellites des mesures in situ. Les programmes tels TOGA et WOCE ne peuvent être conçus sans la collecte et la localisation non seulement de bouées de surface mais aussi de flotteurs subsurfaces, de courantomètres et de marégraphes. C'est vrai aussi pour la surveillance des zones polaires, des bassins hydrologiques, des volcans, des zones à risque. Outre leur intérêt propre, les projets spatiaux et en particulier les techniques de collecte, jouent un rôle d'accrétion et d'incitation venant stimuler le développement de nouveaux domaines d'exploitation et d'exploration.

Il existe de nombreux domaines liés à la surveillance de l'environnement ou la collecte des données de plate-forme autonomes -et leur localisation- s'avèrent essentiels. Les domaines sont multiples : océanographie, surveillance des glaciers et des calottes polaires, suivi d'espèces animales, surveillance des bassins et autres applications hydrologiques, surveillance des volcans, collecte de données sismiques, contrôle de la pollution etc. Le système français Argos qui a fonctionné sans interruption depuis plus de 10 ans est embarqué sur les plate-formes polaires de la NOAA. Notons que comme pour Spot la certitude de la permanence du service a permis de créer une communauté d'utilisateurs. Comme pour Spot, la création d'une filiale du CNES -CLS/Argos- a permis de consolider le service puis de l'étoffer et de l'élargir. Il ne s'agit pas seulement de collecte de données supplémentaires. L'accès opérationnel à un service spécialisé incite les utilisateurs à développer une instrumentation in situ à partir de plate-formes autonomes. L'unicité du vecteur de transmission peut également avoir des effets bénéfiques dans la standardisation des équipements, des formats, conditions importantes pour un suivi permanent et/ou l'obtention de séries temporelles homogènes.

L'exemple de l'océanographie est éloquent.

Au suivi - localisation - et à la collecte des données des bouées de surface sont venus s'adjoindre le développement d'XBT-bathythermographie- avec transmission automatique, et la collecte de données de marégraphes. Viendront ensuite le suivi et la collecte d'instruments placés à l'intérieur de l'océan, tels les courantomètres, les flotteurs subsurface, les profilomètres doppler, les capteurs électromagnétiques fond de mer, les flotteurs immergés autonomes.

Il s'agit d'une révolution majeure dans une discipline très traditionnelle. Le système de collecte peut influencer le développement des instruments in situ. On peut penser, à l'avenir, à la conception de capteurs non récupérables venant de temps à autre à la surface -concept pop up- ou équipés de capsules

remontant à la surface pour délivrer périodiquement les mesures (programmes TOGA et WOCE) effectuées en profondeur.

De fait il apparaît que la collecte de données -et la localisation à différentes gammes de précision- est un des points forts de la contribution spatiale à l'étude de l'Environnement.

Les progrès de l'électronique et de la microinformatique devraient permettre d'intensifier les efforts déjà entrepris ; il faut bien sûr anticiper et prévoir l'avenir, maintenir le soutien au système Argos, assurer sa pérennité sur les plate-formes polaires, améliorer la qualité et la gamme des services, au moins tant que des services banalisés et à moindre coût ne sont pas mis en oeuvre par les organismes spécialisés de télécommunications.

Parallèlement il faut se préparer à satisfaire les besoins nouveaux : plus grande flexibilité, collecte à la carte, systèmes multivoies, tout en maintenant le caractère opérationnel et le coût faible de ces services.

4. Analyse de problèmes horizontaux.

4. 1 Une analyse générale de la contrainte de continuité.

La contrainte de continuité s'impose à tout le champ des programmes d'observation de la Terre mais avec une rigueur différente selon qu'il s'agit d'application et de satellites opérationnels ou de recherche et de satellites expérimentaux.

Dans le cas des satellites opérationnels, l'impératif de permanence du service définit la contrainte, qu'il s'agisse d'un service public fourni par l'Etat, comme la prévision du temps, ou d'un service commercial. Dans ce dernier cas, le développement du service est d'ailleurs subordonné à la décision des usagers potentiels d'investir dans les équipements de réception et d'exploitation. Or cette décision est gouvernée par la garantie de continuité que les promoteurs du système peuvent fournir. Dans un cas comme dans l'autre, il faut assurer la permanence de l'observation, et par conséquent la maintenance du segment spatial.

En l'état de la technique, et à échéance prévisible - tant qu'il n'est pas possible de réparer et de ravitailler de façon économiquement viable les véhicules en orbite - la maintenance est assurée par le remplacement des satellites tombés en panne ou arrivés en fin de vie par épuisement des consommables. Il faut donc définir une procédure de remplacement qui sera mise en oeuvre de façon systématique dès qu'on observera un certain niveau de dégradation du service. Cette démarche comporte plusieurs conséquences qui s'imposent à la conception des programmes.

Tout d'abord, elle implique une structure de financement du programme et une structure décisionnelle suffisamment simples et homogènes pour qu'il soit possible de définir et de mettre en oeuvre une procédure de remplacement ; cela exclut en pratique les charges utiles composites impliquant des promoteurs et des services divers, et conduisant, en cas de panne partielle, à des problèmes intractables. A fortiori cela exclut de combiner sans précaution des fonctions expérimentales et opérationnelles. C'est pourtant ce qu'on a cherché à faire sur la plate-forme polaire de l'ESA, sans réaliser qu'il s'agissait là d'un souvenir de l'époque où cette plate-forme devait être desservie.

Dans le cas de Spot, comme on l'a vu dans la section 3, l'impératif de continuité a été soigneusement pris en compte dans la conduite du programme.

Une seconde conséquence est que le coût annuel du segment spatial d'un programme opérationnel est inversement proportionnel à la durée de vie moyenne des satellites. Il convient donc de mesurer à l'aune des ressources dont on dispose la complexité de ces satellites, compte tenu de ce que leur coût unitaire augmente et de ce que leur durée de vie moyenne tend à diminuer quand leur complexité croît. La capacité de financer un tel programme en régime permanent (affordability) est un élément de décision fondamental. Il va de soi que l'usage de technologies nouvelles et mal maîtrisées est un élément de risque qu'il convient de bien mesurer; les récentes mésaventures de la NOAA et de la NASA avec le satellite GOES-NEXT¹ illustrent à merveille ce qu'il faut éviter.

S'agissant des satellites expérimentaux, il existe schématiquement deux situations typiques. Ou bien l'"expérience" que l'on conduit fournit une mesure qu'il n'est pas nécessaire de renouveler, en tout cas de renouveler immédiatement, dans ce cas la continuité n'est pas requise; les mesures du champ gravitationnel ou du champ magnétique général en sont de bons exemples, mais de tels exemples sont plus rares lorsqu'il s'agit du système climatique. Ou bien la mesure expérimentale préfigure une technique susceptible d'améliorer la surveillance opérationnelle; dans ce cas, il y a lieu de porter attention le plus tôt possible à une éventuelle transition vers l'exploitation opérationnelle. A cet égard, la notion de satellite préopérationnel est importante. Un satellite préopérationnel est un satellite qui est conçu techniquement comme un satellite opérationnel, mais pour lequel aucun engagement de continuité n'a été souscrit; c'est ainsi que les trois premiers satellites Meteosat de l'ESA (deux modèles de vol et un prototype) avaient un caractère préopérationnel, et la décision de les lancer a été prise au coup par coup. Mais l'existence même de ce programme a suscité la conclusion de la convention Eumetsat et le lancement du programme opérationnel MOP fondé sur des satellites quasi identiques.

Un autre mécanisme efficace est celui par lequel des techniques d'observation mises au point sur la plate-forme expérimentale Nimbus ont été transférées ensuite à la sé-

¹ Le satellite GOES-NEXT est un satellite météorologique géostationnaire construit sous maîtrise d'œuvre de la NASA pour le compte de la NOAA. Le choix de solutions techniques délicates et mal maîtrisées - comme la stabilisation trois axes - par le maître d'œuvre, l'absence de contrôle de la NOAA sur un programmes qu'elle finance et la médiocrité du contrôle exercé par la NASA sur le contractant industriel, ont conduit à des dépassements de coût massifs et à un allongement des délais tels que la NOAA en est aujourd'hui réduite à emprunter à Eumetsat un satellite Meteosat por éviter une interruption de service.

rie opérationnelle Tiros. C'est à ce niveau des relations entre satellites expérimentaux et satellites opérationnels que se manifeste un aspect de la symbiose recherche-application.

Ajoutons enfin que le complément indispensable de la continuité des observations est la capacité d'assurer leur archivage et leur accessibilité. Faute que ce problème soit effectivement traité pour tous les programmes, rien ne sert, lorsqu'il s'agit d'étudier l'évolution temporelle d'un phénomène, d'avoir fait de longues séries de mesures.

Au total, dans un programme d'observation correctement conçu, il doit exister un équilibre et une synergie entre la composante expérimentale et la composante opérationnelle. Sans la première, la seconde risque de s'enliser dans la routine; sans la seconde, non seulement aucun service ne peut se développer, mais les activités de recherche sont privées de l'outil permanent qui leur est indispensable. :

4.2 Problèmes techniques et industriels.

Les satellites d'observation de la Terre comprennent, comme nous l'avons déjà dit, deux grands ensembles :

- La charge utile, coeur du système, qui comporte les instruments d'observation de la Terre et les équipements nécessaires à la programmation de ces instruments, au stockage et à la transmission des données acquises (enregistreurs, télémesure).
- La plate-forme comprenant tous les sous-systèmes destinés à l'emport et au fonctionnement de la charge utile (structure, contrôle thermique, alimentation électrique, stabilisation, maintien de l'orbite, informatique de gestion).

Ces satellites sont placés sur 2 types d'orbite. Le premier type, l' orbite basse (de 500 à 1 000 km d'altitude), en général quasi-polaire, souvent phasée et héliosynchrone (l'heure solaire de passage à la verticale du satellite est constante), permet des observations répétitives (avec une fréquence qui dépend de l'altitude) sur l'ensemble du globe avec des résolutions fines ou moyennes (de quelques mètres à quelques centaines de mètres). Le second type, l'orbite géostationnaire, est une orbite équatoriale à 36 000 km dont la période est de 24 heures, de telle sorte que le satellite paraît immobile par rapport à la Terre. Cette orbite permet des observations continues d'une large portion du globe terrestre (un cercle centré sur un point de

l'équateur terrestre). Les instruments correspondants à l'orbite géostationnaire ont vocation à observer les phénomènes globaux et plus particulièrement les phénomènes météorologiques à développement rapide, mais en offrant des résolutions inférieures à ceux qui évoluent sur les orbites basses.

Les instruments d'observation

On peut distinguer les instruments dits "passifs", qui observent le rayonnement électromagnétique qui leur parvient, émis ou réfléchi par la Terre au travers de l'atmosphère ou par l'atmosphère elle-même, des instruments "actifs" qui illuminent la scène à observer au moyen d'une impulsion électromagnétique pour analyser le signal rétrodiffusé. Ces deux catégories peuvent se subdiviser en deux autres catégories en fonction de la longueur d'onde d'observation : "optique", visible ou proche du visible (Infra-Rouge ou Ultra-Violet) ou "radio-fréquence".

a) Les instruments passifs/optiques.

On trouve dans cette catégorie les instruments tels que les spectromètres (IASI en infra-rouge ou GOMOS en UV) ou les imageurs classiques tels que les A-VHRR de la NOAA, le Thematic Mapper de la NASA, ou encore l'instrument principal de Spot 1-2-3-4 et d'Helios. Il s'agit véritablement du domaine d'excellence de l'industrie spatiale française dans lequel elle possède un savoir-faire certain. De très nombreux industriels tels que THOMSON-CSF, BERTIN, SODERN, REOSC, ANGENIEUX, AEROSPATIALE, etc., en plus de MATRA, sur une technologie et des concepts modernes (push-broom et barrettes de CCD) ont acquis une expérience mondiale reconnue et unique en Europe.

b) Les instruments passifs/micro-ondes.

Leur domaine va du GHz à plusieurs centaines de GHz. On peut alors observer, même à travers les nuages non précipitants, de jour comme de nuit, à la fois l'émission thermique de la Terre et les raies d'absorption des principaux constituants atmosphériques : vapeur d'eau, oxygène, etc. On mesure une température de brillance fonction de la température physique et de l'émissivité, elle-même dépendante de la géométrie (rugosité de surface, vent sur la mer, ...) et de la constante diélectrique (salinité océanique, humidité du sol, absorption gazeuse, présence d'eau liquide ou de glace,...). Le problème technique majeur de ces instruments est la diffraction instrumentale des antennes collectrices d'énergie. On trouve donc des limitations dues à la taille de l'antenne ou au mouvement que l'on doit lui communiquer pour opérer un

balayage. Cependant, des techniques statiques sont à l'étude. Les instruments ATSR/M de ERS 1 ou AMSU-B placés sur les satellites météorologiques polaires auxquels participent respectivement MATRA en France et BAE en Grande-Bretagne sont des exemples typiques de réalisations européennes dans ce domaine.

c) Les instruments actifs/micro-ondes

Ce sont les radars qui fonctionnent en général à 5,3 GHz -bande C ou à 13,6 GHz -bande X. Ils peuvent travailler de jour comme de nuit et sont peu sensibles à la présence des nuages non précipitants (à l'exception des radars "pluie" qui, pour cette raison doivent travailler à des fréquences plus élevées).

Entrent dans cette catégorie :

-les radio-altimètres tels POSEIDON,

-les diffusiomètres à vent qui peuvent servir à la mesure de la vitesse des vents de surface de la mer,

-les radars à synthèse d'ouverture. Depuis SEASAT, de la NASA, en 1978, de nombreux projets on programmé leur utilisation : ERS1 (ASE, 1991), JERS (Japon, 1993), Radarsat (CANADA, 1994), SIR-C/X-SAR (NASA, 1992), etc. et de nombreuses études en Europe sont en cours : V-SAR (G-B), SAR-C et AMI-2 (ASE), RADAR 2000 (France). Leurs améliorations portent sur l'utilisation de nouvelles antennes actives et l'utilisation de la technologie AsGa dans des MMIC (Monolithic Micro-wave Integrated Circuits). La France, avec ALCATEL Espace, THOMSON-CSF ou DASSAULT ELECTRONIQUE, est bien placée parmi ses concurrents européens.

d) Les instruments actifs/optiques.

On les appelle LIDARs. Comme les radars, ils éclairent la cible à l'aide d'une impulsion, mais dans le domaine optique au moyen d'un laser embarqué. Ils sont bien adaptés à la mesure précise de l'altitude des nuages, au sondage des profils en altitude des constituants de l'atmosphère et à la mesure de la vitesse du vent à différentes altitudes (effet Doppler de l'écho des aérosols). Les études, en France, ont porté sur la détection à bord des signaux (détection hétérodyne), qui est l'un des éléments critiques de cet instrument. Un autre élément critique, le laser spatialisable, n'est pas aujourd'hui disponible en Europe avec une durée de vie suffisante. Cependant, si un

programme utilisant un lidar était décidé prochainement (au delà d'expériences ponctuelles comme l'expérience franco-soviétique Alissa), il aurait de grandes chances de se réaliser en coopération internationale. Si, au contraire, le projet doit voir le jour au delà de 2005, l'industrie française ou européenne aurait le temps de s'y préparer.

e) autres instruments.

- Les instruments de communications météorologiques utilisés pour l'acquisition et la radiodiffusion, à des stations au sol, des données fournies par les instruments météorologiques sur les satellites polaires ou géostationnaires sont des équipements de télécommunication classiques parfaitement maîtrisés par l'industrie européenne.

- Les équipements de collecte de messages en provenance de plates-formes sur terre ou en mer et de localisation de ces plates-formes à partir des mesures de l'effet Doppler sur la fréquence des messages reçus sont une spécialité française depuis le programme Eole. Aujourd'hui le système Argos embarqué sur les satellites polaires de météorologie américaine de la NOAA, opérationnel depuis 1978 et le système Doris d'orbitographie et de localisation précises par satellite (10 cm) embarqué sur Spot 2 pris sur Topex Poseïdon et les successeurs de Spot 2 sont des illustrations de la compétence reconnue au niveau international de la France.

L'étude de la Terre solide requiert la disponibilité :

- d'équipements d'orbitographie et de localisation précises comme Doris ;
- de magnétomètres vectoriels permettant la mesure des trois composantes du champ magnétique terrestre, en cours de développement par Thomson Cintra ;
- de gradiomètres, ensembles de micro-accéléromètres disposés autour du centre de masse du satellite pour mesurer finement les gradients du champ de gravité terrestre. L'ONERA est reconnu au niveau international dans ce domaine ;
- de lasers embarqués orientables à très courtes impulsions visant sur des cibles au sol dans deux longueurs d'ondes ; la mesure du temps de parcours du trajet lumineux permet une orbitographie précise et donc une mesure précise du champ de gravité. Des développements sont nécessaires pour maîtriser cette technologie et sont en cours à l'Aérospatiale.

Les plates-formes

Les plates-formes d'observation de la Terre présentent les caractéristiques suivantes, notamment par rapport aux plates-formes de télécommunications:

-Les instruments d'observation exigent une très grande précision de stabilisation (0,03° à 0,15° pour la plate-forme Spot 4 sur les 3 axes ; 0,25° pour Meteosat sur l'axe de rotation).

-Les satellites en orbite basse, n'étant pas en visibilité en permanence de stations de contrôle au sol, doivent être dotés d'une grande autonomie, ce qui implique l'automatisation des fonctions sécuritaires et opérationnelles et induit une plus grande complexité des plates-formes (10 000 composants dans un satellite de télécommunications ; 100 000 composants dans un satellite d'observation de la Terre en orbite basse).

Problèmes de cohabitation.

La complexité des charges utiles d'observation conduit, en général, à une hypertrophie des fonctions de commande, contrôle et surveillance à bord notamment par comparaison avec celles des satellites de télécommunications. La multiplication des missions et des instruments sur une même plate-forme aggrave à l'évidence ce problème et peut conduire à la réalisation de "moutons à 5 pattes". Ainsi, la cohabitation à bord d'une même plate-forme de missions de natures trop différentes pose, de plus, d'autres types de problèmes :

a) Le choix de l'orbite est conditionné par de nombreux paramètres : heure la plus propice à l'acquisition des données, fréquence des mesures, nécessité d'une couverture globale ou non, altitude la plus adaptée au champ de prise de vue et à la résolution spatiale retenue, éclaircissement maximum des panneaux solaires si la charge utile requiert une énergie électrique importante, autant de paramètres qui sont fixés par compromis entre des optimums souvent contradictoires ou par des changements d'orbite en cours de mission, ce qui conduit à un programme d'opérations complexes totalement inacceptable pour des satellites opérationnels.

A cet égard, le programme ERS est un bon exemple des acrobaties auxquelles il faut se livrer pour satisfaire des missions d'observation des océans et des glaces et des missions d'observation à haute définition de la surface des continents.

b) La cohabitation de certains instruments pose des problèmes de compatibilité. C'est le cas pour la compatibilité électromagnétique entre un radar qui émet des impulsions électromagnétiques de forte puissance et des instruments passifs de grande sensibilité. Des issues peuvent être trouvées au cas par cas. Le satellite ERS 1, par exemple, a résolu le problème notamment en inhibant la réception du radiomètre passif hyperfréquence durant l'émission des impulsions. De telles solutions, lorsqu'elles existent, se caractérisent toutes par leur complexité et par le fait qu'elles exigent une adaptation de l'instrument passif à la spécificité du brouilleur. Cette adaptation doit être modifiée en cas d'évolution de la charge utile qui compose les satellites successifs d'une série opérationnelle.

-Enfin, comme cela a déjà été évoqué, la cohabitation de charges utiles mises en oeuvre par des opérateurs différents ou la combinaison de missions expérimentales et opérationnelles rendent très difficiles et souvent insolubles les décisions de partage des ressources à bord et les stratégies de renouvellement des satellites de la série.

Ces différentes considérations amènent naturellement à deux conclusions :

-Compte tenu de leurs caractéristiques très particulières, la conception et la réalisation des satellites d'observation de la Terre constituent un métier spécifique. Ce métier est bien maîtrisé en Europe, singulièrement dans l'industrie française et au CNES, grâce aux programmes Spot, Helios et Meteosat.

-La satisfaction des besoins d'observation de la Terre requiert le développement et la mise en place de satellites de taille moyenne. En effet, les considérations ci-dessus excluent le concept de grosse plate-forme regroupant des missions composites sans démarche logique de conception d'un programme à partir de la mission.

La plate-forme Columbus est l'exemple même d'une démarche programmatique conduite à rebours, à partir d'un a priori technologique profondément erroné.

L'idée de départ était que les techniques de vols habités allaient renouveler les méthodes de l'observation en orbite polaire ; on a élaboré le concept de plate-forme desservie sur laquelle tous les types d'instruments concevables pourraient être embarqués puis maintenus en état de bon fonctionnement par l'intervention d'astronautes. Née dans les cercles de la NASA, l'idée a migré, par un phénomène habituel de fascination pour les conceptions américaines, dans les milieux de l'ESA où elle a engendré la plate-forme polaire Columbus. Lorsque la desserte s'est révélée impossible, on est passé pour

quelque temps à l'idée d'une desserte robotique, non moins hors de portée des techniques disponibles, pour se rabattre en définitive sur un projet qui n'est rien d'autre qu'un gros satellite conventionnel.

De tels errements ne sont pas sans inconvénients ; outre le temps perdu et les efforts investis dans des études préliminaires sans issue, il en subsiste des séquelles plus durables. C'est ainsi que la plate-forme polaire Columbus est demeurée pendant longtemps, et contre toute logique, un élément du programme européen de station spatiale ; elle relevait de la direction correspondante au sein de l'ESA, cependant que sa charge utile relevait, elle, de la direction des programmes d'observation de la Terre. Cette plate-forme constitue d'ailleurs un élément du programme arrêté par le Conseil Ministériel de La Haye, et ainsi elle ne peut être remise en cause qu'au niveau politique le plus élevé. Au-delà de ces bizarreries structurelles et décisionnelles, l'idée qu'une très grosse plate-forme soit un préalable à un programme d'observation de la Terre ambitieux comporte le risque évident de créer un outil surdimensionné dont le coût restreindra l'usage. On ne peut exclure que le développement des instruments d'observation exige dans le futur des plates-formes plus importantes que celles dont on dispose aujourd'hui, mais une approche logique doit partir de ces besoins, alors qu'on a suivi la démarche inverse. Enfin, la conception de la charge utile de la plate-forme polaire Columbus a conservé le caractère composite que permettrait, si elle était disponible, la maintenance orbitale, mais qu'interdit la maintenance par remplacement imposée par l'état de la technique.

Il n'est pas inutile de s'interroger sur les sources d'une approche programmatique aussi aberrante. A première vue, l'origine en est double. Il y a, d'une part le désir de rechercher aux vols habités des justifications, fussent-elles parfaitement artificielles. Une telle approche nuit, cela va sans dire, non seulement aux programmes qu'elle prétend servir mais aussi à la cause des vols habités qu'elle veut défendre. Il y a, plus généralement, la tendance des agences spatiales à privilégier le développement de technologies nouvelles, tendance normale, qui fait partie de leur fonction, mais qui est poussée ici dans l'excès.

A cet égard, il est intéressant d'observer l'évolution du programme EOS de la NASA au cours des ans. Après avoir abandonné le concept de desserte de la plate-forme, la NASA a élaboré un programme de grosse plate-forme automatique regroupant un grand nombre de charges utiles expérimentales et la mission opérationnelle de météorologie polaire de la NOAA. Puis la NOAA, effrayée par la complexité de la mise en oeuvre d'un tel satellite, est revenue à un programme de satellites dédiés à leur mission de météorologie opérationnelle. Enfin, dans le courant du mois d'Août 1991, la NASA, soumise à de nombreuses pressions extérieures, a décidé d'examiner de fractionner chaque satellite EOS en trois satellites de taille moyenne.

En Europe, la plate-forme Spot 4/Helios répond aux besoins de toutes les missions prévues jusqu'à l'horizon 2005. C'est une plate-forme de 2ème génération par rap-

port à celle de Spot 1/2 et de ERS 1/2 ; grâce à des améliorations apportées à partir du retour d'expérience acquis lors du développement initial et du fonctionnement en orbite ses performances ont été améliorées, notamment sa durée de vie, atout essentiel pour réduire les coûts de renouvellement des satellites des systèmes opérationnels.

D'autres améliorations graduelles sont envisagées, telles que l'augmentation de la puissance électrique disponible à bord ou la rigidification des structures afin de répondre, sans modification profonde, aux besoins qui se font jour dans les domaines de la météorologie et de l'environnement.

Le maître d'oeuvre, MATRA, et de très nombreux industriels français aussi bien que les opérateurs des systèmes opérationnels pourront ainsi bénéficier du retour d'investissements étatiques réalisés depuis 15 ans. Si une européanisation (ou une internationalisation) de la fourniture s'avérait nécessaire, la part propre française (aujourd'hui 82% sur Helios) pourrait, sans perte de maîtrise de l'ensemble, être abaissée à une valeur proche de 50%.

Si une plate-forme nouvelle semble utile au-delà de 2005 une analyse des besoins devra absolument précéder sa définition technique.

En ce qui concerne les plates-formes géostationnaires, la France, avec l'AEROSPATIALE, maître d'oeuvre des Meteosat, est bien placée. Si une plate-forme stabilisée 3 axes était nécessaire, nul doute que la France, qui dispose de toutes les technologies pour atteindre les précisions de stabilisation demandées, pourrait exercer un rôle majeur.

Globalement, on peut dire que l'industrie européenne, possède une capacité démontrée en matière d'observation de la Terre. En particulier, l'industrie française, leader en matière de plates-formes, est capable de proposer le produit Spot 4/Helios parfaitement adapté à tous les besoins au moins jusqu'à l'horizon 2005. Il est important qu'elle conserve la place prédominante qu'elle occupe déjà dans le domaine des imageurs optiques et qu'elle participe de façon significative au développement des instruments du futur pour lesquels les technologies-clés ont été acquises, ou sont en voie de l'être, grâce aux programmes de recherche et de technologie, notamment celui du CNES :

- Radars imageurs à haute résolution,
- Radars de mesure des précipitations,
- Lidars,
- Radiomètres micro-ondes.

4 3. Problèmes institutionnels.

L'élaboration des programmes européens et celle des activités françaises mettent en jeu trois catégories d'acteurs européens ou nationaux:

- les agences de développement, l'ESA, le CNES, et les autres agences nationales qui ont été créées dans certains pays (Allemagne, Italie, Royaume Uni, Suède), souvent de façon récente. Parmi ces agences, seuls le CNES et l'ESA possèdent la capacité démontrée d'assurer la maîtrise d'œuvre d'un projet de satellite d'observation, c'est-à-dire d'héberger, en lui fournissant les soutiens techniques nécessaires, l'équipe projet qui est, du côté de la puissance publique, l'interlocuteur du maître d'œuvre industriel. A cet égard, le Centre spatial de Toulouse est à l'évidence le principal centre d'expertise en Europe, en raison de son rôle passé et présent dans les projets Meteosat, Spot, Argos et Helios;
- les agences utilisatrices comme Eumetsat, constitué par une convention intergouvernementale pour gérer la météorologie spatiale, ou Spot-image, société d'exploitation du programme Spot;
- l'industrie spatiale enfin, sur laquelle tout repose parce qu'elle est la dépositaire du savoir-faire technique.

Dans le processus de gestation des programmes, ces trois types d'entité entretiennent avec le pouvoir politique une interaction complexe dont dépend en définitive que les programmes soient rationnels ou aberrants.

Il faut, pour compléter l'inventaire des acteurs, en mentionner un qui a été jusqu'ici peu actif, mais qui ne saurait le rester indéfiniment: la Commission de communautés européennes.

Chacune de ces catégories d'acteurs se comporte en fonction de la vision qu'il a de son propre avenir et en fonction de ses spécificités.

Le rôle essentiel en matière de gestation des programmes est naturellement joué par les agences de développement, ne serait-ce que parce qu'elles ont été conçues pour cela et que, leur avenir dépendant continuellement de l'approbation de programmes nouveaux, elles ont acquis une grande maîtrise des mécanismes d'approbation.

La tendance générale des agences spatiales est naturellement de privilégier le développement des techniques nouvelles, fût-ce au point de négliger l'exploitation des techniques acquises. Il peut en résulter un déséquilibre des programmes qui néglige le présent au bénéfice de l'avenir. Aux effets de cette tendance s'ajoutent, dans le domaine dont nous traitons, quelques problèmes spécifiques.

En premier lieu, le programme d'observation de la Terre occupe une position fautive dans la structure des programmes de l'ESA. Son caractère intrinsèquement mixte de programme de recherche et de programme d'application l'a fait rejeter du cadre du programme scientifique obligatoire, solidement contrôlé - pour ne pas dire monopolisé - par la communauté astronomique. Il n'a pas pour autant trouvé sa place dans le cadre des programmes optionnels. Il en est résulté une faiblesse extrême de sa part du programme européen : 200 MUC en 1990 et 1991 sur des budgets totaux de 2255 MUC et 2600 MUC, 250 MUC demandés en 1992 sur un budget total de 2400 MUC. S'agissant de l'environnement climatique, si l'on excepte le projet Meteosat qui est en fait un programme national entièrement conçu par le CNES et dont la France a obtenu l'eupéanisation en 1971, il a fallu attendre trente ans après la création de l'ESRO et seize ans après celle de l'ESA pour qu'on lance le premier satellite expérimental ERS 1. Quant au programme d'observation à haute définition, après l'eupéanisation manquée de Spot en 1977, il reste absent du cadre européen. Tout cela traduit une faiblesse intrinsèque dont les causes sont structurelles. Nous avons vu quels errements ont conduit à disjoindre la responsabilité de la plate-forme et celle de la charge utile. Plus généralement, et à l'opposé de ce qui existe pour les sciences de l'univers avec le programme obligatoire, les structures dont dispose l'observation de la Terre au sein de l'ESA ont été construites de brique et de mortier. C'est ainsi qu'on a créé en 1974 le petit programme obligatoire Earthnet, mais son champ est strictement limité à l'acquisition et à l'archivage de données. La direction de l'Observation de la Terre, créée en 1975 seulement, ne dispose pas d'un cadre de programme qui lui permettrait de s'exprimer.

Par une aberration persistante, elle n'exerce pas non plus la responsabilité de maîtrise d'œuvre sur la plate-forme qui demeure - héritage de l'époque où elle était "desservie" - du ressort de la direction de la station spatiale ; une telle coupure entre charge utile et plate-forme dans la maîtrise d'œuvre d'un système intégré est une pratique extrêmement dangereuse tant dans la phase de conception que dans la phase de réalisation.

Par ailleurs, les relations de l'ESA avec l'agence utilisatrice Eumetsat et avec les agences nationales, au premier rang desquelles le CNES, demeurent très mal définies. Eumetsat a été constituée, rappelons-le, pour gérer les prolongements opérationnels de Météosat. Elle a évidemment vocation à étendre ce rôle aux satellites opérationnels futurs relevant de la catégorie 2. Mais plusieurs aspects essentiels des relations entre Eumetsat, l'ESA et les agences nationales demeurent dans un vague complet. Eumetsat ne possède pas la capacité de maîtrise d'œuvre et il ne semble pas souhaitable qu'elle l'acquière ; il n'y a pas en effet carence mais plutôt pléthore de cette capacité en Europe. Il est vrai qu'Eutelsat s'est dotée d'une telle capacité, mais le contexte est différent; d'une part Eutelsat autofinance ses projets alors qu'Eumetsat, comme d'ailleurs les agences de développement, est financée par l'argent public; d'autre part le degré de maturité des utilisations opérationnelles est plus grand dans le domaine des télécommunications que dans celui de l'observation. Il semble donc souhaitable qu'une agence de développement assure cette tâche. Cependant la question de savoir si ce rôle incombe systématiquement à l'ESA ou si Eumetsat peut faire appel au mieux disant n'a jamais été tranchée, ni même sérieusement abordée. Dans la première hypothèse, les responsabilités et les tâches respectives d'ESA et d'Eumetsat - pour lesquelles on pourrait s'inspirer sans nécessairement le copier du modèle NOAA / NASA - n'ont jamais été clairement définies, et, comme on pouvait s'y attendre, cela a conduit, année après année, à une détérioration du dialogue Eumetsat-ESA.

Il s'agit en définitive, concernant les programmes futurs, de définir des projets, d'obtenir des financements, d'assurer la maîtrise d'œuvre.

La définition des projets implique à tout le moins que les utilisateurs institutionnels aient leur mot à dire lorsqu'il s'agit de satellites opérationnels ou préopérationnels, faute de quoi on risque une surenchère technologique engendrant des problèmes du genre de ceux que la NOAA connaît avec GOES Next.

Le partage des financements est un sujet qui n'a jamais été abordé au fond; tout au plus a-t-on pris, lors du comité ministériel de La Haye, une disposition assignant, dans le plan à long terme de l'ESA, 243 MUC au projet Meteosat seconde génération (MSG).

Quant à l'exercice de la maîtrise d'œuvre, il relève du problème général, jamais réglé depuis la création de l'ESA, des rôles respectifs des capacités nationales et de l'agence européenne dans la mise en oeuvre des programmes.

Le plus préoccupant est sans doute qu'aucune enceinte politique ne semble en mesure de se saisir de l'ensemble de ces problèmes et de mettre de l'ordre dans cette confusion, pour ne pas dire dans cette pagaille institutionnelle, où chaque institution, comme il est naturel, agit au mieux de ses intérêts propres, cependant que personne n'est en charge de l'intérêt général.

L'ESA a oscillé ainsi entre deux attitudes extrêmes dont l'une consiste à vouloir tout faire et dont l'autre consiste à rejeter totalement certains programmes (sans pour autant réduire à due proportion son niveau de ressources). Cette dernière attitude comporte le risque d'une fracture artificielle dans le champ des programmes environnementaux.

Au total, et en schématisant quelque peu, on peut établir ainsi la liste des problèmes institutionnels en attente de solution concernant le segment spatial pour les catégories 2 et accessoirement 3 et 4

- champ de compétence d'Eumetsat et rôle d'Eumetsat dans son champ de compétence (définition des projets? financement? maîtrise d'œuvre?),**
- rôle de maîtrise d'œuvre du CNES dans la mise en oeuvre des projets, en particulier des projets opérationnels (catégorie 2),**
- rôle d'ESA en matière de projets opérationnels et partage des tâches entre ESA et Eumetsat,**
- rôle d'ESA en matière de projets expérimentaux, et définition du cadre approprié au sein de l'ESA (programme optionnel ou nouveau programme obligatoire).**

S'agissant de la catégorie 1, - les satellites d'observation à haute résolution des terres émergées - le problème se pose en Europe d'une manière assez différente, la France (associée à la Belgique et à la Suède) possédant un quasi monopole, tout au moins dans l'observation optique opérationnelle. Ce monopole est d'ailleurs conforté, dans le domaine connexe de l'observation à des fins militaires, à travers le programme Helios mené par la France avec, cette fois la participation de l'Italie (14%) et de l'Espagne (7%).

L'expérience déjà acquise à travers le développement et l'exploitation des satellites Spot, le degré de maturité atteint dans la montée en puissance du marché excluent que l'Agence Spatiale Européenne se voie un jour chargée de la conduite d'un programme de ce type, sauf à la faire envers et contre les intérêts français. En revanche, si une intervention de l'ESA ne présente aucun caractère attractif, cela n'exclut en aucune manière une participation européenne élargie au financement du programme Spot, au-delà des satellites dont le financement est déjà assuré (Spot 3 et 4). Cette participation européenne accrue pourra d'ailleurs se concrétiser par deux voies parallèles : d'une part un élargissement de l'actionnariat de Spot-Image à d'autres industriels européens, comme le montre par exemple l'entrée, en 1990, de la société italienne Telespazio dans son capital ; et d'autre part un élargissement du cercle des pays partenaires de la France pour la part de financement public du programme. A cet égard, les discussions qui ont eu lieu depuis un an (été 90) avec le Centre Britannique pour l'Espace (BNSC) ouvrent d'intéressantes possibilités de coopération pour le développement des satellites Spot de nouvelle génération. De même la participation active de l'Italie dans le programme Hélios crée des opportunités à saisir pour une participation plus directe de ce pays au futur du programme Spot.

Quelle que soit l'évolution future de ces discussions, il reste que la mixité du financement, privé et public, du programme Spot futur est l'hypothèse la plus raisonnable et qu'elle exigera la mise en place de structures de gestion nouvelles auxquelles le CNES devrait d'ores et déjà réfléchir ; la formule choisie aura en effet un impact important sur la prise en compte des intérêts de l'opérateur et donc sur sa capacité à convaincre les investisseurs du secteur privé.

4.4 L'organisation du segment terrien pour l'observation du climat.

Le segment terrien assure la disponibilité des données pour les différentes catégories d'utilisateurs. Il doit satisfaire les besoins opérationnels de la météorologie, de l'océano-

graphie opérationnelle, de la surveillance de l'environnement. Il doit aussi couvrir les besoins à long terme de la recherche sur les mécanismes du climat et de la surveillance de l'évolution climatique. Il doit être conçu dans une perspective d'utilisation intégrée des données spatiales avec les mesures in situ qui les complètent. Il doit également tenir compte de la nécessité d'une coopération d'échelle mondiale, les différentes sources de données étant nécessaires à l'établissement d'une description complète des phénomènes.

4.4.1 Les différentes catégories d'usagers et leurs besoins

Les besoins en temps réel ou peu différé

La météorologie et l'océanographie opérationnelles utilisent les données en temps aussi peu différé que possible. Il s'agit d'une part de disposer d'une description à jour de l'état de l'atmosphère et de l'océan superficiel dans lesquels se déroulent les activités humaines. Cette surveillance a pour objet d'assurer la sécurité des personnes et des biens soumis aux aléas climatiques (transports, pêche, génie civil) ou, dans le cas des couches superficielles de l'océan, de fournir une description de l'état du milieu dont dépendent les capacités d'opération des navires.

Il s'agit, d'autre part, d'utiliser les données spatiales, combinées avec d'autres, comme données d'entrée dans des modèles numériques de prévision d'évolution. Cette démarche est parvenue à maturité dans le domaine de la météorologie, où elle constitue la base de la prévision météorologique: partant d'une description numérique de l'état de l'atmosphère obtenue par la combinaison de toutes les données disponibles, on établit un état prévu à une date future par l'application des équations de la thermodynamique et de la mécanique des fluides. Le même type de démarche est en cours de développement pour l'océanographie opérationnelle, essentiellement à usage militaire.

Dans ces domaines, il existe des organismes chargés de rendre le service aux usagers, et disposant d'infrastructures et de moyens à permanence opérationnelle. Ces organismes recueillent des données in situ en plus des données spatiales déjà disponibles. Ils disposent de moyens de traitement permettant le stockage, la visualisation et l'analyse des mesures, ainsi que la réalisation de prévisions d'évolution. Ils réalisent, en aval de ce processus, des produits à valeur ajoutée destinés à leurs usagers.

Les besoins en temps différé

Les besoins en temps différé sont ceux des études et recherches. Les données d'observation spatiale servent à la fourniture de services basés par exemple sur un traitement statistique de séries temporelles (études d'aménagement, détection d'évolution de conditions climatiques, etc.). Elles sont utilisées aussi dans des programmes de recherche sur les phénomènes atmosphériques et océaniques et sur les mécanismes du climat. On distingue généralement l'utilisation de données très récentes analysées en temps peu différé, de la journée au mois, de l'utilisation à très long terme. Dans le premier cas, l'utilisateur est exigeant sur le faible délai de mise à disposition des données archivées quitte à accepter qu'elles présentent certains défauts. En revanche s'agissant des archives pérennes auxquelles on accède avec un recul qui peut atteindre plusieurs années, l'utilisateur demande que ces données soient vérifiées, validées, d'une qualité métrologique connue.

4.4.2 Les différentes fonctions du segment terrien

Acquisition

On appelle acquisition la réception au sol des données transmises par le satellite et leur stockage sous une forme accessible pour les traitements futurs. On met généralement en oeuvre plusieurs types de stations. Une ou plusieurs stations principales sont utilisées par l'organisme gestionnaire du système pour acquérir l'ensemble des données, tandis que des usagers particuliers, ayant des besoins régionaux ou locaux, peuvent avoir des stations secondaires, généralement moins performantes et moins coûteuses, qui ne donnent accès qu'à une partie de l'information. Les stations principales sont donc les seuls moyens d'accès à des informations à l'échelle mondiale.

Archivage

Après acquisition, les données sont acheminées d'une part vers la distribution en temps réel, d'autre part vers des systèmes d'archivage pour leur conservation à long terme. Les volumes de données fournies par les satellites d'observation sont considérables, et nécessitent le recours à des moyens techniques très performants. Par exemple, le CERSAT, centre français d'archivage des données du satellite ERS-1, bien qu'il n'archive qu'une petite partie des données du satellite, a dû faire développer un système spécifique utilisant des disques optiques numériques de grande capacité.

L'archivage complet des données ERS-1 est réparti sur plusieurs centres de ce type en Europe.

Distribution

Les mécanismes de distribution des données sont différents selon qu'il s'agit de l'usage des données en temps réel ou des données archivées.

Pour le temps réel, les données produites par les agences spatiales sont introduites dans les circuits d'échange à l'échelle mondiale des données météorologiques. Cet échange est coordonné au sein de l'Organisation Météorologique Mondiale. Il permet aux services météorologiques de mettre en commun les données produites, car pour accomplir sa mission chacun a besoin d'une description complète de l'atmosphère. Dans certains pays, des opérateurs privés accèdent à ces jeux de données et les utilisent pour fournir des services météorologiques spécifiques sur une base commerciale. Les bases juridiques et tarifaires de cet accès aux données produites essentiellement pour des motivations de service public sont aujourd'hui très incertaines.

Pour les données archivées, les agences spatiales gestionnaires des satellites prennent directement en charge le service aux usagers. En Europe, le réseau Earthnet de l'Agence Spatiale Européenne donne accès aux données de Meteosat, de ERS-1, et sert également de relais pour des accès aux données des satellites américains Landsat. Il n'existe pas de système coordonné à l'échelle mondiale pour un accès aux données de tous les satellites contribuant à l'observation de l'atmosphère et des océans, et les politiques de distribution et de tarification de ces données sont de plus hétérogènes. C'est une source de difficulté tout particulièrement pour les laboratoires scientifiques qui ont du mal à constituer les jeux de données nécessaires aux recherches qu'ils conduisent.

4.4.3 Les acteurs

Entités opérationnelles, services météorologiques, Eumetsat

Les services météorologiques, utilisateurs principaux en temps réel des données, sont des services publics qui trouvent la majeure partie de leurs ressources en dotations budgétaires. Les systèmes de satellites météorologiques opérationnels sont généralement financés à travers ces dotations budgétaires. C'est le cas par exemple en France, Allemagne et Royaume-Uni pour Meteosat, et aux USA pour les satellites civils géostationnaires et en orbite polaire. En Europe, le système opérationnel Meteosat est

géré par l'organisation intergouvernementale Eumetsat qui rassemble les contributions financières de ses Membres et sous-traite à l'Agence Spatiale Européenne la maîtrise d'oeuvre de réalisation des satellites et la gestion opérationnelle du système.

Organismes et laboratoires de recherche

La communauté de recherche concernée par la météorologie, l'océanographie physique et l'étude des mécanismes du climat est très active, que ce soit en France, en Europe ou dans le monde. En France, elle est le fait d'équipes du CNRS, des Universités, du CNES, de l'IFREMER, de l'ORSTOM, de METEO-FRANCE, de l'INRA, du SHOM.

Ces travaux font l'objet d'une bonne coordination nationale et internationale. On peut citer comme exemples de cadres de coordination, en France le PNEDC (Programme National d'Etude de la Dynamique du Climat), au plan international le PMRC (Programme Mondial de Recherche sur le Climat) commun à l'Organisation Météorologique Mondiale et au Conseil International des Unions Scientifiques ou le PIGB (Programme International Geosphère Biosphère) du Conseil International des Unions Scientifiques.

Citons également des efforts déployés dans le cadre de la recherche pour mettre en oeuvre des moyens d'accès aux données spatiales archivées: le CERSAT par IFREMER pour les données ERS-1, le service SATMOS par METEO-FRANCE associée au CNRS pour les données des satellites météorologiques américains en orbite basse.

Il reste que les moyens financiers et les effectifs dont disposent les laboratoires pour exploiter efficacement les données fournies par les projets spatiaux demeurent très insuffisants. Nous renvoyons à cet égard à l'analyse présentée dans le rapport concernant les sciences de l'univers (section 6.2.4 et surtout section 8).

Agences spatiales de développement

Le CNES en France, l'ESA (Agence Spatiale Européenne) à l'échelle de l'EUROPE ont la responsabilité de développer des systèmes spatiaux, réalisant ainsi les prototypes des séries de satellites opérationnels. A l'occasion de ces développements, les agences spatiales sont amenées à mettre en place des ensembles de systèmes, baptisés "segment terrien" dans le vocabulaire spatial, destinés à assurer la télécommande du

satellite, la réception de ses télémesures et le traitement des données. Il advient qu'à ce titre elles soient amenées à conduire des activités opérationnelles de longue durée. C'est ainsi que l'ESA exécute aujourd'hui pour le compte de Eumetsat, après l'avoir fait pour son propre compte, les tâches liées au segment terrien de Meteosat. Il est généralement admis qu'à long terme une telle activité ne devra pas se maintenir au sein de l'ESA, et que Eumetsat devra mettre en place son propre système.

Sociétés d'exploitation commerciales

Pour les satellites d'observation à vocation commerciale, toutefois, les agences spatiales confient le plus souvent aux entités responsables de la commercialisation des produits la gestion des moyens d'archivage et de distribution. Tel est le cas aux Etats-Unis avec la société Eosat, opérateur commercial des satellites Landsat, en Europe avec Spot-Image pour les satellites Spot et avec la société SSC-Satellitbild, filiale de la Swedish Space Corporation, gestionnaire des moyens de réception, d'archivage et de traitement à Kiruna. Cette approche réduit d'autant les ressources budgétaires nécessaires aux agences spatiales et permet de garantir une adaptation permanente de l'organisation des moyens au sol aux besoins réels du marché au fur et à mesure de son développement.

4.4.4. La nécessité d'une conception globale et rigoureuse

Compte tenu des programmes satellitaires d'observation de la Terre engagés par les USA, l'Europe et le Japon, il est clair que la quantité de données provenant de l'espace va croître de plusieurs ordres de grandeur au cours des dix ans qui viennent. On peut aujourd'hui être relativement inquiet de la capacité des usagers à utiliser et valoriser correctement cette manne. Il n'existe en effet à ce jour aucune harmonisation, ni des standards techniques de présentation des données, ni des politiques de distribution et de tarification de ces données.

Une standardisation des traitements, étalonnages et formats de distribution des données est nécessaire sauf à contraindre les utilisateurs à un parcours d'obstacles long et coûteux pour accéder aux différentes sources et à constituer les jeux de données multi-paramètres, multi-instruments nécessaires à une description complète de l'atmosphère et de l'océan. Il faut tout de même signaler quelques initiatives très récentes dans ce domaine. L'ESA avec la CCE d'une part, l'Agence Spatiale Italienne dans le cadre du G7 d'autre part ont entrepris une réflexion sur ce problème technique difficile.

Une harmonisation des politiques de distribution et de tarification de données est également nécessaire, et peut-être plus difficile encore, dans la mesure où ces données peuvent donner lieu à plusieurs types d'usage. Elles ont principalement une utilité de type service public pour des organismes d'Etat chargés en amont d'une responsabilité de veille météorologique ou climatique ; elles ont aussi des applications en aval à des études ou services de type commercial mettant en jeu des entités soumises à la loi du marché. Les USA et les pays européens ont traditionnellement des politiques très différentes pour ce qui est de la fourniture de données d'environnement à des entités commerciales et cela est source de tensions dans la coordination des programmes opérationnels ou de recherche à l'échelle mondiale. Un effort d'harmonisation est toutefois en cours dans le cadre du Comité des Satellites d'Observation de la Terre (CEOS) qui rassemble toutes les agences spatiales conduisant de tels programmes, mais il est à ce stade prématuré de juger de ses conclusions.

Il apparaît vraiment nécessaire que ces différents aspects de la mise en oeuvre du segment terrien soient traités avec le même degré d'attention et de rigueur que la conception du segment spatial. Faute qu'on le fasse, les nouveaux satellites en seraient réduits au rôle de coûteux exercices de démonstration technologique.

4.5 Développement des applications

Au delà de l'organisation du segment terrien des systèmes de satellite d'observation, le développement de l'utilisation des données qu'ils produisent est une préoccupation constante ; il s'agit en effet de maximiser les retombées pour la société (et pour l'économie nationale) des investissements consentis par la puissance publique.

Cet effort de développement se traduit par une multiplicité d'actions d'accompagnement qui portent :

- sur la recherche de base,
- sur la recherche appliquée à tel ou tel secteur (géologie, agriculture, etc.),
- sur la formation (enseignement secondaire, universitaire, professionnel),
- sur la sensibilisation des décideurs aux possibilités nouvelles offertes par les techniques spatiales,

- sur l'aide à l'innovation dans les petites entreprises de service qui développent des produits à valeur ajoutée dérivés des données satellitaires de base,
- sur des démonstrations d'application à l'occasion de projets-pilote sélectionnés, illustrant les gains de productivité obtenus par le passage des techniques traditionnelles à l'emploi des données satellitaires.

Un tel programme d'accompagnement a été judicieusement mis en place par le CNES dès le lancement de Spot-1 en 1986 et un programme du même type entre dans sa phase initiale pour les données du satellite ERS-1.

Compte tenu du temps relativement long nécessaire à la mise au point d'un produit réellement opérationnel dans les diverses disciplines d'application des données satellitaires, il est important de poursuivre ce type de programme sur plusieurs années. On peut citer ici à titre d'exemple les excellents résultats obtenus dans le domaine de la statistique de production agricole par le programme de la Commission des Communautés Européennes ; après une phase de mise au point de 3 ans, on a décidé de passer au stade préopérationnel en 1992 et de faire appel à l'observation spatiale pour des applications connexes telles que le contrôle des fraudes. Le succès de ce programme repose pour une grande part sur les efforts de recherche et développement méthodologiques consentis, depuis plus de 10 ans, par le Ministère de l'Agriculture français aidé techniquement et financièrement par le CNES et relayés par le Centre Commun de Recherche des Communautés depuis 1987.

On pourrait citer ainsi de nombreux exemples relatifs à des domaines d'application très variés. Comme dans toute politique de valorisation, la continuité de l'action est ici la clé du succès, à condition toutefois qu'elle soit accompagnée d'une très grande rigueur dans la sélection des thèmes et des acteurs recevant une aide de l'état.

5. La recherche scientifique.

La priorité des recherches dans le domaine des géosciences est aujourd'hui de décrire et de comprendre, en vue de les modéliser, les processus essentiels qui gouvernent le système géosphère-biosphère et ses couplages internes. Fondée sur une approche observationnelle, la modélisation permet d'intégrer l'ensemble des mécanismes et fournit ainsi les bases d'une prédiction quantitative de l'évolution des climats et plus généralement de l'environnement de la Terre. Dans ce

cadre, lié aux grands programmes internationaux comme le Programme Mondial de Recherche sur le Climat (PMRC) et le Programme International Géosphère Biosphère (PIGB), l'observation satellitaire a un rôle déterminant à jouer. Elle seule peut fournir, à l'échelle globale, les données nécessaires à la description d'un système où toutes les composantes sont en interaction permanente.

Les échanges avec la biosphère déterminent la composition chimique de l'atmosphère et des océans : l'apparition des êtres vivants sur la Terre serait ainsi à l'origine de l'oxygène moléculaire dans l'atmosphère, et donc de la transition entre une atmosphère originelle réductrice, essentiellement composée d'azote, de gaz carbonique, de vapeur d'eau et de méthane, et l'atmosphère oxydante que nous connaissons aujourd'hui. Les composantes fluides, atmosphère et océan, sont directement couplées à travers les phénomènes de surface: la tension du vent entraîne l'océan superficiel qui réagit à son tour sur l'atmosphère en lui restituant l'énergie qu'il transporte. Le cycle de l'eau fait intervenir à la fois la dynamique atmosphérique et océanique et l'évapo-transpiration des couverts végétaux, régulée par la dynamique propre des écosystèmes de la biosphère continentale. La nébulosité qui en résulte joue un rôle important dans l'effet de serre et module l'énergie solaire reçue par les océans. De même, l'existence de la végétation modifie les conditions de réflectance de la surface terrestre à la lumière solaire et modifie l'équilibre radiatif de la planète. Les cycles physico-chimiques sont eux-aussi, et notamment le cycle du carbone, fortement couplés avec la dynamique atmosphérique et océanique et sont en interaction directe avec l'activité biologique marine et continentale. Ils régulent l'absorption du rayonnement solaire et tellurique, source d'énergie de l'ensemble du système climatique. De même, et bien que leur importance relative dans les processus atmosphériques globaux fassent encore l'objet de controverses, les phénomènes liés à la variabilité des émissions solaires, d'origine électromagnétique ou particulaire, peuvent influencer directement sur les équilibres atmosphériques. Enfin, dans le domaine des Sciences de la Terre interne, le passage de la cinématique à la dynamique, et donc à des échelles de temps pertinentes avec les évolutions envisagées précédemment, exige une connaissance précise des distributions des potentiels gravimétrique et magnétique.

La nécessité d'observer et de modéliser dans son ensemble un système extrêmement complexe, où coexistent un grand nombre de composantes hétérogènes, liées par des interactions multiples de nature mécanique, physique, chimique ou biologique, est encore renforcée par le fait que, depuis un siècle, environ, les développements de l'industrie et de l'agriculture, associés à une explosion démographique sans précédent, ont initié des transformations de l'environnement, directement liées à ces activités humaines. Elles diffèrent de l'évolution naturelle par leur rapidité. Les constantes de temps mises en jeu vont de la décennie au siècle, et certains effets sont dès aujourd'hui sensibles à l'échelle planétaire. Les teneurs de l'atmosphère en gaz à effet de serre, dioxyde de carbone, méthane, oxyde d'azote, composés organo-chlorés augmentent à des rythmes qui varient de 0.3% à 10% par an du fait de la déforesta-

tion, de l'utilisation des combustibles fossiles et des pratiques industrielles et agricoles nouvelles. Diminution de la couche d'ozone, réchauffement global potentiel de la surface terrestre, augmentation des propriétés oxydantes de la basse atmosphère en sont des conséquences possibles.

Une approche à caractère scientifique de l'observation spatiale de la Terre est d'autant plus nécessaire que, si pour certaines des variables, l'observation spatiale permet d'ores et déjà une mesure directe, nombre d'entre elles ne peuvent et ne pourront être mesurées directement. Elles doivent donc faire l'objet d'une approche conceptuelle entièrement nouvelle, qui implique le plus souvent une interaction constante entre observation et modélisation. C'est le cas par exemple de la détermination des flux aux interfaces, qu'il s'agisse de grandeurs physiques comme l'énergie, chaleur sensible ou chaleur latente à la surface des océans ou des terres émergées, ou des flux de matière qui régissent les échanges gazeux aux interfaces océan-atmosphère ou biosphère-atmosphère. Leur quantification précise nécessite des mesures à des échelles d'espace qui vont de quelques millimètres à quelques centimètres, caractéristiques des processus d'émission par les stomates d'une feuille ou par les bulles d'air à la surface des océans. Ces échelles sont bien évidemment inaccessibles à l'observation satellitaire. Il importe donc de déterminer les paramètres pertinents qui, par une intégration successive des échelles compatibles avec des mesures au sol ou embarquées, permettront de passer de l'échelle locale des processus à l'échelle globale des bilans d'énergie et de matière. Ceci permet d'ailleurs de rappeler que, si l'observation satellitaire est une composante indispensable de l'effort observationnel nécessaire, elle ne peut être dissociée des observations au sol ou embarquées sur avion et ballon nécessaires à sa validation. Afin de mieux cerner l'apport de l'observation spatiale à l'étude de l'environnement et du climat, on peut distinguer plusieurs grands thèmes scientifiques : le climat et les processus physiques, les interactions entre le climat et la géochimie marine, le rôle de la biosphère et les équilibres physico-chimiques de l'atmosphère, la réponse des écosystèmes aux forçages climatiques et chimiques, celle de l'environnement proche ou lointain de la Terre aux perturbations solaires, la Terre interne. Cela conduit alors à examiner chacune des composantes du système - atmosphère, océan, cryosphère, terres émergées, terre interne - en prenant en compte ses interactions avec les autres composantes.

Atmosphère et climat

De toutes les composantes de l'environnement, l'atmosphère est sans doute actuellement la mieux observée, et probablement la mieux modélisée. La prévision du temps a constitué dans ce domaine un moteur efficace qui a introduit une synergie entre les systèmes permanents et globaux d'observations, et notamment les satellites météorologiques géostationnaires ou à défilement en orbite polaire, les modèles globaux de prévision et les méthodes d'assimilation de données. Du point de vue de l'observation, les améliorations nécessaires concernent tout d'abord la mesure de la structure thermodynamique de l'atmosphère. Le couplage déjà opérationnel des imageurs haute résolution spatiale dans le domaine des longueurs d'ondes du visible et du proche infra-rouge et des radiomètres infra-rouge, micro-ondes

et hyperfréquences permet de déterminer la structure verticale de la température et de l'humidité. L'amélioration de la résolution verticale de ces sondages telle qu'elle est actuellement envisagée, avec notamment la mise au point d'instruments de très haute résolution spectrale, constituera un progrès majeur pour la connaissance de la structure thermodynamique tridimensionnelle de l'atmosphère. Mais d'autres variables indispensables à la quantification des échanges d'énergie, qui constituent le moteur dans les régions tropicales de la dynamique atmosphérique, restent pour l'instant inaccessibles à l'échelle globale. Ainsi, aucune mesure directe du vent ne permet aujourd'hui de déterminer à grande échelle les transports de vapeur d'eau et donc les convergences d'humidité qui conduisent aux précipitations.; pour celles-ci, les seules estimations dont on dispose à partir de l'espace, sont fondées sur la radiométrie passive d'hyperfréquences et elles donnent une image plus qualitative que quantitative des champs globaux. L'importance de la mesure du vent et des précipitations conduit à proposer des maintenant le développement de sondeurs actifs du type lidar Doppler pour le vent, et radar, pour la pluie. Plusieurs agences européennes (ASE, CNES) et internationales (NASA, NASDA) ont inscrit dans leur priorités le développement de ces instruments, dont on peut penser qu'ils ne seront néanmoins pas opérationnels avant la fin de la décennie en cours ; il n'en reste pas moins qu'ils constituent un élément indispensable à une approche quantitative du cycle de l'eau en tant que moteur principal du climat.

Le rayonnement joue un rôle essentiel dans la machine climatique. Le bilan de l'énergie radiative déposée à la surface conditionne les transferts de chaleur entre la surface et l'atmosphère, et la divergence atmosphérique des flux de rayonnement est un élément majeur du bilan énergétique des différents processus atmosphériques. Les études récentes de sensibilité des modèles de circulation générale de l'atmosphère à l'augmentation de la teneur en gaz à effet de serre ont montré l'importance de la rétroaction due au forçage radiatif des nuages. La quantification de la réponse différentielle de la couverture nuageuse constitue alors une priorité dans l'étude des variations du bilan radiatif aux échelles décennales. Une simple variation de $0.5^{\circ}\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, probablement indétectable, suffit à échauffer de 0.1°K les trente premiers mètres des océans. Les programmes internationaux comme ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Programme) et les instruments du type ERBE (Earth Radiation Budget Experiment) actuellement pré-opérationnels, constituent une première approche du problème ; mais un effort plus important devra être fait pour l'étude fine de la nébulosité : détection des nuages, détermination de leur altitude et de leurs propriétés optiques. La rétro-action des nuages sur la température de surface dépend en effet fortement de leur altitude. Dans le cas des nuages denses de basse altitude, l'effet d'albedo est prépondérant et conduit à un refroidissement de la surface par atténuation du rayonnement incident. Dans le cas des nuages de haute altitude, du type cirrus, l'effet radiatif dans le domaine des longueurs d'onde infra-rouge domine et entraîne un effet de serre additionnel. Par ailleurs, le caractère fractal des nuages impose des résolutions supérieures à la centaine de mètres. La technologie, spectro-imageurs haute résolution spatiale, radiomètres visibles, infra-rouge et micro-onde, systèmes lidar, existe, qui peut permettre une approche cohérente de ces problèmes pour autant que les charges utiles des futures

missions spatiales soient effectivement déterminées en fonction des objectifs scientifiques imposés par l'étude du climat et de ses fluctuations naturelles et anthropiques.

L'océan : dynamique, chimie et biologie

L'océan est une composante essentielle du système climatique. Le contenu thermique de ses cinq premiers mètres correspond à celui de toute l'atmosphère. Il contribue, à part comparable avec l'atmosphère, à la redistribution de l'énergie calorifique par le transport méridien moyen de chaleur entre l'équateur et les pôles. De plus, la circulation atmosphérique est particulièrement sensible aux variations de la température de surface des océans. Aux échelles de temps saisonnières, le phénomène El Nino qui correspond à un réchauffement de plusieurs degrés des eaux de surface de l'océan Pacifique au large des côtes du Pérou est directement corrélé aux variations de la pression atmosphérique entre l'Australie et l'Indonésie, et à l'inversion du régime des vents sur l'océan Pacifique tropical. Il induit des modifications climatiques de grande ampleur, non seulement dans les tropiques, où l'inversion des zones de précipitations intenses et de sécheresse entraîne des problèmes économiques graves, mais également dans les régions de moyenne latitude. En règle générale, la dynamique océanique est gouvernée par des constantes de temps plus longues que celle de l'atmosphère, qui vont du mois pour l'océan superficiel au siècle ou plus pour la circulation profonde ; cela explique peut-être pourquoi, contrairement à l'atmosphère, l'océan reste relativement mal connu. Il n'existe actuellement aucun système opérationnel global d'observation océanique comparable au système d'observation météorologique. C'est l'objet des programmes internationaux TOGA (Tropical Océan and Global Atmosphère) et WOCE (World Océan Circulation Experiment) de conduire à une meilleure connaissance de la circulation océanique, par une approche intégrée entre observations satellitaires, observations à la surface et modélisation.

Les mesures à l'intérieur des océans sont difficiles. L'observation satellitaire ne donne des informations que sur l'état de surface et, dans le cas le plus favorable, sur les premiers mètres en profondeur. Les observations de la surface des océans par satellite grâce aux techniques de diffusiométrie, d'altimétrie et d'imagerie radar avec les radars à synthèse d'ouverture, dont l'intérêt scientifique a été largement démontré, malgré sa courte durée, par la mission SEASAT en 1980, sont un aspect essentiel de l'étude de l'interface océan-atmosphère et de celle de la circulation générale océanique fondée sur la détermination de la topographie dynamique des océans. Les projets spatiaux scientifiques comme Topex-Poseidon développé en coopération bilatérale entre la France et les Etats-Unis, ou pré-opérationnels comme ERS-1, puis ERS-2, dans le cadre de l'Agence Spatiale Européenne constituent une première réponse, dans la mesure où l'altimétrie satellitaire est la seule technique permettant d'estimer de façon synoptique, à l'échelle de la centaine de kilomètres, et continue, les champs de courant de surface des océans.

Les progrès dans l'étude des interactions océan-atmosphère et de la circulation océanique passent aussi par l'amélioration de la précision de la mesure de la température de surface des océans par radiométrie, de l'estimation de la tension du vent de surface obtenue par diffusiométrie, et par la mesure, par les spectromètres infra-rouge et micro-onde, avec une résolution verticale élevée, des profils de température et d'humidité dans l'atmosphère au voisinage de la surface. L'ensemble de ces paramètres peut alors être utilisé pour contraindre des modèles couples de la couche limite atmosphérique et de la couche superficielle des océans, qui seuls peuvent permettre par assimilation des données satellitaires une détermination quantitative des échanges en termes de flux de quantité de mouvement et énergie, chaleur sensible et chaleur latente. Mais le rôle des océans ne se limite pas aux processus physiques, et il est impossible de décrire le cycle des éléments sur terre sans prendre en compte la composante océanique. Celle-ci implique une interaction entre l'activité biologique, les processus chimiques et le transport par les courants. Si l'on excepte la lithosphère, pour laquelle la mobilisation du carbone s'effectue à l'échelle des temps géologiques, l'océan est le principal réservoir de carbone de la planète puisqu'il contient 15 fois plus de carbone que la biomasse terrestre et 50 fois plus que l'atmosphère. Tout le gaz carbonique atmosphérique transite par l'océan en 8 ou 10 ans, et 30% à 50% de ce transit s'effectue via la biomasse marine. Dans un environnement non perturbé, les échanges entre l'atmosphère et l'océan sont équilibrés, la solubilité du gaz carbonique augmente quand la température diminue, l'océan dégaze dans les tropiques et absorbe le gaz carbonique dans les régions de haute latitude. La pompe biologique, par l'action des organismes et le transfert de matière particulaire, agit en permanence pour modifier le rendement de la pompe thermodynamique. Mais une très grande incertitude existe dans l'estimation des différents flux, qu'il s'agisse de ceux qui gouvernent les échanges océan-atmosphère, de ceux par lesquels la biosphère initie les transports particuliers ou des transports de carbone dissous au sein de l'océan, sous l'action de la circulation générale. Traiter le problème des cycles biogéochimiques à l'échelle de l'océan mondial nécessite à nouveau un ensemble cohérent de données et une modélisation extensive. Les données spatiales de vent et de température de surface et les données altimétriques déjà évoquées formeront une première composante de cet ensemble. L'étude de la productivité primaire océanique se fonde sur l'observation de la "couleur de l'eau" qui donne accès au contenu en chlorophylle de la couche superficielle de l'océan. Cela permet d'évaluer la biomasse végétale et d'en suivre l'évolution. L'expérience conduite avec le capteur CZCS (Coastal Zone Color Scanner) à bord du satellite Nimbus 7 de la NASA a été tout à fait probante. Il importe donc qu'un instrument amélioré soit rapidement embarqué pour assurer une observation systématique et globale.

Les calottes polaires : bilan et dynamique.

Les calottes polaires font intégralement partie du système climatique. Par leur étendue, elles contrôlent le bilan radiatif des hautes latitudes. Par leur volume, elles déterminent le niveau des océans à l'échelle de quelques dizaines d'années. Les précipitations s'accumulent au sommet des calottes ; transformées

en glace, elles s'écoulent sous leur propre poids et s'en vont fondre à la périphérie. A priori, un réchauffement climatique se traduit d'une part par une augmentation des précipitations et donc une élévation des dômes, et d'autre part par une accélération de la fusion et de la décharge des icebergs dans les régions côtières, et donc une diminution de volume à la périphérie. Les parties externes des calottes, qui flottent sur les océans, sont ainsi les plus sensibles à ce phénomène de fusion. Les glaces de mer jouent en effet un rôle important dans la dynamique du climat : d'une part, elles inhibent les échanges océan-atmosphère aux hautes latitudes, d'autre part, du fait de leur albedo élevé, elles accentuent le déficit énergétique des régions polaires. La fonte des glaces de mer contribue ainsi fortement aux rétroactions positives qui accentuent le réchauffement des hautes latitudes dans l'hypothèse d'une accentuation de l'effet de serre.

L'établissement d'un bilan de masse des calottes polaires et de son évolution est donc une priorité des études climatiques. Etant données les difficultés d'accès, la connaissance d'un tel bilan reste aujourd'hui largement incertaine, au point que l'on est incapable d'estimer précisément la contribution apportée par les calottes polaires à l'élévation de 10 à 15 cm du niveau des mers observée depuis le début du siècle. L'utilisation des radiomètres micro-ondes et des radars à synthèse d'ouverture permet d'étudier depuis l'espace la cryosphère, et conduit déjà à établir de façon globale le taux d'accumulation, l'altitude et la forme, liée à la dynamique de l'écoulement des glaces, des calottes. Les satellites ERS-1 et ERS-2 permettront une première analyse détaillée de l'état et de l'évolution des calottes au cours de la période 1991-1995. Compte tenu des constantes de temps impliquées, de plusieurs dizaines d'années, et des conséquences potentielles sur le climat, le suivi de cette évolution à long terme reste un impératif de la prévision climatique.

La biosphère continentale.

La biosphère continentale est un élément majeur de l'environnement planétaire. Bien qu'elle n'occupe que 15% de la surface du globe, elle joue un rôle déterminant dans la modulation des flux d'énergie, de quantité de mouvement et de matière à l'interface sol-atmosphère. Ces flux conditionnent la croissance et le développement des végétaux, qui à leur tour influeront sur l'état de l'atmosphère, en modifiant l'albedo et la rugosité de la surface, et en régulant l'évapo-transpiration. L'écosystème terrestre joue également un rôle clé dans les cycles biogéochimiques : la végétation fixe le gaz carbonique atmosphérique et synthétise la matière organique. Enfin, de toutes les composantes du système climat-environnement, la biosphère continentale est probablement la plus directement soumise à l'action de l'homme. Ainsi, la surface des régions arides et semi-arides augmente à un rythme de 60000 km² par an, et la déforestation de la forêt amazonienne se poursuit à un rythme de 3000 km² par an.

Mais, si l'on constate que ces modifications deviennent de plus en plus importantes, il n'est encore possible ni de les quantifier, ni de mesurer les effets qu'elles ont sur le climat et la biosphère elle-même. Ici encore, il est tout à fait clair que les observations satellitaires, par leur couverture spatiale et leur périodicité, constituent un moyen d'observation indispensable, bien que limité à la seule surface terrestre. Pourtant la biosphère continentale a jusqu'à présent été peu étudiée d'un point de vue quantitatif par ces méthodes, et ce pour des raisons à la fois scientifiques et méthodologiques : sur le plan scientifique, les processus que l'on veut mesurer sont complexes et leurs échelles, caractérisées par une hétérogénéité importante, sont difficilement accessibles à l'observation spatiale ; sur le plan méthodologique, il faut mettre en oeuvre un système permettant de résoudre le problème d'intégration des échelles spatiales et temporelles et de relier les observations spatiales aux paramètres pertinents d'observation qui restent d'ailleurs à déterminer. Cela nécessite la mise en orbite de plusieurs satellites, l'organisation de campagnes coordonnées espace-avion-terrain, et la mise en place d'un système de gestion, de diffusion et d'analyse des données à l'échelle planétaire. Ces difficultés, sans doute amplifiées par la prise de conscience tardive du rôle de la biosphère dans la régulation de l'environnement, ont retardé la prise en compte de cette composante dans les programmes spatiaux. Plusieurs programmes, comme ISLSCP (International Land Surface Satellite Climatology Project) et à plus longue échéance IGBP, constituent le cadre approprié de ces recherches. Il est maintenant possible d'envisager sur des bases scientifiques sérieuses un programme spatial prenant en compte les divers aspects de la biosphère continentale. Les moyens spatiaux à mettre en oeuvre doivent permettre de mesurer et de suivre l'évolution des paramètres atmosphériques - rayonnement global, pluie, teneur en CO₂, température et humidité de l'air, albedo, des propriétés des sols - nature, contenu en eau, profils hydrique et thermique, et des caractéristiques de la végétation - structure, indice foliaire, contenu en eau, température. C'est l'analyse multispectrale dans le domaine de longueurs d'onde du visible et de l'infra-rouge et la radiométrie passive infrarouge et hyperfréquence, qui constituent les moyens de mesure à mettre en oeuvre depuis l'espace. Plusieurs missions spatiales sont programmées au cours des prochaines années (1990-1995) qui devraient permettre une première approche du problème : systèmes opérationnels Spot et Landsat, imageur AVHRR sur les satellites météorologiques de la NOAA, plate-forme ERS-1 avec les radars à synthèse d'ouverture (SAR) et le diffusiomètre, radiomètres hyperfréquences du satellite DMSP. A moyen terme, il importera de s'orienter vers une synergie expérimentale permettant d'intégrer ces missions d'observation de la biosphère continentale aux programmes d'observation de l'atmosphère et des océans.

Les équilibres chimiques de l'atmosphère

L'équilibre actuel de l'environnement terrestre est largement conditionné par la présence dans l'atmosphère de gaz sources émis à la surface par des processus physiques ou biogéniques naturels : méthane, oxydes d'azote, chlorofluorocarbures, composés soufrés réduits. Sous l'influence des activités

humaines, industrielles et agricoles, la teneur dans l'atmosphère de ces constituants augmente aujourd'hui à un rythme qui conduit à un doublement de leur concentration en quelques décennies. Cette modification de la composition chimique de l'atmosphère induit des problèmes d'environnement d'échelle globale qui tous mettent en cause les conditions de vie sur la Terre : destruction catalytique de l'ozone dans la stratosphère, notamment dans les régions de haute altitude, réduisant par la même le filtrage du rayonnement solaire ultra-violet - augmentation des propriétés acides et oxydantes dans la troposphère, induisant des effets néfastes sur la végétation, les sols et les eaux.

L'atmosphère terrestre évolue donc en réponse aux variations de concentration de ces constituants. La prédiction de cette évolution nécessite la mise en oeuvre de moyens expérimentaux et de simulation numérique, permettant d'appréhender toutes les échelles d'espace et de temps qui caractérisent l'ensemble des interactions chimiques, dynamiques et radiatives qui déterminent les cycles des composés atmosphériques. Ces cycles trouvent leur origine dans les émissions à la surface de constituants-sources, dont les durées de vie se chiffrent en dizaine voire en centaines d'années. Ces "polluants primaires" conduisent alors à une modification des concentrations des constituants produits par les interactions chimiques dans l'atmosphère ; l'ozone, par le rôle qu'il joue dans le filtrage du rayonnement solaire ultraviolet et l'équilibre thermique de la haute atmosphère, est certainement le plus important de ces constituants secondaires. Le problème posé aujourd'hui, si l'on veut prédire le devenir de l'atmosphère terrestre à l'échelle de quelques décennies, est alors de quantifier les bilans globaux de ces constituants, de mesurer et de comprendre leur variabilité naturelle et de mettre en évidence des tendances évolutives, souvent limitées à quelques fractions de pour cent par an au milieu d'une variabilité naturelle supérieure de un à deux ordres de grandeur. L'observation satellitaire est l'outil privilégié, qui seul peut permettre d'étendre les mesures à l'échelle globale et de distinguer dans les différents termes des bilans les parts respectives des émissions troposphériques, des phénomènes de transport dans la troposphère et la stratosphère, et des processus photochimiques de création des espèces secondaires.

Si les recherches conduites au cours des vingt dernières années ont permis d'obtenir une compréhension assez complète des processus chimiques, radiatifs et dynamiques qui régissent l'équilibre de l'ozone dans la stratosphère, la récente découverte d'une diminution rapide d'ozone au dessus du continent antarctique au cours du printemps austral met en évidence les nombreuses lacunes qui subsistent encore dans notre compréhension de ces équilibres et dans notre capacité à prédire l'évolution de la couche d'ozone sous l'influence des activités humaines. Elle souligne en particulier l'importance des processus de chimie hétérogène dans la basse stratosphère qui jusqu'alors n'étaient pas pris en compte dans les modèles de simulation. Dans la troposphère, le bilan global du cycle de l'ozone et des constituants-sources, méthane, monoxyde de carbone, aérosols, composés soufrés, oxydes d'azote, reste entièrement à quantifier depuis l'espace. Outre leur rôle dans l'effet de serre additionnel, ces constituants contribuent à l'augmentation de la pollution acide et des propriétés oxydantes de la basse atmo-

sphère. La quantification de leur bilan se fonde sur la mesure directe du contenu troposphérique de constituants comme l'ozone, le méthane, le monoxyde de carbone et les aérosols ; elle seule peut permettre d'identifier les régions sources et puits, à des échelles spatiales de quelques kilomètres, et d'étudier leur variation temporelle.

L'expérience UARS dont le lancement par la NASA est prévu en 1991 fournira certains des éléments nécessaires à ce suivi à l'échelle globale pour la période 1991-1994, mais elle ne permettra pas d'aborder les problèmes troposphériques et restera limitée pour l'étude des régions polaires par des considérations d'orbite et une conception instrumentale antérieure à la mise en évidence des phénomènes qui régissent l'évolution rapide de l'ozone dans ces régions. Il reste donc indispensable, d'une part de combler le "trou" entre la fin du vol UARS et la mise en orbite des premières plates-formes polaires, et d'autre part de compléter la mesure des constituants mineurs stratosphériques et surtout troposphériques à l'échelle globale. Les instruments existent pour de telles missions qui se fondent à nouveau sur la spectrométrie et l'interférométrie à haute résolution spectrale, dans les domaines spectraux visibles, infra-rouge et micro-ondes qui contiennent les signatures des principaux constituants atmosphériques. La continuité tout à fait fondamentale de ces observations sera assurée à terme en s'appuyant sur les instruments des filières opérationnelles, et en particulier les nouvelles générations d'instruments prévues dans le cadre des plates-formes polaires.

Les relations Soleil-Terre.

Les résultats obtenus au cours de l'Année Géophysique Internationale (1957-1958), qui a coïncidé avec l'avènement de l'ère spatiale, ont permis de mettre en évidence les relations entre les phénomènes se produisant à l'intérieur ou à la surface du soleil et certaines modifications de l'environnement proche, haute atmosphère et ionosphère, ou lointain, magnétosphère, de notre planète. Les régions ionisées de la haute atmosphère terrestre seront a priori traitées dans la partie "Sciences de l'Univers" de ce rapport. Mais les particules énergétiques émises par le Soleil lors des éruptions peuvent pénétrer jusqu'à des altitudes stratosphériques et modifier les équilibres physico-chimiques de la stratosphère, notamment par la production accrue d'oxydes d'azote. Parallèlement, si les modifications induites par les variations du flux solaire ultra-violet au cours des cycles de 27 jours et de 11 ans restent encore aujourd'hui à quantifier en ce qui concerne la basse atmosphère, elles entraînent des variations importantes de température et de densité dans la haute thermosphère et jouent un rôle important sur le freinage des satellites ; elles nécessitent ainsi une étude approfondie afin de permettre une meilleure prédiction de ces phénomènes. Il est de même indispensable de mieux comprendre l'effet des perturbations solaires sur le comportement des ceintures de radiation de la Terre ou sur celui des phénomènes de hautes latitudes qui peuvent induire des dommages dans le fonctionnement des réseaux de distribution d'énergie ou de radio-communications. Le Programme International d'Etude des Relations Soleil-

Terre, ISTP (International Solar Terrestrial Programme), soutenu par l'ensemble des agences spatiales, fournit un cadre de coordination à l'étude de ces phénomènes.

La Terre interne.

Dernier aspect thématique, la Terre interne et la détermination des champs de potentiel magnétique et gravimétrique. Le premier de ces objectifs concerne l'étude du noyau terrestre, de la conductivité du manteau et des corrélations entre la convection du noyau et celle du manteau. Une mission satellitaire de mesure des trois composantes du champ magnétique de la Terre, d'une durée au moins égale à cinq ans dans la suite de la mission MAGSAT, limitée à six mois en 1979- 1980, constitue donc une priorité pour les Sciences de la Terre.

Le champ de gravité de la Terre reflète les contrastes de densité existant à différentes profondeurs dans la lithosphère et dans le manteau. A grande échelle spatiale, ces ondulations représentent directement la répartition interne de matière résultant des phénomènes dynamiques liés à la convection thermique qui affectent le manteau. Ils représentent environ 90% de l'énergie du géoïde, les 10% restants étant associés à des phénomènes superficiels qui reflètent la structure de la lithosphère. A grande échelle, 1000 km et plus, le géoïde est connu par l'analyse de perturbations orbitales des satellites géodésiques. Du fait de la couverture incomplète des satellites, la précision n'est d'ailleurs satisfaisante que pour les très grandes longueurs d'onde et reste médiocre dans la bande de longueurs d'onde, comprises entre 1000 et 4000 km. Si, sur les océans, les méthodes altimétriques permettent une résolution de l'ordre de 50 km et une précision de quelques centimètres sur la hauteur du géoïde, de telles mesures ne sont pas disponibles sur les continents. Cette cartographie à haute résolution spatiale au-dessus des océans a amplement démontré que la connaissance fine et précise des anomalies du champ de gravité pouvait donner lieu à des études nouvelles sur la circulation convective ou les instabilités en forme de rouleaux ou de panache du manteau. Mais de nombreuses questions relatives à la convection sous les plaques continentales restent aujourd'hui sans réponse: existence d'une couche peu épaisse de manteau partiellement fondu sous la lithosphère continentale, susceptible de générer des instabilités convectives, influence de la lithosphère continentale plus épaisse que la lithosphère océanique sur le régime convectif du manteau, interaction des panaches de point chaud avec la lithosphère continentale. Pour étudier ces problèmes concernant la tectonique continentale, il est nécessaire de connaître le champ de gravité sur les continents avec une résolution et une précision comparable à celle qu'on a obtenue sur les océans. Un tel objectif ne peut être atteint que par une mission spatiale permettant la mesure du champ de gravité avec des précisions de l'ordre de 2 à 5mGals et une résolution de 100km par des méthodes gradiométrique. Un tel projet, ARISTOTELES, est aujourd'hui à l'étude dans le cadre de l'Agence Spatiale Européenne.

Les techniques de positionnement précis contribuent de façon majeure à la connaissance de la tectonique des plaques, des mouvements intraplaques et plus généralement à la surveillance et bientôt à la modélisation des zones actives. Pendant longtemps les techniques utilisées étaient précises mais nécessitaient des installations logistiques lourdes. C'est le cas des mesures laser sur satellite et sur la Lune ou des mesures VLBI (Very Long Baseline Interferometry). Ces techniques ont permis la définition et le contrôle permanent d'un nouveau système de référence l'IERS (International Earth Reference System) dont le bureau central est à Paris. Les précisions sont centimétriques. De nouvelles techniques radioélectriques, donc tout temps, utilisant des stations sol légères et de fonctionnement automatique permettent une extension et une densification du réseau, nécessaires pour la surveillance des zones actives. Il s'agit des techniques GPS, DORIS et PRARE. Les précisions centimétriques en relatif, sub-décimétriques en absolu sont déjà atteintes. Notons que ces mêmes techniques de positionnement sont une composante incontournable des systèmes altimétriques visant à déterminer la surface océanique et les variations du niveau de la mer.

Un inventaire des missions scientifiques:

Cette approche se fonde sur le seul aspect scientifique du problème de l'observation spatiale de la Terre. Il est bien évident que certaines contraintes politiques et technologiques modifieront cette approche, mais il peut-être utile d'essayer de décrire, probablement avec une certaine part de subjectivité, ce que pourrait être une démarche fondée sur la seule finalité scientifique. On se fonde sur une approche thématique, traduite en termes d'ensembles instrumentaux dont la synergie permet justement d'atteindre sans dégradation un ou plusieurs des objectifs scientifiques cités plus haut. Il est clair que la plupart des instruments étudiés par les grandes agences y trouvent leur place et que des regroupements pourraient se faire, pour autant que les exigences de compatibilité entre instruments et paramètres d'orbite ne conduisent pas, comme cela a déjà été le cas dans le passé, à trop de compromis. Ceux-ci, s'ils permettent de prétendre "tout faire", ce qui peut constituer un excellent argument de "vente" des missions, n'aboutissent souvent qu'à des résultats incomplets aux yeux de la communauté scientifique.

Une démarche globale d'observation de la terre devrait comporter:

- une mission météorologie opérationnelle incluant une nouvelle génération de satellite géostationnaire (Meteosat Deuxième Génération) et des plates-formes en orbite polaire emportant une charge utile composée au minimum d'un imageur visible haute résolution et de sondeurs infra-rouge et micro-ondes pour la détermination des profils verticaux des paramètres thermodynamiques.

- une mission environnement destinée à l'étude des cycles géochimiques du CO₂, du méthane, des oxydes d'azote, de l'ozone. Elle emporterait les instruments adaptés aux mesures physico-chimiques dans la profondeur de l'atmosphère par visée au nadir ou au limbe (spectromètres ultra-violet, visible, infra-rouge et micro-ondes). L'observation de la surface océanique et terrestre indispensable pour la détermination des caractéristiques de la biosphère utiliserait des spectro-imageurs visible et infra-rouge à moyenne résolution spatiale. Pour la physico-chimie de la troposphère et certains aspects de l'étude de la stratosphère, une telle mission à l'horizon 1996-1997 comblerait une lacune du programme d'observation, qui ne prévoit de telles mesures couplées que sur les plates-formes de seconde génération.

- une mission étude de la circulation océanique et des calottes polaires, incluant altimètre et diffusiomètre dans la suite de l'expérience Topex-Poseidon. Sur le plan thématique, et bien que les échelles de temps des phénomènes soient différentes, une telle mission apparaît également complémentaire des missions météorologie et environnement. Toutefois les contraintes spécifiques de précision et de répétitivité d'orbite qu'imposent les mesures altimétriques peut faire préférer, pour éviter des compromis, des plates-formes séparées.

- une mission d'étude de la surface terrestre à très haute résolution spatiale fondée sur les mesures de type radar à synthèse d'ouverture et imageur multi-spectral. Ici encore les contraintes de répétitivité d'orbite qu'impose l'utilisation d'instruments à champ étroit rend les compromis difficiles en termes d'orbitographie avec les contraintes des instruments à champ large utilisés en météorologie et environnement. Par ailleurs, les contraintes de poids, de puissance et de compatibilité instrumentale associées à des instrumentations actives conduisent également, en cas de plates-formes multi-instruments, à des choix en termes de charge utile qui diminuent fortement les synergies instrumentales et donc la finalité scientifique.

- une mission consacrée à l'étude du cycle de l'eau, centrée sur les régions tropicales et fondée sur un ensemble instrumental comportant systèmes laser de sondage actif pour les mesures de vent et d'humidité et radar pour la mesure des précipitations. Du fait de son caractère très ambitieux sur le plan instrumental, une telle mission, si l'on veut inclure l'ensemble des composantes, n'est concevable qu'à l'échéance de l'an 2000. A nouveau les contraintes liées aux systèmes de sondage actif en termes de poids, de puissance, d'altitude, d'orbite et de compatibilité instrumentale rendent, au moins à moyen terme, une telle mission inconciliable avec les missions opérationnelles dont elle prolonge cependant les objectifs scientifiques.

- une mission d'étude des modifications de l'environnement lointain de la Terre aux variations, undécennales ou éruptives, de l'activité solaire. Une telle mission est d'ailleurs actuellement coordonnée au niveau des agences spatiales nationales et internationales dans le cadre du Programme International d'Etude des Relations Soleil-Terre, ISTP.

- une mission d'étude de la terre interne pour la mesure des champs gravimétrique et magnétique combinant éventuellement un satellite en orbite basse et une plateforme haute altitude. Une telle mission a d'ailleurs déjà fait l'objet d'études détaillées par les agences spatiales. Sa faisabilité est amplement démontrée et il s'agit donc plutôt ici de prendre une décision permettant de réaliser un programme dont l'importance scientifique est indéniable.

Cet ensemble pourrait constituer le point de départ, fondé sur une réflexion scientifique, de la composante spatiale d'une mission d'observation de la planète Terre. L'originalité de cette présentation réside plus dans la conception en termes de priorités thématiques, identifiées dans le cadre des programmes internationaux comme le PMRC ou le PIGB, que dans les choix instrumentaux.

6. Scénarios pour l'Europe et pour la France.

6.1 Aspects programmatiques.

6.1.1 Satellites d'observation à haute résolution.

En ce qui concerne les systèmes d'observation à haute résolution des terres émergées, les plus susceptibles de donner lieu à des applications de nature commerciale, donc de générer des revenus d'exploitation significatifs, la problématique des quinze prochaines années se présente de manière relativement simple:

- i) poursuivre et consolider la percée déjà réalisée dans le domaine de l'observation optique à haute résolution grâce aux satellites Spot 1 et 2 en exploitation, puis 3 et 4 prévus pour la période 1993-2000.
- ii) préparer dans les meilleures conditions possibles la mise en œuvre opérationnelle de systèmes d'observation radar à synthèse d'ouverture venant compléter les systèmes optiques.

Le premier objectif requiert l'engagement rapide des études nécessaires à la réalisation d'un satellite Spot de 2ème génération permettant de toucher de nouveaux marchés et de résister à la concurrence qui se profile à l'horizon dès la fin de la décennie, particulièrement du côté japonais. Les études de mission déjà réalisées en France et, indépendamment, en Grande-Bretagne et aux Etats-Unis, convergent toutes vers un système d'observation à résolution au sol accrue (de l'ordre de 3 à 5 mètres) ayant une capacité de couverture stéréoscopique "instantanée" c'est-à-dire au cours d'un même passage du satellite sur une zone. Cette capacité n'existe pas sur les satellites Spot 1 à 4, ce qui limite fortement le développement des applications faisant appel à la connaissance du relief (télécommunications, radiotéléphone, télédiffusion, travaux publics, irrigation, simulations de survol à basse altitude, etc.)

Un tel système d'observation de nouvelle génération, actuellement en phase d'étude, préliminaire, devrait faire l'objet d'un engagement financier dès 1993 afin d'être disponible en 1998-1999, prêt à prendre le relais des satellites Spot précédents.

Compte-tenu du développement du marché Spot actuel, il semble possible d'envisager qu'un tel programme soit partiellement autofinancé, par exemple, à hauteur du coût d'un satellite Spot récurrent, la puissance publique ne conservant à sa charge que le coût des développements nouveaux nécessaires à l'amélioration des performances.

Ce schéma devrait faire l'objet d'un examen détaillé au cours de l'année 1992 afin d'en établir la faisabilité et d'en déterminer les conditions de réussite compte-tenu du risque financier important que devront prendre les actionnaires de la société Spot-image. A cet égard l'élargissement de son tour de table à d'autres partenaires français et européens, évoqué au chapitre 4.3, semble indispensable et serait de nature à faciliter l'élargissement éventuel des coopérations d'Etat à Etat pour la part de financement publique du programme.

En parallèle avec le développement de la filière optique, il est souhaitable de préparer au mieux l'avènement des systèmes d'observation de type radar à synthèse d'ouverture qui seuls permettent une observation par tous les temps et de jour comme de nuit. L'expérience acquise avec les satellites d'observation optique (Landsat et Spot) depuis près de 20 ans montre amplement les limites de ces systèmes dans les zones où le couvert nuageux est persistant (zones équatoriales) ou trop fréquent pour permettre une observation répétée (Europe du Nord). Il est patent, par exemple, que de nombreux clients espèrent un jour disposer d'images satellites à haute résolution de l'île de Bornéo et qu'ils n'ont jamais pu être correctement servis avec les satellites optiques. Sur un plan statistique, il est utile de savoir que seulement 20% des 1.500.000 images prises par les satellites Spot au cours de 5 dernières années sont considérées comme utilisables et que ce pourcentage tombe à quelques pourcents sur les zones équatoriales ! Pour des observations stéréoscopiques, la probabilité d'obtenir deux images sans nuages de la même zone au cours de la même saison est en moyenne de 4%.

Ces quelques chiffres montrent tout l'intérêt qu'il y aurait à compléter les systèmes d'observation optique par des systèmes radar à synthèse d'ouverture, capables de produire des images de résolution géométrique (10 à 30 mètres) et de dimensions comparables (100 km). Le lancement récent du satellite européen ERS-1 et la qualité excellente des premières images produites par son instrument radar à synthèse d'ouverture fonctionnant en bande C (5.5 cm de longueur d'onde) vont permettre d'apprendre à utiliser l'imagerie radar,

l'expérience disponible étant pour le moment réduite à l'exploitation de données aéroportées (donc à champ étroit) et des images en bande L des quelques expériences américaines civiles déjà réalisées.

Le CNES mène depuis quelques années des études sur le thème de l'antenne active en bande X qui permet une grande souplesse de prise de vue (champ, résolution au sol, incidence) et offre de ce fait des possibilités tout à fait intéressantes pour une exploitation devant satisfaire de multiples applications. Parallèlement certaines études sont menées par le Ministère de la Défense et bien entendu par de nombreux autres pays européens, en particulier les britanniques.

L'Agence Spatiale Européenne de son côté envisage d'embarquer une version améliorée de l'instrument radar de ERS-1 sur sa première plate-forme polaire, prévue vers 1998.

Il reste que le débat est encore aujourd'hui très ouvert sur le choix optimum des paramètres principaux pour un système à vocation opérationnelle : faut-il une ou plusieurs fréquences, si oui lesquelles, quel compromis champ-résolution, etc.

Il apparaît qu'une phase d'expérimentation et d'analyse des données disponibles est encore nécessaire avant de procéder aux choix des principaux paramètres, choix qui pourraient intervenir vers 1993 et conduire à un engagement de programme vers 1995.

Au-delà des choix techniques, toutefois, se pose le problème du cadre de réalisation d'un tel programme : autant il pouvait être judicieux de confier à l'Agence Spatiale Européenne la responsabilité du développement et de l'expérimentation d'un système totalement nouveau comme ERS-1, autant il n'est pas souhaitable qu'il faille rester dans ce cadre pour un système à vocation opérationnelle. Les problèmes que rencontre aujourd'hui l'organisation Eumetsat dans ses rapports avec l'ESA montrent que lorsque les exigences de la continuité opérationnelle du service aux utilisateurs doivent prendre le pas sur l'innovation technologique, une approche différente est souhaitable.

A ce stade des réflexions et des études sur une mission d'observation radar à vocation opérationnelle, il paraît préférable de garder plusieurs options :

- soit une réalisation dans un cadre essentiellement national avec quelques coopé-
rants minoritaires (scénario type Spot ou Hélios),
- soit une réalisation dans un cadre bilatéral avec un coopérant contribuant à un
niveau comparable (scénario type Symphonie). On peut penser ici au Royaume
Uni ou au Canada compte tenu de leur intérêt pour les missions d'observation
Radar et de ses capacités industrielles.
- soit enfin une réalisation dans un cadre multilatéral "ad hoc" si plus de deux pays
souhaitaient s'engager dans un tel programme, par exemple la France, l'Allemagne,
l'Italie, le Royaume Uni, les Pays-Bas. Dans une telle hypothèse, il sera souhaitable
que le CNES assure la gestion technique du programme.

6. 1 .2 Satellites du temps et du climat.

Observation en orbite géostationnaire.

Sur l'orbite géostationnaire, le problème essentiel est celui de la permanence des ob-
servations opérationnelles ; les données de ce problème sont simples et les variations
possibles du scénario ne portent que sur le second ordre. Il existe en effet un pro-
gramme opérationnel européen, Meteosat, qui alimente à la fois la météorologie opé-
rationnelle et la recherche sur les mécanismes du climat. L'utilité opérationnelle de
ce système est démontrée, il est aujourd'hui totalement intégré dans la chaîne de
prévision à très courte échéance. La continuité en orbite doit être assurée, et seule
l'Europe est en mesure de le faire, car on ne peut compter sur une contribution afri-
caine.

Les seules variables véritables sont donc le moment où il faut changer de type de sa-
tellite pour passer à une nouvelle génération, et l'ampleur du saut qualitatif que l'on
attend d'un tel changement de génération. Ces deux paramètres ne sont évidemment
pas indépendants.

Le premier Meteosat a été lancé en 1977, et on prévoit actuellement que la deuxième
génération entrera en service en 1998-2000. Il semble bien qu'il s'agisse là d'une
limite à ne pas dépasser. Pour maintenir le programme actuel jusqu'à cette époque, il
a fallu décider en 1990 d'une nouvelle fabrication, ce qui s'est avéré assez incom-
mode du fait de la difficulté à retrouver des composants devenus technologiquement
obsolètes. De plus les insuffisances du satellite en regard des services pour lesquels
on l'utilise sont depuis longtemps bien connus, de même que sont bien connus les re-

mèdes qu'il faudrait y apporter. Par exemple, l'identification des types de couches nuageuses de nuit ou en faible lumière est presque impossible dans certains cas, pourtant très gênants du point de vue opérationnel, comme la détection au lever du jour des couches de brouillard qui viennent de se former et présentent un grave danger pour la circulation. On sait quel type de mesure infra-rouge complémentaire permet de faire cette détection et la technologie pour le faire est maintenant disponible.

L'ESA a entrepris dès 1985 de réfléchir à la définition de la deuxième génération de Meteosat. Un concept de satellite a été défini qui visait à faire progresser sensiblement l'état de l'art pour pallier précisément toutes les insuffisances reconnues de Meteosat, et pour en outre lui faire jouer une partie du rôle actuellement dévolu aux satellites en orbite polaire. En réexaminant la question après sa création, Eumetsat a conclu que le projet était exagérément ambitieux pour un satellite à vocation opérationnelle ; les coûts prévus étaient très élevés, et les risques d'échec technologique et de non respect du calendrier non négligeables. Rétrospectivement, en constatant les énormes difficultés rencontrées par les USA pour la mise au point de leur GOES-NEXT, également très ambitieux, on ne peut que se féliciter de ce choix. Le Meteosat de deuxième génération sera donc encore stabilisé par rotation, mais son radiomètre disposera du nombre maximum de canaux spectraux possibles sur une telle configuration, et on aura une image tous les 1/4 heures au lieu de toutes les 1/2 heures. L'identification des nuages et du développement de la convection profonde sera très améliorée, ainsi que la mesure de l'altitude du sommet des nuages. On disposera également de canaux de mesure de la stabilité atmosphérique permettant d'augmenter les délais d'alerte pour toute une classe de phénomènes météorologiques dangereux.

En résumé, il paraît raisonnable de retenir la vingtaine d'années comme la durée en orbite d'une génération de satellites d'observation - on constate d'ailleurs a posteriori que les programmes américains tant en orbite polaire qu'en orbite géostationnaire sont dans les mêmes ordres de grandeur sans que ce choix ait été fait explicitement au moment du démarrage des programmes - et de se fixer pour règle d'avoir un saut qualitatif maîtrisé entre générations pour rester dans la limite des risques admissibles par les entités opérationnelles. Pour fixer les idées, on peut considérer comme raisonnable une augmentation de 10 à 20% du coût moyen annuel du programme pour les améliorations liées au changement de génération.

Pour ce qui est de Meteosat, le moment est venu de décider du lancement de la seconde génération, et de phaser le programme pour que le premier lancement soit fait au plus tard en l'an 2000.

Observation en orbite polaire.

Le problème essentiel est l'articulation de la composante opérationnelle et de la composante expérimentale du programme.

Comme nous l'avons déjà dit, l'observation opérationnelle en orbite polaire est aujourd'hui assurée par deux satellites américains de la NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration), qui n'en maintiendra qu'un à partir de 1997. L'Europe s'est donné une double ambition, assurer la continuité du deuxième satellite en orbite polaire et développer une instrumentation embarquée nouvelle, nécessaire en complément de l'instrumentation opérationnelle actuelle pour satisfaire les besoins d'étude des mécanismes du climat.

Les deux objectifs, observation opérationnelle d'un côté et perfectionnement des moyens d'observation de l'autre conduisent à des contraintes différentes, ainsi que cela a été exposé plus haut (voir 2, Position du problème et 4.1, Analyse de la contrainte de continuité). Dans la recherche d'une solution optimale du point de vue coût/efficacité, on peut accorder un poids différent aux différentes contraintes selon les objectifs que l'on se donne en priorité. C'est ce qui conduit à l'existence de trois types de scénarios en compétition, qui diffèrent par le degré de cohabitation envisagé entre instruments opérationnels et instruments expérimentaux.

- le scénario de référence " de l'Agence Spatiale Européenne" (du moins le dernier en date) rassemble tout sur une seule plate-forme. La charge utile de 2400 kg comporterait l'instrumentation météorologique opérationnelle, des instruments développés par l'ESA , d'autres provenant de laboratoires nationaux choisis par appel d'offres pour l'observation de l'Océan et de la physico-chimie atmosphérique et l'étude des ressources terrestres et enfin des instruments d'observation de l'espace pour les besoins d'autres disciplines que celles de l'observation du système climatique. Les instruments opérationnels (météorologiques et océanographiques) sont regroupés sur deux des cinq modules de la plate-forme polaire de manière à pouvoir en être séparés dans des missions ultérieures.

Pour satisfaire la contrainte de continuité opérationnelle pour la météorologie, l'ESA propose qu'une plate-forme réduite comprenant les instruments opérationnels et

prise en charge par Eumetsat soit prête pour le lancement 18 mois après la première de manière à minimiser le délai d'absence de mesure en cas d'échec au lancement ou de panne en orbite.

L'autre plate-forme, sous la responsabilité de l'ESA, comprendrait les instruments développés par l'ESA et d'autre provenant de laboratoires nationaux choisis par appel d'offres pour l'étude de l'environnement, de la physico-chimie de l'atmosphère et assurerait la continuité d'ERS. Elle serait développée pour être lancée cinq ans après la première grande plate-forme.

La base du raisonnement de l'ESA est la recherche d'une diminution du poids des coûts fixes (lancement, plate-forme satellitaire) par répartition sur le plus grand nombre de missions. Cela suppose que l'on ait adopté pour la charge utile expérimentale qui représente les trois quarts de la masse instrumentale une politique de continuité voisine de la continuité opérationnelle - voisine, mais pas nécessairement identique au sens où il n'y a pas nécessairement continuité d'une mesure donnée mais continuité de présence d'une masse d'instruments expérimentaux -. Rien n'est dit sur la possibilité, dans un tel concept de programme, de gérer correctement le problème de rendez-vous des divers instruments pour un lancement donné. Ce problème, toujours compliqué, serait insurmontable pour un relancement décidé avec un préavis court par suite d'une panne en orbite.

- le scénario "français" propose de rassembler sur une même plate-forme la charge utile météorologique opérationnelle, des instruments pour l'océanographie physique (diffusiomètre et altimètre) et un instrument pour la mesure du bilan radiatif mondial, le total représentant 1100 kg de charge utile. La charge utile de la mission environnement global définie au chapitre 5 serait embarqué sur un satellite différent qui n'aurait pas vocation à être remplacé en vue de continuité. Ce deuxième satellite, de caractère expérimental, serait l'objet d'un relancement lorsque jugé nécessaire avec une charge utile redéfinie à chaque fois.

L'idée de base de ce scénario est qu'il faut concevoir un satellite à vocation opérationnelle en réunissant des instruments déjà éprouvés pour lesquels le besoin de continuité est soit déjà établi, soit quasi certain. On place dans cette dernière catégorie les instruments d'observation de la surface de l'océan, le diffusiomètre et le radar altimètre. Tous les instruments embarqués obéissant à la même logique, il est plus facile de définir une stratégie de relancement en cas de panne.

- le scénario purement météorologique qui a fait l'objet d'une étude de Phase A par Eumetsat. On conçoit ici un programme strictement adapté à la poursuite de la mission actuellement accomplie par le satellite américain de l'orbite du matin. Les instruments embarqués sont donc ceux de la charge météorologique opérationnelle actuelle, avec la seule addition d'un prototype d'interféromètre sondeur à haute résolution spectrale destiné à remplacer à échéance le sondeur infra-rouge actuel. Cette charge utile représente environ 650 kg.

Un tel scénario est la version minimale pour la communauté météorologique. Il constitue en effet ce qu'Eumetsat devra s'efforcer d'accomplir par lui-même si aucun accord ne peut être finalement obtenu avec l'ESA. Son objectif étroit permet l'optimisation maximale du choix de l'orbite et de la politique de remplacement, au prix évidemment d'un abandon de la possibilité d'enrichissement de l'information utile à travers des instruments complémentaires comme par exemple ceux qui observent la surface de l'Océan.

Pour terminer, il n'est pas inutile d'envisager un quatrième scénario, celui de l'**extension de la coopération internationale**. Les trois éventualités citées plus haut font en effet toutes l'hypothèse que l'Europe va prendre en charge le maintien d'une capacité opérationnelle d'observation de l'environnement climatique en orbite polaire. A ce jour, une telle décision, aussi justifiée qu'elle paraisse, n'est pas prise. Les discussions actuelles au sein de l'ESA, déjà bien difficiles, ne concernent pourtant que la décision de réaliser un, ou au plus deux, éléments préopérationnels dont la continuité n'est a priori nullement acquise. On sait bien que la difficulté principale est celle du financement d'un tel programme au moment où d'autres programmes spatiaux, peut-être plus prestigieux, en tous cas plus spectaculaires, demandent des financements considérables. Dans un tel contexte, il pourra s'avérer nécessaire de rechercher un partenariat élargi, pour diminuer la charge financière européenne. On songe évidemment à un élargissement vers des pays industrialisés au produit national brut significatif, comme le Canada, l'Australie, et bien entendu le Japon. Le Japon, dans le domaine de l'observation spatiale de la planète, est très actif pour la mise en oeuvre de programmes expérimentaux de qualité. Il n'est peut-être pas impossible de l'intéresser à la réalisation d'un programme opérationnel. Les entités opérationnelles comme Eumetsat, dont la vocation n'est pas de développer les compétences industrielles mais de fournir le meilleur service au meilleur coût, n'auraient aucune difficulté de principe à oeuvrer dans ce sens.

Il va de soit que les scénarios 3 et 4, dont seule la partie opérationnelle est décrite ci-dessus, devraient être complétés par un programme expérimental inscrit dans le cadre de l'ESA et conçu de façon à couvrir les missions décrites au chapitre 5

6.1.3 Fonctions de télécommunication.

Assurer la pérennité des systèmes existant et aider au développement de nouveaux systèmes telles sont les deux voies à suivre. Une telle attitude volontariste est d'autant plus nécessaire qu'une concurrence se dessine à l'horizon. La Société ORBCOM filiale de OSC qui dispose des possibilités de lancements de PEGASUS tente de s'introduire dans un créneau où les équipes françaises ont le savoir faire technique, le savoir faire opérationnel et ont conquis le marché. La possibilité de lancer des microsattellites soit en passagers soit à l'aide de moyens nouveaux tels PEGASUS ont conduit CLS et le CNES à proposer le lancement d'un microsattellite simple précurseur d'une série de microsattellites si cela s'avère nécessaire.

Un problème important est ici de savoir si le recours à des solutions non spécifiques ne va pas modifier les perspectives dans ce domaine.

Les systèmes de télécommunications spécialisées embarqués sur les satellites d'observation remplissent des fonctions particulières. Les entités commerciales de télécommunication n'avaient pas développé ces fonctions parce qu'elles ne correspondent pas à des marchés larges sur lesquels une rentabilité commerciale est acquise d'avance.

On devra en la matière se garder de conservatisme, et ne pas reproduire indéfiniment ces fonctions sur les satellites d'observation, si des services commerciaux banalisés peuvent y être un jour substitués, l'attitude contraire conduisant rarement à un résultat intéressant en rapport coût/efficacité. Le moment approche où ce genre de question devra être posé. Voyons en effet quelles perspectives existent pour les types de services spécialisés actuellement rendus par des satellites météorologiques.

Le service MDD des satellites Meteosat actuels permet une diffusion en direction des services météorologiques des pays africains de messages alphanumériques et de cartes fac-similé, qui n'aurait autrement pu être réalisée qu'avec des stations satellitaires du système Intelsat très coûteuses à l'époque de la conception du système. C'est déjà nettement moins vrai aujourd'hui. En France, la société Polycom a mis en place un service utilisant les satellites Telecom 1, Eutelsat ou Intelsat de distribution point-multipoint qui peut remplacer cette fonction MDD. La diffusion en Europe se

fait en bande Ku avec des stations qui sont maintenant très bon marché. Sur l'Afrique, il faut utiliser la bande C des satellites Intelsat avec des stations encore relativement coûteuses. Par ailleurs, dans le système MDD, il est possible d'avoir une station de diffusion en Afrique, ce qui est une certaine complication pour un service du type POLYCOM. Néanmoins l'économie d'ensemble d'une éventuelle substitution, qui n'a jamais été étudiée, mériterait de l'être.

Une autre fonction des satellites géostationnaires est la collecte de données de stations de mesure non reliées à des réseaux terriens de télécommunication. Là encore, l'intérêt du système paraît évident aux yeux des usagers météorologiques à qui "il ne coûte rien" à l'emploi, dans la mesure où les coûts d'investissement et de fonctionnement sont cachés dans les coûts du programme satellitaire dont ils ne représentent qu'une part marginale, même pas identifiée. Cependant là aussi une étude de substitution mériterait d'être faite par comparaison aux services en cours de développement par les entités de télécommunication pour relation avec les mobiles, comme le Standard C d'Inmarsat ou le Euteltracs d'Eutelsat.

Examinons pour terminer la fonction de localisation de stations mobiles telles que Argos, système français embarqué sur les satellites américains en orbite polaire. Là encore, le recours à des solutions non spécifiques n'est pas exclu à terme ; la miniaturisation des récepteurs du système GPS et leur banalisation, source d'économies d'échelle, peut rendre possible, par combinaison avec la fonction de transmission mentionnée plus haut, la mise en oeuvre d'un système de localisation/collecte qui, à la différence du système Argos actuel, fonctionnerait en temps réel.

6.2. Organisation des responsabilités institutionnelles.

Pour la mise en oeuvre du scénario programmatique quel qu'il soit, il n'est guère réaliste de vouloir définir un scénario institutionnel détaillé. On peut cependant s'essayer à définir un schéma qui se limite à préciser en termes généraux le rôle des principaux acteurs. On indiquera en outre à quelle difficulté peut vraisemblablement se heurter sa mise en oeuvre.

Il est commode de distinguer d'une part le **segment spatial** fondé sur une succession de projets et d'autre part le **segment terrien** au sens le plus large, c'est-à-dire y compris les tâches d'archivage et d'accès, dont la permanence excède de beaucoup la durée des projets.

- Segment spatial:

Pour ce qui est de la catégorie 1, la tactique de la France devrait s'organiser en fonction d'un objectif principal: maintenir la position dominante de la France au au plan commercial dans ce domaine.

Pour ce qui est de la catégorie 2, le rôle de l'ESA et celui d'Eumetsat doivent d'abord être clairement définis.

- S'agissant de l'ESA, il semble souhaitable de créer un programme obligatoire nouveau, centré sur les projets expérimentaux et singulièrement sur les catégories 2 et 4. Un tel programme peut être bâti sur le modèle du programme scientifique obligatoire et placé sous le contrôle de la communauté scientifique concernée. Il faudrait cependant veiller à ce que les institutions responsables de l'observation opérationnelle soient adéquatement représentées dans les instances du programme. Il faudrait également éviter que l'ESA ne constitue une équipe scientifique interne qui confisque le programme à son profit.

- S'agissant d'Eumetsat, il semble raisonnable de lui confier la gestion et par conséquent le financement des programmes opérationnels environnementaux (catégorie 2 et accessoirement catégorie 3) sans limiter strictement à la météorologie cette responsabilité.

Un tel partage des tâches laisse ouvertes un certain nombre de questions:

- Comment traiter le cas des satellites préopérationnels? Il semble raisonnable de traiter ce problème au cas par cas par un arrangement ad hoc entre Eumetsat et une agence spatiale, ESA ou CNES en pratique. Ces projets seraient donc traités hors du cadre du programme obligatoire.

- Quel rôle pour le CNES ? On peut penser que le CNES, outre le rôle qu'il jouera dans la catégorie 1, trouvera à employer son expertise :

- dans la maîtrise d'œuvre des (ou de certains des) satellites opérationnels d'Eumetsat,

-dans la maîtrise d'œuvre de certains projets préopérationnels, soit au plan national soit dans un cadre bilatéral (franco-allemand par exemple).

Difficultés de concrétisation d'un scénario global:

Ces difficultés sont de deux ordres:

- d'une part les conflits d'ambition des principaux acteurs,
- d'autre part une absence de structure politique susceptible de les résoudre au niveau européen, ou de tracer une ligne politique au niveau national.

S'agissant des conflits d'ambition, le contexte est créé par la vogue médiatico-politique que connaissent les questions d'évolution du climat et de changement global. Le risque est de voir les agences spatiales, au premier rang desquelles l'ESA, chercher, pour bénéficier ce courant porteur, à se transformer en agences chargées de la surveillance de l'environnement.

S'agissant de la concertation politique nécessaire pour organiser l'ensemble du secteur au niveau européen, l'observation de la Terre est exemplaire d'une carence institutionnelle grave. Le Conseil ministériel de l'ESA est compétent pour traiter des problèmes de l'ESA. Il ne l'est pas, comme le montrera sa réunion de Novembre, pour couvrir l'ensemble du secteur en coordonnant les rôles et les sources de financement de plusieurs institutions.

Il n'existe pas non plus d'enceinte nationale où l'ensemble des problèmes d'observation spatiale de la Terre puisse être débattu en présence des principaux acteurs. Un récent rapport de la Délégation générale à l'Espace qui recommandait la création d'une telle enceinte est resté sans suite.

On ne peut naturellement pas compter sur les responsables des institutions concernées pour établir eux-mêmes, et sans instance d'arbitrage, les concertations nécessaires à la mise en oeuvre de quelque scénario que ce soit; leur rôle est naturellement d'abord de défendre la place et l'avenir de l'institution qui leur est confiée.

Cette faiblesse des structures politiques est grave. Elle rend utopique la mise en oeuvre de quelque scénario cohérent que ce soit, car il n'existe

pas d'outil pour régler les questions au demeurant simples que chaque scénario institutionnel comporte inévitablement.

- Segment terrien:

S'agissant du segment terrien, la difficulté principale est dans la constitution d'archives à long terme pour l'ensemble des données acquises concernant les diverses facettes de la géosphère et de la biosphère.

Pour les programmes environnementaux opérationnels, on voit assez bien ce qu'il convient de faire. Par définition, ces programmes produisent des données dont la qualité est connue, et surveillée, et pour lesquelles les procédures d'étalonnage et de traitement sont définies. Si la gestion de ces programmes est confiée à Eumetsat, cette organisation devra assumer la responsabilité de la distribution des données ainsi que de leur archivage. Elle devra participer aux systèmes de coordination existants ou en cours de définition par les organes internationaux concernés (OMM, COI, ICSU) pour l'échange et l'accès aux données.

Cela ne suffit pas ; l'analyse des observations, l'assimilation explicite dans des modèles existant ou devant être développés spécifiquement, l'évaluation des systèmes, la conception des nouveaux projets et systèmes ne sont possibles que si une communauté d'ingénieurs, techniciens et chercheurs existe, accède aux données, dialogue et coopère. Cela veut dire une formation adéquate ; cela veut dire aussi des structures d'accueil remplissant pleinement les fonctions opérationnelles mais ouvertes aux recherches à mener en parallèle, recherches qui seront la base de l'opérationnel de demain.

En France, seule Météo France peut prendre et a pris une telle option. Les autres organismes français, bien qu'ayant des structures de concertation permanentes pour harmoniser leur participation aux grands programmes n'ont pas la possibilité d'accueillir des équipes atteignant la taille critique. A cet égard, la création en cours d'un Centre Régional Global Change à Toulouse et d'un Institut des Sciences de l'Environnement Global en région parisienne sont des éléments positifs.

Le problème est un peu plus compliqué pour les satellites à caractère expérimental. Les données de ces satellites constituent toujours des inconnues au moins partielles au moment du lancement, malgré les simulations que l'on effectue le plus souvent avant le lancement. Les traitements appliqués aux données pour les transformer en para-

mètres physiques sont donc parfois remis en cause en cours de durée de vie. Pour que de telles données soient utilisables pour la surveillance à long terme de l'évolution climatique, il faut donc pouvoir retraiter les données pour remplacer dans les archives les résultats éventuellement erronés. Il faut en plus, malgré la durée éventuellement éphémère de l'instrumentation en orbite, avoir prévu les programmes de validation et d'étalonnage croisé de ces données pour assurer l'intercomparabilité de ces données avec d'autres, à travers le temps et l'espace.

Ce type de processus n'est pas traditionnellement mis en oeuvre, d'autant que les instruments embarqués sur les satellites expérimentaux sont assez souvent des instruments produits par des laboratoires sur des budgets relativement limités, et pour lesquels la motivation justifiant un investissement lourd à long terme dans les programmes d'accompagnement n'existe pas.

Il semble par conséquent nécessaire de mandater un ou plusieurs organismes pour jouer un rôle central de coordination et de soutien de manière à ce que se mette en place sous forme d'un réseau distribué un système d'étalonnage, validation et archivage des données recueillies au cours de missions expérimentales d'observation de la Terre.

7. Conclusions et recommandations :

Nous formulerons nos conclusions en termes d'objectifs et en termes d'actions. Rappelons d'abord trois caractères essentiels de ce domaine de l'activité spatiale :

- La nécessité d'une synergie spécifique entre science et application, entre recherche de connaissance nouvelle et fourniture de service;
- Le fait que l'état de l'art en matière de lanceurs et de plates-formes suffit à pourvoir aux besoins de ce secteur sans qu'il soit besoin d'envisager le recours à des technologies exotiques;
- La priorité à un effort de développement spécifiquement orienté vers l'amélioration des instruments et des techniques d'observation.

Objectifs :

S'agissant d'un secteur qui comporte des enjeux socio-économiques majeurs, dont certains se traduisent par des échanges commerciaux, les objectifs que l'on s'assigne ne peuvent faire abstraction des intérêts spécifiques de la France et de l'Europe. Il serait donc utopique d'envisager une programmation mondiale du genre de celle qui pourrait convenir aux sciences de l'Univers. Cela n'exclut pas, cependant, une recherche de complémentarité, par exemple entre certains éléments des programmes européens et américains.

Les objectifs généraux que nous proposons visent d'une part à assurer à l'Europe une place dans ce domaine qui soit à la mesure de l'effort qu'elle investit dans l'espace, d'autre part à préserver ou à affirmer la place de la France dans l'ensemble européen.

Ils s'expriment comme suit :

- assurer la continuité et le développement des programmes opérationnels en cours : Spot, Meteosat, et remédier aux lacunes qui existent en orbite polaire;
- établir un équilibre et une synergie entre les efforts investis dans les programmes expérimentaux et dans les programmes opérationnels;

- augmenter la part de l'effort spatial européen qui est consacrée à l'observation de la Terre;
- clarifier le rôle des structures européennes et définir leurs responsabilités respectives.

S'agissant plus particulièrement de la France:

- maintenir sa position dominante en matière d'observation à haute définition et assurer la continuité du programme Spot,
- définir et assurer le rôle du CNES dans la mise en oeuvre des programmes.

Ajoutons enfin qu'il est souhaitable que la politique de lanceurs prenne spécifiquement en compte les besoins de l'observation de la Terre et qu'il est désirable de débarrasser le programme d'observation de la terre de toute interférence avec les activités "Homme dans l'espace".

Actions :

La poursuite de ces objectifs se traduit par un certain nombre d'actions que nous avons évoquées dans le corps du rapport. Nous en dressons ici une liste qui ne saurait être exhaustive ; elles se divisent en deux catégories, celles qui concernent les structures et celles qui visent les programmes :

Structures :

Agence spatiale européenne :

L'ESA appelle trois réformes distinctes :

- La création d'un programme obligatoire nouveau centré sur les projets expérimentaux et particulièrement sur les catégories 2 et 4 (temps et climat et terre solide), placé sous le contrôle de la communauté scientifique concernée, distinct du programme scientifique obligatoire, et correctement articulé avec les institutions responsables de l'observation opérationnelle,
- Une réforme de la structure actuelle de l'exécutif qui ait pour effet de regrouper au sein de la direction "observation de la terre" les res-

ponsabilités qui concernent la plate-forme et celles qui concernent la charge utile,

- Une définition claire du rôle d'ESA en matière de programmes opérationnels de catégorie 2 et de sa relation avec Eumetsat. (Voir ci-dessous).

Eumetsat :

Au delà de la refonte de la convention Eumetsat, qui en est au stade de l'approbation par les Etats membres, deux actions sont nécessaires :

- définir clairement, et en cohérence avec le rôle de l'ESA, le rôle d'Eumetsat dans la définition et la réalisation des projets opérationnels;

- définir le champ d'activité d'Eumetsat. La recommandation que nous formulons est que ce champ soit étendu à tous les satellites opérationnels de la catégorie 2;

Les rôles et responsabilités respectifs d'ESA et d'Eumetsat en matière de satellites préopérationnels (ou de têtes de séries de satellites opérationnels) appellent une attention particulière, car c'est à ce niveau que les responsabilités des deux organisations peuvent s'imbriquer.

CNES :

Les ambitions nationales concernant le rôle du CNES doivent être mieux explicitées. Son rôle pivot dans le développement de la catégorie 1 doit être maintenu. S'agissant de la catégorie 2 et des satellites préopérationnels ou opérationnels, il semble raisonnable de chercher à faire du CNES l'agence d'exécution (maîtrise d'oeuvre) de tout ou partie des programmes européens. L'enjeu est en effet le maintien d'une vocation claire et suffisante du Centre Spatial de Toulouse.

En outre, l'unification des responsabilités concernant l'observation de la Terre dans l'organisation interne du CNES est une réforme qui améliorerait l'efficacité de cet organisme.

On a noté que pour la mise en oeuvre de certaines de ces actions, les outils de concertation manquent, soit au plan européen, soit au plan national.

Dans le cadre français, nous recommandons la création d'une enceinte nationale où l'ensemble des problèmes d'observation spatiale puisse être débattu en présence des principaux acteurs.

Dans le cadre européen, la France pourrait utilement prendre l'initiative d'une concertation au niveau ministériel qui couvrirait tout le champ de l'observation de la Terre (ou qui pourrait être limitée aux catégories 2 et 4). L'articulation d'ESA et d'Eumetsat pourrait être traitée à ce niveau.

Programmes:

Catégorie 1. Maintenir la position dominante de la France en Europe et dans le monde en assurant la continuité du programme Spot, ce qui suppose que l'on engage dès maintenant la préparation du (ou des) projet(s) qui succèdera(ont) à Spot 4 (cf 6.1.1.).

Catégorie 2.

Programme géostationnaire : assurer la continuité du service opérationnel et, pour cela, décider le programme Météosat seconde génération ; clarifier, à l'endroit de ce programme, les rôles respectifs d'Eumetsat, d'ESA (et le cas échéant du CNES) dans la mise en oeuvre et dans le financement (cf. 6.1.2.).

Programme en orbite polaire :

obtenir l'approbation d'un scénario réaliste:

- établissant une distinction claire entre une branche opérationnelle et une branche expérimentale relevant d'un nouveau programme obligatoire,**
- définissant les rôles respectifs d'Eumetsat, d'ESA (et le cas échéant du CNES) dans la mise en oeuvre et dans le financement de la branche opérationnelle.**

Nous exprimons à cet égard notre pessimisme sur la capacité de l'actuel scénario ESA à satisfaire tant les besoins expérimentaux que les besoins opérationnels.

Catégorie 4

Cette catégorie serait couverte par le programme obligatoire nouveau dont nous proposons la création.

Segment terrien. :

Un travail de réflexion spécifique demeure nécessaire, et d'abord au niveau national, pour la conception d'un segment terrien cohérent (cf.6.2).

Nous proposons qu'un certain nombre d'organismes (CNES, IFREMER, METEO-FRANCE, etc.) soient mandatés pour élaborer une démarche nationale inscrite dans le contexte européen et faire rapport à une enceinte nationale de concertation.

OFFICE PARLEMENTAIRE
D'EVALUATION DES CHOIX
SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES

EXPERTISE n°4

TELECOMMUNICATIONS

(Contribution au rapport présenté par Paul LORIDANT, Sénateur de l'Essonne,
sur les ORIENTATIONS DE LA POLITIQUE SPATIALE FRANCAISE ET EUROPEENNE)

Savely SCHIRMANN
Bruno BLACHIER

CETTE EXPERTISE EST COMPOSEE DES RAPPORTS DE MESSIEURS SAVELY SCHIRMANN ET BRUNO BLACHIER.

1ère PARTIE: Savely SCHIRMANN..... p. 1 à 40

2ème PARTIE: Bruno BLACHIER pages suivantes
(numérotées 3 à 98)

L'expertise de M.Schirmann insiste davantage sur les aspects liés au marché, aux structures industrielles et à la dérégulation. Celle de M.Blachier sur certains aspects techniques et sur les investissements à faire dans divers domaines (ex; antennes, traitement à bord, etc...)

Savely SCHIRMANN

ETUDES

Diplômé de l'Ecole Spéciale des Travaux Publics et du Bâtiment et de l'Industrie
Diplômé de l'Ecole supérieure d'Electricité.

CARRIERE

A CSF

1953 - 1956 Chef de Services Essais - Faisceaux Hertiens

1957 - 1960 Chef de Service Calculateurs de Tir pour l'Armée française

1960 - 1964 Chef de Service Travaux Extérieurs Faisceaux Hertiens

1964 - 1967 Directeur Industriel Département Accélérateurs de Particules

A Thomson - CSF

1974 - 1981 Directeur Technique Adjoint de la Division Faisceaux Hertiens et Liaisons
Spatiales (Télécommunications par Satellites) Ingénieur en Chef.

Après 1981 Ingénieur Conseil (communications par satellites)

Satel Conseil, Agence Spatiale Européenne.

TRAVAUX ET PUBLICATIONS

Utilizacion y futuro de las ondas milimétricas

"Comunicaciones y transportes" enero- febrero 1963

Direct satellite Transmission of educational TV

Technical and Economic Aspects of Ground Stations Configuration

"Conference publications" n°72 - september 1978

Communications spatiales

"Sciences et Techniques" n°54 - novembre 1978

Publications internes (CSF, Thomson - CSF, Satel Conseil)

Bruno BLACHIER

Monsieur **BLACHIER** a débuté sa carrière en 1957 au laboratoire de physique de Corbeville-Orsay

En 1968, il est détaché dans les laboratoires de COMSAT pour le compte d'INTELSAT par le CNES et les PTT.

Il a été chef de projet du satellite TELECCOM I, SYRACUSE

Il est actuellement ingénieur en chef à ALCATEL-ESPACE, s'occupant des projets systèmes tant civils que militaires.

**SYNTHESE DES EXPERTISES SUR LES SATELLITES DE
TELECOMMUNICATIONS
DE MM. B. BLACHIER ET S. SCHIRMANN**

Les deux expertises évoquent l'évolution des satellites de télécommunications depuis le lancement des premiers Intelsat. Elles envisagent l'évolution jusqu'à l'an 2000 et au-delà des satellites géostationnaires, de loin les plus nombreux, et des satellites à défilement destinés aux services mobiles, qui devraient émerger au cours de la période envisagée.

La capacité de transmission, la puissance à bord et la masse des satellites géostationnaires, tant internationaux que nationaux, tendent à croître. Leur multiplication et l'encombrement de l'orbite géostationnaire qui en résulte contraignent à un accroissement des bandes de fréquences (utilisation de bandes C et Ku élargies et expansion des fréquences plus élevées de la bande Ka), et à une utilisation plus efficace du spectre.

Ces satellites s'orientent surtout vers les différents services de télévision, et également vers ceux des réseaux autonomes utilisant de nombreuses petites stations, dont les prix doivent être les plus bas possible. On peut envisager à terme une utilisation du traitement à bord de certains satellites.

Les satellites de radio-diffusion, sonore et TV, ainsi que HDTV butent actuellement sur un problème de norme, lié à la rapidité des évolutions vers le numérique.

On doit également signaler l'expansion rapide des services mobiles (communications, localisation et contrôle aérien) assurés par les satellites géostationnaires.

Les satellites à défilement, destinés aux communications avec les mobiles sont aussi évoqués dans les 2 expertises : satellites sur orbites elliptiques très inclinées de type Molniya et satellites sur orbites circulaires basses, dans l'avenir desquels M. Blachier met plus d'espoir, et qui pourraient, pense-t-il, être associés dans certains systèmes à des satellites géostationnaires.

L'analyse de la compétitivité des industries françaises et européennes montre dans les 2 expertises les difficultés face à la concurrence américaine, et à celle potentielle du Japon.

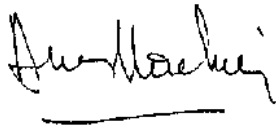
Le marché des satellites civils est sensiblement plus modeste en Europe qu'aux USA, ou un marché militaire significatif lui amène un flux technologique en partie immédiatement réutilisable.

L'avance de l'industrie japonaise dans la technologie de certains composants de base lui assure une position forte dans certains équipements. Les deux expertises recommandent donc que des efforts soient entrepris au niveau technologique de ces composants et des équipements correspondants.

L'expertise de M. Blachier insiste davantage sur certains aspects techniques et sur les investissements à faire dans divers domaines (ex : antennes, traitement à bord, etc...). Celle de M. Schirmann insiste davantage sur les aspects liés au marché, aux structures industrielles et à la dérégulation.

M. Blachier recommande des programmes expérimentaux dans le domaine des satellites à défilement à basse altitude, compte tenu des technologies nouvelles qu'il implique et dans certains domaines pouvant inclure satellites à défilement et satellites géostationnaires qui nécessiteraient des phases pré-opérationnelles (contrôle aérien, satellites offrant des forts débits binaires avec des petites stations au sol).

Enfin, M. Schirmann souhaite une réduction du nombre de participants industriels et un accroissement du marché intérieur par une plus grande libéralisation en Europe, deux points sur lesquels l'expertise de M. Blachier est plus réservée.



Bruno BLACHIER



Savely SCHIRMANN

**EXPERTISE SUR LES SATELLITES
DE TELECOMMUNICATIONS**

POUR

**L'OFFICE PARLEMENTAIRE
D'EVALUATION DES CHOIX
SCIENTIFIQUES ET
TECHNOLOGIQUES**

Par Mr. Savely S. SCHIRMANN

**91/SC - E 10
Septembre 1991**

TABLE DES MATIERES

	Pages
1. INTRODUCTION	1
2. BREF APERÇU SUR L'EVOLUTION DES SYSTEMES DE TELECOMMUNICATIONS PAR SATELLITES	3
2.1 Evolution de la conception des systèmes	
2.2 Grandes lignes de l'évolution des télécommunications par satellites et des services	
2.3 Bref aperçu sur les perspectives d'évolution	
1. Généralités	
2. Masse et puissance à bord des satellites	
3. Fréquences et coordination	
4. Services	
2.4 Cas particulier d'Intelsat	
3. EVOLUTION DES TECHNOLOGIES ET DES TECHNIQUES DE TRANSMISSION.....	14
3.1 Evolution des technologies	
3.2 Evolution des techniques de transmission	
4. APPRECIATION DE LA COMPETITIVITE DES SYSTEMES FRANCAIS ET EUROPEENS.....	22
4.1 Introduction	22
4.2 Aperçu sur le marché mondial des satellites de télécommuni- cations (non militaires)	23
4.3 Les structures industrielles et opérationnelles en Europe sont- elles adaptées au marché ?	25
4.4 Bref aperçu sur les travaux de Recherche et Développement	28
1. Aux USA	28
2. En Europe	29
3. Au Japon	30
4.5 Rôle de la dérégulation dans le développement et l'expansion des systèmes de télécommunications par satellites	30
5. BREF RESUME ET CONCLUSIONS	36

EXPERTISE SUR LES SATELLITES DE TELECOMMUNICATIONS

I. INTRODUCTION

1.1 Cette expertise a pour objet de décrire les perspectives d'évolution des télécommunications par satellites au-delà de l'an 2000, et d'apprécier la compétitivité des systèmes français et européens et l'adaptation aux besoins du marché. Elle porte sur les systèmes et plus particulièrement sur les satellites de télécommunications ; elle ne fait qu'évoquer le segment terrien et ne traite pas des lanceurs. Elle se fonde sur diverses activités dans ce domaine : participation à des groupes de travail, à des séminaires et à des conférences internationales, visites à des industriels, etc..., et elle prend en compte des études réalisées par Satel Conseil, études internes et études destinées à divers organismes.

La première partie de cette expertise donne un aperçu sur l'évolution actuelle et future des systèmes de télécommunications par satellites, et sur celle des satellites eux-mêmes. Elle décrit ensuite l'évolution correspondante des technologies et des techniques de transmission.

Une deuxième partie est consacrée aux problèmes de compétitivité internationale dans le domaine des satellites et aux aspects industriels. Elle montre la répartition du marché mondial au cours de la période de 12 ans, entre 1991 et 2002. Elle décrit les différences entre Europe, USA et Japon des structures industrielles et opérationnelles, des travaux de Recherche et Développement (R & D), et du niveau de la dérégulation ; elle indique l'influence de ces différences sur la compétitivité.

Une troisième partie donne un bref résumé de l'expertise et les conclusions que l'on peut en tirer.

1.2 La conception des satellites géostationnaires et leur utilisation pour les télécommunications ont été décrites en 1945 dans l'article bien connu de A. CLARKE. Vingt ans ont été nécessaires pour en faire une réalité avec la mise en service en 1965 du très modeste satellite Early Bird/Intelsat 1. En effet, une telle mise en service a préalablement exigé des progrès décisifs, essentiellement dans deux domaines : celui de la propulsion (lanceurs) et celui de l'électronique et des technologies spatiales.

Cette étape franchie, la poursuite de progrès continus non seulement dans la propulsion et dans l'électronique, mais également dans divers domaines tels que ceux des matériaux, des composants, des techniques de transmission, etc., ont, en moins d'un quart de siècle, fait des télécommunications par satellites une réalité de tous les jours (ex : télévision en temps réel).

Toutefois, l'évolution des télécommunications par satellites a été et reste conditionnée, non seulement par le progrès des technologies, mais également par l'évolution de l'ensemble des télécommunications, celle-ci étant elle-même imposée par l'évolution de la démographie, de l'économie, de la culture et de la société elle-même, qui dans les pays industrialisés se dirige vers une société d'information et de services, et dans les pays en développement vers une société industrialisée. L'évolution des télécommunications par satellites a été accélérée par l'expansion rapide des réseaux terrestres, notamment à fibres optiques, par l'accroissement des niveaux d'interférences et les difficultés de coordination qui en résultent, et plus récemment, par la dérégulation qui se développe rapidement, il est vrai à des degrés divers, dans presque toutes les régions du monde.

2. BREF APERCU SUR L'EVOLUTION DES SYSTEMES DE TELECOMMUNICATIONS PAR SATELLITES

2.1. Evolution de la conception des systèmes .

La conception des premiers systèmes de télécommunications par satellites avait une orientation de "type réseau", consistant à relier entre elles des stations de grandes dimensions situées en des noeuds importants (accès) de réseaux terrestres qui assuraient les connexions aux utilisateurs. Le satellite jouait, en quelque sorte, le rôle d'un noeud de câbles dans le ciel, réalisant un ensemble de liaisons de point à point. Cette conception était inévitable du fait des puissances relativement faibles disponibles à bord des satellites, et elle s'appliquait bien aux liaisons intercontinentales qui constituaient la mission première d'Intelsat, unique opérateur de satellites dans cette période. Les liaisons de ce type occupent encore à ce jour la plus grande partie de la capacité spatiale d'Intelsat, qui reste de loin l'opérateur mondial le plus important avec 15 satellites en exploitation sur les trois océans ; elles se justifient en effet dans les cas de trafic élevé ou moyen sur de grandes distances, et elles servent également de secours pour les cas de rupture de câbles. Par ailleurs Intelsat assure à de nombreux pays des services nationaux (transpondeurs loués ou vendus).

Les progrès rapides des lanceurs, l'émergence de nombreux systèmes nationaux disposant de leurs propres satellites concentrant sur la superficie de la nation concernée la puissance qu'ils rayonnent (P.I.R.E. ou Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente), la possibilité d'accroître la masse et la puissance à bord des satellites, ont conduit à infléchir cette conception initiale et à l'orienter plus directement vers les utilisateurs. L'expansion des réseaux terrestres à large bande, généralement mieux adaptés aux liaisons de point à point (téléphonie, données) a accéléré cette évolution, et l'a rendue inévitable.

Une part croissante de la capacité des satellites devant desservir des stations terriennes installées chez les utilisateurs, les niveaux de P.I.R.E. doivent permettre une réduction suffisante des dimensions de ces stations. Les densités maxima de flux au sol autorisées par le règlement des radiocommunications dans le Service Fixe par Satellite, et donc les P.I.R.E. correspondantes, sont sensiblement supérieures aux fréquences plus élevées de

la bande Ku (14-12/11 GHz) qu'à celles de la bande C (6 - 4 GHz), la seule utilisée à l'origine ; l'introduction ultérieure de la bande Ku favorise donc le développement des conceptions orientées vers les utilisateurs.

La multiplication des satellites de télécommunications utilisant les mêmes bandes de fréquence conduit à un certain "encombrement" de l'orbite géostationnaire, avec pour conséquences l'accroissement du niveau général des interférences et des difficultés de coordination dans le cadre de l'Union Internationale des Télécommunications (U.I.T). Le nombre des satellites de télécommunications en exploitation est actuellement déjà de l'ordre de la centaine. Les limitations de capacité de transmission des satellites résulteront à l'avenir davantage de l'insuffisance de positions orbitales et de bandes de fréquences disponibles, que de celle de la puissance à bord.

2.2. Grandes lignes de l'évolution des télécommunications par satellites et des services.

Les télécommunications par satellites, partie intégrante de l'ensemble des télécommunications, n'en constituent toutefois qu'une faible fraction, bien que leur rôle soit primordial dans certains services. Ayant atteint le stade de la maturité, elles n'en continuent pas moins à se développer et à évoluer, mais en ré-orientant quelque peu leurs objectifs et en diversifiant davantage les services assurés . L'expansion rapide des moyens de transmissions terrestres à large bande (fibres optiques) les contraint en effet à bénéficier au maximum des avantages réels résultant des spécificités des satellites, et à se concentrer principalement sur les services correspondants. Ces spécificités consistent essentiellement dans la capacité de diffusion sur toute la zone couverte par les antennes du satellite, dans l'accès immédiat à ce dernier à partir de tout point de cette zone, ainsi que dans la grande souplesse d'exploitation, de restructuration et d'expansion des réseaux qui en résulte.

Les satellites de télécommunications s'orientent donc de plus en plus vers des services de distribution et de diffusion de toute nature, large ou restreinte, télévision, radio et données, vers des communications entre points et points multiples (ex : réseaux VSAT, téléconférences, etc...) et vers tous les types de communications avec les mobiles.

Dans les systèmes régionaux et nationaux, les liaisons de point à point, de grand et de moyen trafic (essentiellement pour la téléphonie) qui constituaient le service principal, sont progressivement abandonnées aux réseaux terrestres, au fur et à mesure de l'expansion de ces derniers ; c'est ce qui est fait, notamment aux U.S.A., depuis déjà quelques années par les entités disposant à la fois de satellites et de réseaux terrestres (A.T.T, G.T.E.). Les liaisons de point à point tendent à se limiter principalement à des communications de faible capacité avec des sites isolés ou des régions périphériques, et à des trafics d'appoint et d'urgence ; dans certains pays industrialisés, on peut y ajouter des liaisons entre îlots disposant de R.N.I.S. (Réseaux Numériques à Intégration de Services). Cette orientation vers les usagers des systèmes de télécommunications par satellites est plus lente dans les pays en voie de développement qui ne disposent pas encore d'une infrastructure terrestre suffisante (ex : Indonésie) et dans le cas spécifique d'Intelsat, dont la mission première reste celle d'assurer les communications internationales et intercontinentales entre stations nationales reliées aux réseaux terrestres de leurs pays respectifs. Néanmoins, l'évolution des satellites régionaux et nationaux d'une part, la concurrence supplémentaire introduite par une dérégulation affectant son monopole d'autre part, ont poussé Intelsat à promouvoir les transmissions de TV et à introduire des services nouveaux (ex : IBS, VISTA, TELENET) qui permettent l'utilisation de stations de petites dimensions. Les P.I.R.E. assurées, dans des faisceaux fins (spot beams), par les nouvelles générations de satellites Intelsat (Intelsat VI et VII) ne sont plus très éloignées de celles des satellites régionaux (ex : Eutelsat 2) et nationaux (ex : Telecom 2).

2.3. Bref aperçu sur les perspectives d'évolution future

2.3.1. Généralités

L'évolution des télécommunications par satellites continuera à se dérouler dans le cadre de l'évolution et de l'expansion de l'ensemble des télécommunications, qui, comme déjà indiqué, va de pair dans les pays industrialisés avec la ré-orientation de l'économie vers les services de l'information, et dans les pays en voie de développement, avec les progrès de l'industrialisation. Toutefois, on doit dès à présent noter dans certains de ces derniers (Asie du Sud-Est) une expansion surprenante des services TV et des VSAT.

Dans ce cadre, cette évolution sera certainement influencée par divers facteurs, comme :

- les progrès de la dérégulation, qui partout dans le monde, affecte à des degrés variables systèmes domestiques et régionaux, et même Intelsat,
- la rapidité d'expansion des réseaux en fibres optiques, des FH numériques, des réseaux câblés de TV qui tendront à diversifier leurs services (ex : développement du RNIS),
- les conditions d'amortissement des investissements dans les technologies utilisées.
- les problèmes de coordination.

2.3.2. Masse et puissance à bord des satellites.

La durée de vie des satellites, qui généralement atteint déjà 10 ans, sera vraisemblablement allongée jusqu'à 12 ou même 15 ans, contribuant à accroître les masses en Orbite de Transfert (G.T.O.). L'orientation vers les usagers d'une part croissante des services ne fera que s'accroître, surtout dans les systèmes régionaux et domestiques, conduisant à des stations toujours plus nombreuses, plus simples et moins chères (pour un service donné), respectant toutefois le diamètre d'antenne minimum imposé par les niveaux d'interférences. On disposera en contrepartie de satellites plus puissants, plus complexes et donc plus lourds, assurant des PIRE sensiblement égales aux valeurs maxima autorisées dans le Service Fixe. L'amélioration continue de performance des lanceurs permet de réaliser les accroissements nécessaires de la masse des satellites ; on peut ainsi estimer qu'environ 2/3 des satellites commandés au cours de la période 1991 - 2002 auront une masse en G.T.O. supérieure à 1.800 kg. Toutefois, (sauf peut-être dans le cas particulier d'Intelsat) l'accroissement de cette masse pourrait trouver une limite quelque part entre 3.500 et environ 4.000 kg pour tenir compte de considérations pratiques (fiabilité/souplesse d'exploitation, etc...) Différents lanceurs (ex : Ariane 4, et plus tard Ariane 5) sont parfaitement adaptés à la mise sur orbite de ces satellites lourds, comme des satellites plus légers (généralement en lancements doubles quand il s'agit d'Ariane).

2.3.3 Fréquences - Coordination

La réduction des séparations orbitales entre satellites utilisant les mêmes fréquences est inévitable avec l'augmentation du nombre des satellites. Mais cette réduction a évidemment des limites qui sont déjà souvent atteintes ou proches de l'être ; elles dépendent de la séparation géographique entre zones à couvrir et des performances des antennes. La ressource limitée de positions orbitales et de bandes de fréquences, et les difficultés de coordination (entre satellites) qui en résultent constitueront un facteur majeur dans le développement des télécommunications par satellites .

Afin de remédier à cette situation, on va sans doute assister :

- à une utilisation accrue de la bande Ku et sans doute à une expansion (assez limitée) de la bande Ka (30 - 20 GHz),
- à une multiplication des faisceaux fins, permettant de réutiliser les mêmes bandes de fréquences,
- à l'utilisation de techniques de transmission plus efficaces sur le plan de l'occupation du spectre de fréquences,
- à l'exigence d'antennes plus performantes,
- à plus long terme, à la mise en oeuvre, pour certains services, de satellites sur orbites elliptiques très inclinées.

2.3.4. Services

L'évolution future des services est basée sur les avantages résultant de la capacité de diffusion des satellites, et va dans le sens de l'orientation d'une part toujours croissante des systèmes vers les usagers.

a) Services de TV et de Radio - Service Fixe et Service Radiodiffusion

Les services de TV et de Radio (diffusion/distribution, Satellite News Gathering, échanges de programmes, etc...) occupent plus de 70 % du nombre total des transpondeurs en service aux USA comme en Europe, et cette proportion ne cesse de croître. On ne voit pas de raisons pour qu'elle diminue dans un avenir prévisible. Dans les pays en voie de développement, elle est évidemment sensiblement plus faible, mais elle y augmente parfois assez rapidement comme c'est en ce moment le cas en Indonésie/Thaïlande. Les services dans le domaine de la Télévision dont l'expansion semble actuellement particulièrement rapide sont ceux des reportages (Satellite News Gathering ou SNG)

Si les services de distribution et de reportage devaient être assurés, et le sont généralement dans le cadre du Service Fixe par Satellite (FSS), les services de diffusion (DBS) devaient l'être dans celui du Service Radiodiffusion par Satellite (BSS) en accord avec le Plan défini à cet effet en 1977 par la Conférence Administrative Mondiale des Radio Communications (CAMR). Tel a bien été le cas avec les satellites TDF1 et TVSat. Toutefois, les progrès importants réalisés depuis 1977 dans la technologie des récepteurs permettent d'obtenir, avec des antennes au sol de petites dimensions (ex : 60 à 90 cm), des images de qualité satisfaisante, diffusées par des satellites du Service Fixe qui utilisent des fréquences légèrement différentes mais rayonnent des puissances sensiblement plus faibles que celles prévues au Plan ; c'est le cas avec Eutelsat, Telecom et Astra. D'autre part, la limitation à 5 par pays du nombre de programmes, imposée par le Plan, constitue un handicap certain par rapport à l'absence de limitation dans le Service Fixe (ex : 32 programmes diffusés sur une même position orbitale par les satellites ASTRA). En conséquence, les différences pratiques (pour les usagers) entre les 2 types de diffusion s'estompent ; elles tendront pratiquement à disparaître, sinon à se limiter aux fréquences et à la polarisation. L'introduction future de la TVHD ne devrait pas sensiblement modifier cet état de choses. Il faut toutefois remarquer que s'il n'y a pas de coordination à faire quand on reste dans le cadre du Plan, celle-ci s'impose dans le Service Fixe.

Une révision du Plan de 1977 est envisagée, et le projet Europesat pourrait, s'il était réalisé, constituer un premier pas dans cette direction. On peut en effet se demander s'il sera possible de conserver, dans des conditions de pénurie croissante de fréquences, une large bande (800 ou 500 MHz suivant la Région considérée) très peu occupée.

b) Services utilisant des VSAT (Very Small Aperture Terminals)

Les réseaux autonomes d'utilisateurs utilisant des très petites stations installées chez eux (avec transmissions dans un seul sens, comme dans le cas d'une diffusion de données, ou dans les deux sens) occuperont une part croissante de la capacité des satellites. Les services assurés sont très variés : diffusion et collecte de données, réservation de chambres et de moyens de transport, gestion d'entreprises (banques, assurances, etc...), avec parfois téléphonie. L'expansion de ces réseaux est très rapide, ils vont à la fois beaucoup se diversifier et élargir leurs possibilités en assurant des services tels que les vidéo-conférences, en utilisant des porteuses 2 Mbit/s, etc... On utilisera dans ces réseaux VSAT plusieurs types d'architecture (ex : réseaux en étoile et à l'avenir également réseaux maillés) et la part des logiciels (software) deviendra de plus en plus fondamentale dans leur définition et leur exploitation .

c) Services conventionnels (ex : téléphonie)

Les services de ce type garderont une place importante, notamment dans le système Intelsat (utilisant essentiellement des porteuses numériques), et dans des pays en voie de développement ne disposant pas d'une infrastructure suffisante des transmissions terrestres. Ils seront partout utilisés pour assurer des liaisons de faible capacité avec des sites isolés ou périphériques, les communications rurales, les liaisons d'appoint, d'urgence et de secours de toutes natures, etc...

- d) Services mobiles - Satellites géostationnaires,
 - Satellites sur orbites elliptiques inclinées, et sur orbites basses.

L'organisation internationale INMARSAT assure à l'échelle mondiale les communications avec les mobiles maritimes (phonie et données) et souhaite élargir son domaine aux mobiles aéronautiques et terrestres. On constate, par ailleurs, l'émergence de systèmes domestiques de communications avec les mobiles terrestres (Australie, USA, Canada, Mexique).

On assistera certainement à une forte expansion de l'ensemble de ces services qui comprennent essentiellement de la phonie et/ou des messages, ainsi qu'à un développement parallèle des services de localisation des mobiles (ex : Qualcomm, Alcatel-Qualcom, Euteltrack). L'introduction de transmissions de TV (comprimée) aux mobiles maritimes peut être envisagée. L'ensemble de ces services est basé sur l'utilisation de satellites géostationnaires. On peut signaler l'importance des études d'avant-garde menées par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) dans tout le domaine des communications avec les mobiles. Quelques problèmes réglementaires (ex : allocation des fréquences) et administratifs restent à résoudre ; quels organismes seront chargés de l'exploitation et de la gestion de certains services, notamment des liaisons avec les mobiles aéronautiques et terrestres ?

L'utilisation de satellites sur orbites elliptiques très inclinées, du type de Molnya en URSS, a fait l'objet de nombreuses études, particulièrement en Europe (CNES, ESA, Bundespost, industriels). Ces satellites essentiellement destinés aux communications avec les mobiles pourraient d'ailleurs intéresser aussi le Service Fixe. Ils présentent en effet des avantages significatifs, surtout dans les régions nordiques, et posent beaucoup moins de problèmes pour la coordination. Il est néanmoins probable que l'introduction de ce type de satellites ne se fera que dans le courant de la décennie prochaine.

L'introduction pour les liaisons avec et entre les mobiles ("communications personnelles") de satellites sur orbites circulaires basses est envisagée aux USA , avec, entre autres, le projet Iridium de Motorola et Lockheed auxquels s'est récemment joint British Aerospace, le projet ORBCOM de Orbital Science Co, les projets Odyssey

de TRW et Globalstar de LORAL, etc.... La mise en service de Iridium (77 satellites sur 7 orbites polaires circulaires) est annoncée pour 1994, mais on en est au stade de la prédéfinition, de nombreux problèmes restant à résoudre (ex : allocation des fréquences, gestion du système, liaisons entre satellites, etc...) et l'importance du marché est incertaine ; on peut donc s'attendre pour le moins à un glissement du calendrier. Le projet ORBCOM semble plus simple, avec 24 satellites plus légers, mais la société n'a pas l'envergure de Motorola, et les problèmes de base restent les mêmes.

Si toutefois l'un de ces projets devait effectivement voir le jour, et que la viabilité du système était démontrée, les technologies utilisées seraient évidemment surtout américaines.

e) Services nouveaux

On peut s'attendre à la mise en œuvre, au cours de la période considérée, de services de diffusion directe (par satellites géostationnaires) de Radio numérique dans une bande de fréquences qui sera allouée par la prochaine CAMR de 1992 ; il s'agira sans doute de la bande L, entre 1 et 1,5 GHz. Diverses études sont en cours dans ce domaine en Europe, et plusieurs projets sont élaborés aux USA.

Un développement des services de "paging" est également probable.

2.4. Cas particulier d'Intelsat

L'organisation INTELSAT a été créée en 1964 avec pour mission d'assurer des télécommunications intercontinentales / internationales à l'échelle mondiale, dans des conditions d'égalité d'accès et de prix pour tous les utilisateurs ; on lui a attribué le monopole de ces services.

Le premier satellite géostationnaire de télécommunications (commercial) INTELSAT 1 a été mis en service en 1965. Depuis, les performances des satellites INTELSAT, leur capacité de transmissions, leur masse, leur puissance à bord ont augmenté sensiblement d'une génération à la suivante ; les satellites INTELSAT VI (lancés à partir de 1989) et INTELSAT VII (qui seront lancés à partir de 1993) sont les satellites commerciaux les

plus lourds et les plus complexes à ce jour. Il faut noter que tous les satellites INTELSAT ont jusqu'à présent été confiés à des maîtres d'oeuvre américains, qui devaient soustraire une fraction significative des équipements en Europe, au Canada et au Japon.

INTELSAT assure avant tout les liaisons entre stations terriennes nationales de différents pays, ayant accès ("gate") à leurs réseaux terrestres respectifs ; ces derniers acheminent le trafic vers les usagers . Dans le but d'étendre ses activités, INTELSAT mettait très tôt une fraction de ses transpondeurs (par location ou vente) à la disposition des nombreux pays désirant se doter de services de télécommunications par satellites.

Actuellement, après l'adhésion récente de l'URSS, INTELSAT compte 121 pays membres représentés généralement par leur administration des télécommunications. Avec ses 15 satellites répartis sur les 3 régions de l'Atlantique, de l'Océan Indien et du Pacifique, c'est le plus important opérateur de télécommunications par satellites.

Bien que faisant preuve d'une prudence indispensable chez un opérateur de cette envergure, INTELSAT a été pendant longtemps à la pointe du progrès dans l'ensemble des technologies de satellites, particulièrement dans les antennes, les commutations à bord, les techniques d'accès multiple et de modulation ; des sommes importantes étaient consacrées (et dans une certaine mesure le sont toujours) aux programmes de recherche et de développement.

Une des causes de la complexité de ses satellites réside sans doute dans la nature, dans les objectifs et dans le succès même d'INTELSAT. Chaque satellite assure en bande C une couverture dite "globale" (environ 1/3 de la surface du globe), et des couvertures hémisphériques et zonales, avec multiples réutilisations des mêmes bandes de fréquences par découplage des polarisations et /ou des faisceaux, et en bande Ku (introduite avec INTELSAT V) des couvertures par faisceaux ("spots") orientables ; il y a aussi interconnectivité entre les bandes C et Ku. Par ailleurs, malgré des différences importantes entre les 3 Régions, dans le volume et dans la distribution du trafic, tous les satellites d'une même génération sont identiques.

L'émergence de nombreux satellites régionaux et nationaux de plus en plus puissants, l'expansion rapide des câbles sous-marins, les entorses croissantes portées à son

monopole par des satellites transocéaniques privés (Panamsat, Columbia et peut-être Orion) ont progressivement amené INTELSAT à promouvoir des nouveaux services, orientés davantage vers les usagers, et permettant donc l'utilisation d'antennes plus petites (services TV, IBS, VISTA, Telenet). En conséquence, les puissances rayonnées (P.I.R.E) ont, dans certaines régions, été accrues, tant en bande C qu'en bande Ku ; celles assurées par INTELSAT VI et INTELSAT VII ne sont parfois plus très éloignées de celles de satellites régionaux et nationaux.

Le taux de croissance du trafic dans la région Atlantique a conduit INTELSAT à se procurer un satellite Satcom K chez General Electric, qui sera co-positionné avec l'un de ses satellites et assurera le complément de trafic indispensable en bande Ku ; cela pourrait constituer l'amorce d'une utilisation plus générale de plusieurs satellites moins lourds et plus simples sur une même position orbitale, à la place d'un satellite unique de plus en plus lourd et complexe. S'il devait en être ainsi, ce qui est toutefois loin d'être certain, la structure actuelle des contrats des satellites INTELSAT et de leur répartition industrielle, pourrait être fortement affectée.

Si le rôle exceptionnel d'INTELSAT dans les télécommunications par satellites reste parfaitement assuré dans l'avenir, il pourrait, par suite du développement de multiples systèmes concurrents et de l'extension de la dérégulation, être quelque peu moins brillant que par le passé.

On peut ainsi noter que les revenus d'INTELSAT ont baissé pour la première fois en 1990 (revenus en 1989 = 614 M \$ US, revenus en 1990 = 498,6 M \$ US). Il est vrai que cette diminution reflète en réalité divers aménagements et réductions de prix, notamment pour des engagements à long terme, et ne résulte pas d'une décroissance du trafic ; néanmoins, ces réductions de prix sont sans doute, en partie au moins, imposées par l'accroissement de la concurrence. L'augmentation continue du trafic, notamment dans les services TV et dans les nouveaux services devrait se traduire par une reprise de la croissance de ces revenus que pour 1991 on escompte à 570 M \$ US.

Par ailleurs, on examine les possibilités et les conditions d'une privatisation partielle d'INTELSAT.

3. EVOLUTION DES TECHNOLOGIES ET DES TECHNIQUES DE TRANSMISSION

3.1. Evolution des technologies

L'évolution des systèmes de télécommunications par satellites et des services qu'ils assurent (voir II) est conditionnée par les progrès des technologies spatiales. Nous passeront brièvement en revue quelques unes des technologies impliquées.

3.1.1 L'allongement de la durée de vie des satellites nécessite évidemment des quantités plus importantes d'ergol ; mais il exige également l'emploi de composants conservant leurs caractéristiques pendant des périodes plus longues et une organisation plus performante des redondances, qui augmentera la masse sèche. Afin de réserver à la charge utile une part croissante de cette masse, on s'efforcera de l'économiser au maximum dans les sous-systèmes de la plateforme.

- le rendement des cellules solaires, qui fournissent l'énergie au satellite, est constamment amélioré ; seules des cellules au Silicium sont actuellement utilisées. On cherche aussi à bénéficier de la réflexion des rayons du soleil sur la face avant du substrat supportant ces cellules, et même du rayonnement arrière provenant du globe terrestre.

Par ailleurs, de nombreux travaux de développement sont effectués sur des cellules à l'Arseniure de Gallium (Ga As) dont l'utilisation conduit encore à une masse plus élevée, mais dont le rendement est supérieur à celui des cellules au Silicium et qui restent plus stables dans le temps, car moins affectées par les conditions de l'environnement spatial.

En Europe, c'est la société allemande Telefunken S.T. (filiale de Deutsche Aerospace) qui est la plus avancée dans ce domaine, qui fait également l'objet de recherches poussées aux USA et au Japon.

- Les batteries sont indispensables pendant la phase de mise à poste du satellite et au cours des périodes d'éclipse. Leur masse est relativement importante et elle dépasse souvent celle des générateurs solaires.

On remplace de plus en plus les batteries au Cadmium/Nickel par des batteries au Nickel/Hydrogène, qui permettent des profondeurs de décharge sensiblement plus importantes et une économie de masse appréciable.

Des travaux sont en cours aux USA (NASA, US Air Force Labs, Hughes, LORAL...) ainsi qu'en Europe (ESA), et sans doute au Japon, pour obtenir des batteries plus performantes dans l'ensemble : énergie massique (watt/heures/kg), profondeurs de décharge, durée de vie (nombre de cycles), fiabilité, coût. On peut citer les batteries au Silicium/Soufre, au Lithium/Oxyde de Nickel ou de Cobalt, au Lithium/Oxyde à électrolyte solide, etc...

Il est possible que l'un au moins de ces types de batteries commence à être utilisé dans les satellites géostationnaires au cours de la période que nous considérons.

- La propulsion de type conventionnel (chimique) est constamment améliorée, mais la propulsion électrique devrait, au moins pour certains types de satellites, permettre une réduction appréciable de la masse d'ergol à embarquer. En effet, des quantités importantes d'ergol sont consommées pour le maintien à poste des satellites (essentiellement sur l'axe nord-sud).

Il y a plusieurs types de propulsion électrique, qui ne présentent pas tous le même degré d'intérêt pour les satellites géostationnaires.

- . La propulsion de type électrothermique est déjà utilisée dans certains satellites américains de télécommunications; comparée à la propulsion conventionnelle avec monopropellant, elle permet une économie de 5 à 10% de la masse du satellite en début de vie, mais elle est à peu près équivalente à la propulsion conventionnelle avec bipropellant, généralement utilisée dans les satellites européens.

- . La propulsion électrique de type électro-statique, ou propulsion ionique (utilisant du Xénon), devrait procurer des économies de 10 à 15% sur la masse du satellite en début de vie, quand il s'agit de satellites lourds d'une durée de vie de 10 ans ou davantage ; mais elle allonge sensiblement la durée des manoeuvres pour le maintien à poste. Les recherches et le développement dans ce domaine se poursuivent aux USA (Hughes, Culham Labs), en Europe (ESA et MBB/Dornier) et au Japon (Mitsubishi) : le satellite technologique japonais ETS VI, qui doit être lancé en 1993/94 utilisera la propulsion ionique, de même que le satellite PSDE/Sat 2 de l'ESA. Ce type de propulsion pourrait être utilisé sur certains satellites géostationnaires opérationnels dans le courant de la période que nous considérons. Toutefois, la propulsion ionique exige une restructuration relativement profonde et coûteuse de l'ensemble du satellite et elle pourrait être concurrencée par certains types de propulsion électro-thermique.
- . La propulsion de type électro-magnétique ne s'appliquera que sur des sondes spatiales.

3.1.2 L'utilisation de l'intelligence à bord des satellites permet d'assurer une part importante et fine de gestion autonome, sans intervention du sol. Rendue indispensable par l'augmentation continue de la complexité des satellites, elle prendra dans l'avenir une importance croissante. Bien évidemment, un contrôle à partir du sol subsistera, mais les ordres envoyés au satellite seront plus limités et plus espacés ; à tout instant, en cas de nécessité, la station terrienne de contrôle prendrait le commandement.

Cette intelligence n'a pu être introduite qu'une fois acquise la bonne tenue dans le temps et l'environnement spatial des microprocesseurs qui en constituent la base. Cette bonne tenue a été obtenue, grâce notamment à des durcissements poussés. On trouve actuellement de l'intelligence, à un stade plus ou moins étendu, à bord de tous les satellites de télécommunications, suivant des architectures soit centralisées, soit réparties. La quasi totalité des microprocesseurs utilisés est actuellement d'origine américaine ; mais, dans l'avenir, des sociétés européennes, notamment françaises, devraient être en mesure de les réaliser.

3.1.3 Une flexibilité opérationnelle accrue devient nécessaire pour adapter constamment les satellites à l'évolution journalière, hebdomadaire, annuelle du trafic et des services, tout au long de leur vie, surtout quand celle-ci s'allonge. Cette flexibilité exige des fréquents changements d'affectation des transpondeurs (parfois mis en oeuvre par de véritables matrices de commutations) et souvent une sophistication croissante des antennes. Cette sophistication peut consister dans l'utilisation de plusieurs bandes de fréquences, de polarisations croisées, de faisceaux multiples et parfois orientables, et dans des possibilités de reconfiguration des zones de couverture. Elle intéresse particulièrement les satellites couvrant de larges superficies (ex : Intelsat, Inmarsat, Eutelsat, des satellites américains, etc...). Compte tenu notamment des problèmes de coordination, certaines caractéristiques des antennes sont de plus en plus poussées (lobes secondaires, pureté de polarisation, faisceaux multiples, couverture plus efficace des régions servies et réduction des débordements, pointages fins, etc...). L'avance américaine dans ce domaine tend à se réduire, l'industrie européenne, et plus particulièrement française, ayant fait des progrès importants au cours de ces dernières années.

L'utilisation d'antennes rayonnantes (dites "actives") permet de supprimer les amplificateurs de forte puissance, de faciliter la reconfiguration du diagramme de rayonnement et des zones de couverture, et d'éliminer des brouilleurs. Elle présente un intérêt certain pour des satellites militaires. Pour des satellites de type commercial, cet intérêt (masse, volume, coût) reste encore très incertain ; il est peu probable que ce type d'antennes soit utilisé sur ces satellites dans la période que nous considérons.

3.1.4 L'accroissement de la masse des satellites et de la puissance à bord, permet de multiplier le nombre de transpondeurs et de porter la puissance de leurs amplificateurs de sortie à un niveau compatible avec l'évolution vers les usagers des systèmes de télécommunications par satellite. Ces amplificateurs consomment généralement plus de 70% de la puissance totale utilisée à bord du satellite et leur masse représente une part significative de celle de la charge utile. Les efforts portent donc sur l'amélioration des rendements, la réduction des masses, l'amélioration de la fiabilité et l'accroissement des durées de vie.

Les amplificateurs à état solide (transistors), pratiquement les seuls à être utilisés en bande C (4 GHz) ont ainsi vu leur rendement passer en quelques années de 25% à plus de 35%, et leur puissance de 10 à 30 watts ; ces progrès se poursuivront dans l'avenir.

Les amplificateurs à Tubes à Onde Progressive (ATOP), les seuls utilisés (jusqu'à présent) dans la bande Ku (11 et 12 GHz) ont vu leur niveau de puissance croître jusqu'à 250 watt (TDF1/FVSAT). Leur rendement s'est sensiblement amélioré dépassant parfois 50% et devrait à l'avenir atteindre 55% pour des puissances supérieures à 100 watt. La masse des tubes a pu être sensiblement réduite et maintenant on cherche surtout à améliorer certaines de leurs caractéristiques (ex : linéarité). Si, par suite notamment des problèmes rencontrés sur les technologies utilisées dans les amplificateurs 250 watt de TDF1, on semble limiter leur puissance à 120/150 watts, il est vraisemblable que cette limite sera franchie à l'avenir.

Il faut signaler les efforts entrepris, essentiellement au Japon, pour réaliser des amplificateurs à l'état solide également dans la bande Ku ; des amplificateurs de ce type verront très probablement le jour, mais ils devraient ne délivrer que des puissances relativement limitées (peut-être tout de même quelques dizaines de watts)

Si la quasi totalité des composants de base qui constituent les amplificateurs à état solide est d'origine japonaise, l'industrie européenne est très bien représentée dans les A.T.O.P. (Thomson en France et AEG en RFA). Toutefois, on ne fabrique pas en France les alimentations nécessaires à ces T.O.P. pour constituer des amplificateurs.

3.2. Evolution des techniques de transmission

L'évolution en cours se poursuivra sous les influences conjuguées de celle des télécommunications terrestres, des difficultés croissantes de coordination dues à l'insuffisance des bandes de fréquences (voir 2.3.3) , de l'extension de la dérégulation et de considérations économiques.

3.2.1 La numérisation des transmissions sera accélérée dans la quasi totalité des services et elle affectera même celui de la distribution/diffusion de la Télévision. Elle est rendue possible, et particulièrement intéressante, grâce aux progrès de la technologie des circuits à haut niveau d'intégration.

Contrairement à ce que l'on escomptait il y a quelques années, cette numérisation dans les services de téléphonie se fera surtout dans le mode d'accès multiple à répartition en fréquence (AMRF) déjà utilisé dans les transmissions analogiques, et non dans celui à répartition dans le temps (AMRT) ; cette technique, basée sur l'emploi de porteuses numériques de débits donnés (dites IDR : Intermediate Data Rate) réparties en fréquences, est déjà utilisée sur Telecom 1 pour les liaisons avec les DOM/TOM.

Le cas d'Intelsat est intéressant à ce sujet : en 1989, environ 75% de l'ensemble de son trafic autre que la Télévision était assuré par des transmissions analogiques, les 25% restant utilisant des SCPC (porteuses d'une seule voie téléphonique : Single Carrier Per Channel) des IDR et l'AMRT. On prévoit que vers l'an 2 000, moins de 25% de ce trafic sera encore assuré par des transmissions analogiques, 60% le sera par des IDR et le reste utilisera l'AMRT et les SCPC.

3.2.2. Des techniques de modulation et de codage plus sophistiquées permettront d'améliorer l'efficacité spectrale des transmissions numériques (davantage de circuits transmis dans une bande de fréquence donnée).

- Le débit binaire d'une voie téléphonique de qualité sera ramené de 64 à 32 Kbit/s , (ce qui parfois est déjà fait), puis à 16 Kbit/s.
- Les techniques de concentration numérique de la parole seront plus poussées et leur utilisation se généralisera. Elles sont en grande partie à la base du succès des IDR car elles permettent de multiplier de manière significative le nombre de circuits transmis sur une porteuse donnée ; ainsi on multiplie environ par 5 celui des circuits transmis sur une porteuse à 2 Mbit/s (soit 150 - 180 circuits).

- L'utilisation des vocoders (4,8 et à 2,4 Kbit/s) va se répandre dans certains services, notamment les communications avec les mobiles.
- Le débit binaire des porteuses numériques de télévision dans les vidéoconférences, la télé-éducation etc..., sera fortement réduit. De 8 Mbit/s pour les vidéoconférences, il est descendu à 2 Mbit/s, puis à 760 Kbit/s et dans l'avenir, on utilisera souvent 380 Kbit/s et parfois 116 Kbit/s et même moins.
- Des codages très sophistiqués avec très forte compression du débit permettront l'utilisation de la télévision numérique pour la distribution d'abord, la diffusion ensuite, assurant ainsi la transmission de plusieurs programmes dans un même transpondeur. Des projets de ce type sont en cours de préparation avancée aux USA, et devraient être opérationnels vers 1994. Ils constituent une première étape vers la TVHD numérique.

3.2.3 On assistera à une forte expansion des techniques d'accès multiple à répartition par code (AMRC) qui présentent l'avantage d'être nettement plus résistantes aux interférences. Ces techniques seront de plus en plus utilisées, particulièrement dans les réseaux desservant de nombreuses petites stations, comme ceux des communications avec les mobiles et des VSAT.

3.2.4 *Introduction de nouvelles techniques de transmission*

- Les techniques utilisant la démodulation avec traitement des signaux à bord présentent pour certains services, comme celui de la téléphonie, des avantages intéressants : elles permettent notamment d'assurer une adaptation en temps réel aux fluctuations du trafic. Elles sont déjà utilisées sur le satellite préopérationnel Italsat, et elles le seront sous forme plus poussée sur le satellite technologique ACTS de la NASA, dont le lancement, après de nombreuses péripéties, vient encore d'être repoussé à 1993 : on peut remarquer, par ailleurs, que ces 2 satellites fonctionnent dans la bande de fréquence Ka (30/20 GHz) très peu utilisée jusqu'à présent.

L'introduction de ces techniques qui ont fait l'objet de nombreux travaux à l'ESA, a pendant longtemps été considérée comme inéluctable et de grande portée. L'évolution des télécommunications par satellites vers les services de diffusion a sensiblement réduit leur intérêt et sans doute retardé cette introduction. Leur utilisation restera sans doute très limitée au cours de la période considérée dans cette étude.

- Les liaisons intersatellites, en micro-ondes et en optique, font l'objet d'études et de développement depuis plusieurs années, notamment à l'ESA.

Elles présentent un intérêt certain quand il s'agit de satellites situés sur des orbites différentes ; elles permettent en effet à des satellites en orbite basse (dits satellites à défilement) de communiquer en quasi permanence leurs données à des satellites géostationnaires relais qui les retransmettent en temps réel à la station terrienne de contrôle. Elles sont déjà utilisées pour relier les satellites géostationnaires TDRS de la NASA à des satellites sur orbite basse (ex : navette spatiale). Elles relieront de même les futurs satellites géostationnaires européens DRS à des satellites européens d'observation sur orbite basse (SPOT, Hermès). Des programmes de Recherche et Développement. (R & D) à l'ESA donneront lieu à des expérimentations préalables. La NASA effectue des études de même nature au Japon .

On ne distingue pas encore bien les avantages que présenteraient les liaisons entre des satellites de télécommunications géostationnaires, du moins tant qu'ils ne disposent pas de démodulation à bord. On peut, dans ces conditions, estimer qu'elles ne seront que peu utilisées au cours de la période considérée dans cette étude

Par contre, comme indiqué précédemment, (voir 2.3.4 (d)), elles seraient évidemment indispensables pour relier entre eux les satellites en orbites basses dans des projets comme Iridium ou ORBCOM, si l'un de ces projets devait se concrétiser.

4. APPRECIATION DE LA COMPETITIVITE DES SYSTEMES FRANCAIS ET EUROPEENS

4.1. Introduction

Les critères de compétitivité sont nombreux et leur importance relative peut varier dans le temps et en fonction des régions considérées. Dans le domaine particulier des satellites, les aspects à caractère politique, les transferts de technologies, l'implantation locale peuvent parfois jouer un rôle déterminant ; néanmoins, les critères de prix, de délais, d'assistance à la mise en service et à l'exploitation, etc... restent généralement d'une manière ou d'une autre des critères prépondérants.

La compétitivité des systèmes français et européens ne peut s'apprécier qu'en constatant les quantités de satellites français et européens exportés.

Manifestement c'est l'industrie française qui occupe aujourd'hui la première place dans l'industrie européenne des satellites de télécommunications, avec Matra maître d'oeuvre des Telecom 1 et 2 et d'Hispasat , Aérospatiale maître d'oeuvre des Eutelsat 2 et de Turksat, (sans mentionner Tele X et TDF/TVSat).

Mais quelles sont les exportations françaises et européennes hors d'Europe ?

Elles sont fort peu nombreuses :

- | | |
|-----------------------------|--|
| - ARABSAT 1 (il y a 10 ans) | Maître d'oeuvre Aérospatiale (60 % des fournitures étant américaines) |
| - INMARSAT 2 en 1986 | Maître d'oeuvre British Aerospace (50 % des fournitures : Hughes A.C.) |

Sans doute il y aura bientôt Arabsat 2 et Irsat (Zhoreh), les constructeurs américains n'ayant pas soumissionné. C'est le cas typique de critères politiques.

Par contre, dans les rares cas en Europe où la concurrence est admise, ce sont des satellites américains qui sont choisis (ex. Astra, BSB). C'est une situation très différente de celle d'Arianespace dont la plus grande partie des lanceurs est utilisée par des satellites non européens.

Quelles sont les raisons de cette compétitivité insuffisante des industries françaises et européennes dans le domaine des satellites de télécommunications ? Les paragraphes qui suivent pourraient apporter quelques lumières à ce sujet.

4.2. Aperçu sur le marché mondial des satellites de télécommunications (non militaires)

Les études que nous avons menées sur les perspectives du marché mondial (hors URSS) des satellites géostationnaires, consistant presque entièrement en satellites, de télécommunications de toute nature (Service Fixe, Service Radiodiffusion, Service Mobile) couvrent une période de 12 ans, soit de 1991 à 2002.

Leurs principales conclusions réactualisées sont brièvement résumées ci-après :

- a) On peut estimer à 197 (soit, environ 200) le nombre total de satellites qui seront commandés dans le monde au cours de cette période. Ceci représente une moyenne de 16,4 satellites commandés par an, correspondant à environ 1,3 milliards de US \$; le marché des satellites, le seul considéré ici, est donc relativement modeste. Viendront toutefois s'y ajouter, dans le segment spatial, celui des lanceurs (du même ordre), celui des assurances (environ 15 % de l'ensemble des deux précédents) et celui des stations de contrôle des satellites, et dans le secteur terrien les marchés en expansion des stations terriennes et surtout des services, qui deviennent prépondérants.
- b) En fonction des régions ou des entités qui les commandent et auxquelles ils sont destinés, on estime que les satellites commandés se répartissent comme suit :

- pour les U.S.A. : 63, soit 32 % du total
- pour l'Europe : 45, soit 22,8 % du total
- pour Intelsat /Inmarsat : 20, soit 10,2 % du total
- pour le reste du monde : 69, soit 35% du total.

Cette répartition suivant les quantités de satellites ne représente pas exactement celle du marché financier correspondant. En effet, les satellites commandés aux U.S.A., en Europe et à Intelsat (surtout aux USA et à Intelsat) seront en moyenne plus lourds, donc plus chers que ceux commandés dans le reste du monde.

Cette estimation du marché financier est présentée ci-après :

- pour les U.S.A 34,5 % du marché total
- pour l'Europe 22,9 % du marché total
- pour Intelsat/Inmarsat 11,5 % du marché total
- pour le reste du monde 31,1 % du marché total

Remarque : Dans cette estimation, nous avons fixé un même prix pour tous les satellites d'une même catégorie : celui du marché international, ouvert à la concurrence. Le prix des satellites européens qui, dans l'ensemble ne sont pas ouverts à la concurrence, est en réalité généralement un peu plus élevé.

c) En fonction de leurs fournisseurs, on estime que le marché mondial correspondant à ces satellites se répartit comme suit :

- fournisseurs U.S. 60 % du marché total
- fournisseurs européens 31 % du marché total
- fournisseurs dans le reste du monde 9 % du marché total

Remarques :

- Les fournisseurs (maîtres d'oeuvre) dans le reste du monde sont répartis dans les pays suivants : Canada, Chine, Inde, Israël, Japon. D'autres pays, comme sans doute la Corée, devront probablement y être ajoutés au cours de la prochaine décennie
- L'estimation ci-dessus est basée sur les montants attribués aux maîtres d'oeuvre (prime contractors) qui seuls peuvent être estimés avec une certaine précision. Ces maîtres d'oeuvre sous-traitant une partie plus ou moins grande des fournitures (les cas d'Intelsat et d'Inmarsat étant les plus évidents), elle ne reflète pas la répartition en équipements et services.
- Les contrats attribués récemment sur le marché international confirment que la part des fournisseurs US n'est pas surestimée.
- Une évaluation des parts respectives des fournisseurs américains montre que la part de Hughes A.C. sur le marché mondial représente à elle seule pas loin de 90 % de celle de l'ensemble des fournisseurs européens.

4.3. Les structures industrielles et opérationnelles en Europe sont-elles adaptées au marché ?

Les satellites de télécommunications (et même l'ensemble des satellites) ne représentent en Europe qu'une faible fraction des activités industrielles des entreprises qui en assurent habituellement la maîtrise d'oeuvre. Les structures industrielles ne peuvent donc être basées sur le seul critère de ces satellites, mais elles résultent surtout de considérations de politique et de productions industrielles qui échappent au cadre de cette étude.

Le problème devrait se poser dans des termes à peu près semblables aux USA mais la situation n'est pas la même pour des raisons diverses, dont les principales sont les dimensions du marché, la part qui en revient à chacun des industriels concernés et les proportions de la sous-traitance.

Quelques constatations simples s'imposent :

- a) Aux USA, deux maîtres d'oeuvre (Hughes A.C. et G.E. Astro Space) se partagent, d'après nos estimations, 86 % du marché domestique américain des satellites géostationnaires non militaires. Le reste de ce marché, réparti entre Loral et TRW, concerne essentiellement les satellites GOES (météorologie) et les satellites relais TDRS de la NASA

Il convient de souligner :

- que le marché domestique aux USA est supérieur d'environ 50 % à celui de l'Europe,
 - qu'un marché appréciable de satellites de télécommunications militaires vient s'y ajouter,
 - que la part que le maître d'oeuvre doit sous-traiter est relativement réduite, car il a des capacités de production propres dans la plupart des sous-systèmes des satellites,
 - que les 2 principaux constructeurs américains sont aussi des opérateurs et des exploitants, et que près de la moitié du marché intérieur américain est constitué de satellites commandés par leurs propres filiales à 100 % (ex. Galaxy de Hughes Communication Inc. et les Satcom de G.E. Americom) ; cet état de choses contribue évidemment à modifier toute la nature du marché,
 - que les constructeurs bénéficient souvent dans leurs approvisionnements de l'effet de série.
- b) Bien que le marché européen des satellites de télécommunications ne représente qu'environ 2/3 de celui des USA, le nombre de maîtres d'oeuvre, au moins jusqu'à très récemment, y a été nettement supérieur (Aérospatiale et Matra en France, British Aerospace et Marconi au Royaume Uni, Alenia (anciennement Selenia Spazio) en Italie, MBB en Allemagne.

Il convient par ailleurs de souligner :

- que le marché en Europe des satellites de télécommunications militaires est très limité,
- que les maîtres d'oeuvre doivent fréquemment sous-traiter une part significative des équipements, soit parce qu'ils ne sont pas en mesure de les réaliser, soit parce qu'ils sont liés à leur sujet par des accords.
- qu'à l'exception des très rares satellites privés (ex. Astra) seules les administrations sont propriétaires, opérateurs et exploitants des satellites, à l'exclusion des constructeurs.

On doit constater que l'industrie européenne des satellites de télécommunications est fragmentée et dispersée et qu'elle comporte beaucoup de redondances. Les motivations souvent nationalistes des pays composant l'Europe freinent sa restructuration et sa transformation en une industrie plus efficace.

Le manque fréquent de véritable concurrence entre industriels sur le marché européen ne peut aboutir qu'à exagérer les prix et contribuer ainsi à freiner cette restructuration. Mais le marché européen est-il actuellement suffisant pour accepter une telle concurrence ?

De toute façon, comme déjà indiqué plus haut, les satellites de télécommunications et leurs composants qui ne représentent qu'une fraction généralement faible de l'activité des industries aéro-spatiales, peuvent difficilement imposer une restructuration. Il n'en demeure pas moins qu'une plus grande concentration serait souhaitable, limitant si possible à 2, au maximum à 3 le nombre des maîtres d'oeuvre. Il semble bien qu'on se dirige effectivement dans ce sens, mais il est à craindre que ce soit plutôt par addition d'industries concernées que par concentration, la préférence étant alors donnée à des considérations de caractère politique aux dépens de celles d'efficacité.

Par ailleurs, il serait utile que les industriels puissent élargir leur domaine d'activité et couvrir, comme aux USA, les services d'exploitation ; mais ceci reste évidemment conditionné par une dérégulation des services de télécommunications en Europe, difficilement envisageable dans un avenir proche.

Les structures actuelles industrielles et opérationnelles ne paraissent donc pas particulièrement bien adaptées au marché international des satellites de télécommunications, en dépit du niveau généralement compétitif des technologies européennes. L'insuffisance (relative) du marché européen ne peut que contribuer à cet état de choses.

4.4 Bref aperçu sur les travaux de Recherche et Développement

D'importants programmes de R & D dans le domaine de l'espace sont menés aux USA, en Europe et au Japon. Seule une faible fraction de leur volume total, très appréciable néanmoins en valeur absolue, est consacrée aux satellites de télécommunications, avec des différences significatives entre travaux américains, européens et japonais sous plusieurs aspects : volumes respectifs des travaux, leur utilisation pratique, et le rôle de l'industrie.

4.4.1 Aux USA.

Après une période (fin des années 60 et une partie des années 70) au cours de laquelle la NASA jouait un rôle moteur dans le développement des satellites de télécommunications avec sa série de satellites technologiques ATS, elle a pratiquement cessé ses activités dans ce domaine, se contentant de faire construire par TRW les satellites relais TDRS, indispensables à l'utilisation de la navette spatiale. Elle les a modestement reprises vers le milieu des années 80 avec la réalisation (confiée à G.E. Astro Space) du satellite technologique ACTS, qui après de nombreuses controverses et interruptions devrait être lancé en 1993 (voir 3.2.4).

C'est le ministère de la défense (Department of Defense) qui fait effectuer le plus grand volume de R & D, principalement dans le cadre de ses programmes successifs de satellites militaires de télécommunications comme Leasat, DFS II et III, Milstar, UHF Follow-on. Certains des progrès technologiques réalisés à cette occasion peuvent être très

rapidement transférés et adaptés aux séries de satellites civils. Il faut d'ailleurs noter qu'on s'oriente, en liaison avec l'industrie, vers une utilisation plus poussée d'éléments communs aux deux types de satellites ; un bon exemple est celui de la plateforme HS 601 développée par Hughes sur fonds propres (~ 100 M\$ US), qui sera utilisée sur une dizaine de satellites UHF Follow-on de l'US Navy, et sur de nombreux satellites civils dont plus de 10 sont déjà en cours de réalisation.

On constate donc qu'une part importante des travaux de R&D est destinée à des applications pratiques à court terme (séries de satellites militaires) dont une proportion, sans doute croissante, peut être adaptée à des séries de satellites civils, d'autant mieux que les constructeurs sont en général les mêmes.

4.4.2. En Europe

Les travaux de R & D, destinés aux satellites de télécommunications, sont effectués essentiellement dans le cadre des programmes de l'Agence Spatiale Européenne, dont ils ne représentent qu'une fraction, et également dans ceux des agences spatiales nationales (ex : CNES) et de quelques administrations de télécommunications. La plus grande part de ces travaux est sous-traitée aux industries, à l'échelle européenne dans le cas de l'ESA, à l'échelle nationale dans le cas d'agences nationales. Il y a évidemment une coordination de l'ensemble des travaux. Par ailleurs, les contrats passés à l'industrie pour des satellites nationaux (ex : TDF1/TVSat, Telecom, Kopernikus, Italsat) comportent une part significative réservée au développement.

Les travaux R&D de l'ESA aboutissent à des satellites expérimentaux (ex : Olympus, pour lequel une plateforme particulière a été développée) à des charges utiles expérimentales à monter sur des satellites opérationnels, à des satellites technologiques comme les futurs Sat2 et AOTS dont le but est le développement d'une nouvelle plateforme, l'essai de liaisons intersatellites, de démodulation à bord, etc.... Les seuls satellites militaires réalisés à ce jour sont les quelques Skynet anglais, et les travaux R&D ont rarement pour objet des applications immédiates sur des séries de satellites civils. Toutefois, un cas récent à signaler est celui des antennes développées pour le compte de l'ESA, qui ont aussitôt été utilisées sur les satellites Eutelsat 2.

4.4.3. Au Japon.

La situation est un peu particulière : il n'y a pas du tout de marché militaire et on n'y a pas encore construit de séries de satellites de télécommunications. L'agence spatiale nationale NASDA dispose d'un budget relativement important dont seule une fraction est consacrée aux satellites de télécommunications. Elle a fait réaliser la série des satellites technologiques ETS dont le dernier ETS VI sera lancé en 1993/94 par la nouvelle fusée H2.

NHK, l'agence nationale de télédiffusion, commande aussi quelques travaux spécifiques de R & D à l'industrie, et c'est ce que faisait également, avant sa privatisation, l'opérateur national des télécommunications, NTT. L'industrie japonaise possède donc un bon niveau dans toutes les technologies impliquées. Les satellites pré-opérationnels CS (télécommunications) et BS (télédiffusion) ont, nominalement sous maîtrise d'oeuvre nationale, été réalisés aux USA, avec participation de l'industrie japonaise dans quelques sous-systèmes. Les satellites opérationnels mis en service après l'introduction de la dérégulation (JCSat, SCC) ont été commandés aux USA avec pour certains (ex. SCC) sous-traitance de quelques éléments au Japon.

4.5 Rôle de la dérégulation dans le développement et l'expansion des systèmes de télécommunications par satellites.

L'expansion des systèmes de télécommunications par satellites est fonction de nombreux paramètres (voir chapitre 1). La dérégulation est certainement l'un d'entre eux, bien qu'il ne soit pas facile d'isoler l'influence directe qu'elle exerce et la part effective qui lui revient dans cette expansion. On est plutôt amené à constater l'état des choses dans des régions soumises à des niveaux différents de dérégulation, et à en tirer quelques conclusions d'ordre général.

- a) La dérégulation est quasi totale aux USA ("open sky policy") tant dans le domaine du segment spatial que dans ceux du segment terrien et des services, les seules contraintes imposées par la Federal Communication Commission (FCC) étant d'ordre technique et financier. Cela contribue certainement au dynamisme qui se

manifeste dans l'ensemble du domaine des télécommunications par satellites, tant sur le plan quantitatif que sur celui des idées, des technologies et des services.

Certes, certains projets sont abandonnés en cours de route (ex. Federal Express), et toutes les idées et innovations, même poussées à un stade avancé, n'aboutissent pas (ex. Geostar, repris en France avec Locstar, pour être ensuite abandonné également) par suite de l'insuffisance du marché et/ou par la mise en oeuvre de technologies plus avantageuses (ex. Qualcomm, repris en Europe par Alcatel-Qualcom). Des projets en cours de développement comme celui de Hughes A.C. (ainsi que d'autres) prévoient d'utiliser un même transpondeur de 27 MHz pour transmettre, avec une bonne qualité d'image, plusieurs (de 3 à 10) programmes de télévision numérique ; ceci constitue par ailleurs un premier pas vers la TVHD qui, sans doute, ne deviendra effective que lorsqu'on disposera de nouveaux systèmes de visualisation à commande numérique, dont les écrans plats de grandes dimensions.

Plusieurs projets de satellites de diffusion Radio (son) sont en préparation, et le projet AMSC (American Mobile Satellite Corp) de satellites géostationnaires pour les communications avec les mobiles, essentiellement terrestres, est en cours de réalisation. Des projets de satellites en orbite basse pour communications avec les mobiles sont préparés, comme le projet Iridium de Motorola et Lockheed.

Dans un domaine relativement plus conventionnel, les nouveaux satellites hybrides d'ATT (Telstar 400) réalisés par G.E. Astro Space sont les plus lourds et les plus puissants en dehors d'Intelsat (masse au lancement 3.600 Kg, puissance à bord 6 Kw). Des réseaux privés à couverture globale en concurrence avec Intelsat, sont actuellement mis en place par Alpha Lyracom (Panamsat) et Columbia Com.

La dérégulation a également permis le développement et l'expansion rapide aux USA des réseaux autonomes d'usagers ("closed user groups") utilisant des VSAT. Ce développement a été favorisé par l'excès de capacité spatiale du début des années 80 et il a partiellement compensé le transfert des liaisons de point à point des satellites vers les câbles en fibres optiques. Une telle adaptation aux circonstances

montre le degré de souplesse dans le domaine de l'exploitation des satellites de télécommunications aux USA.

Des réseaux importants sont mis en oeuvre notamment par General Motors et par Chrysler, qui comptent respectivement 9.600 et 6.000 stations, par Holiday Inn qui en compte 2.000 etc.... On constate actuellement une rapide évolution des réseaux VSAT avec diversification et sophistication des services. C'est Hughes Network Systems, filiale de Hughes A.C. qui est de loin le n°1 mondial dans le domaine des VSAT, suivi du japonais NEC, de ATT-Tridom et de Scientific Atlanta.

L'expansion des réseaux VSAT a été remarquable et s'est étendue au monde entier : plus de 100.000 stations sont déjà en exploitation ou en cours de réalisation/installation, dont plus de 80 % aux USA.

- b) La dérégulation a été inaugurée au Japon dans le milieu des années 80 avec la privatisation de NTT (opérateur des télécommunications nationales). Elle est allée assez loin, et a entraîné l'émergence de 2 groupements privés qui se sont dotés de satellites, JCSat (30 % de participation de Hughes Comm. Inc.) et Superbird (SCC-Mitsubishi).

Si les 2 satellites JCSat sont opérationnels avec la quasi totalité de leurs transpondeurs utilisés (32 transpondeurs par satellite, en bande Ku), l'un des Superbird est tombé en panne et le second a été victime d'un échec au lancement ; mais ils devaient avoir autant de succès que les JCSat et sont en cours de remplacement. Satellite Japan Corp , NHK et NTT vont bientôt également se procurer des satellites. Ceux-ci seront sans doute en majorité commandés aux USA mais il n'est pas exclus que quelques uns le soient en Europe.

Il faut se rappeler à ce sujet que l'effort des industries japonaises a jusqu'à présent porté essentiellement sur les composants et équipements de base des principaux sous-systèmes dans certains desquels elles ont acquis un quasi monopole ; mais ces industries ne resteront sans doute pas toujours absentes du marché international des satellites. Simultanément, avec la véritable profusion des satellites, on constate un

rapide développement des réseaux VSAT et surtout de nombreux services de télévision.

- c) En Europe, l'accès à l'orbite géostationnaire et à la capacité de transmission des satellites reste strictement réglementée et elle est le monopole des administrations des télécommunications. Astra, qui appartient à la société privée SES, est un cas particulier, qui s'est d'ailleurs heurté à l'hostilité de plusieurs de ces administrations.

Le segment terrien est également régulé et du seul ressort des administrations. Mais cette situation se modifie déjà grâce notamment aux événements en Europe de l'Est et à la réunification de l'Allemagne. C'est dans ce pays que la libéralisation est maintenant la plus avancée, les réseaux privés d'utilisateurs (VSAT) étant autorisés, même quand ils assurent des services téléphoniques, quand ils impliquent l'ex-Allemagne de l'Est ; mais cette restriction ne saurait durer longtemps. Environ un millier de stations sont déjà installées ou en cours d'installation.

Une certaine libéralisation progresse aussi depuis quelques années déjà au Royaume Uni, et elle commence à se manifester en France : les choses vont sans doute évoluer avec l'installation prochaine du marché unique.

Néanmoins, dans les conditions actuelles, les réseaux privés d'utilisateurs ne se développent, en Europe, que très lentement ; il n'y a rien de comparable au dynamisme manifesté aux USA, à un degré moindre au Japon, et depuis peu, dans le Sud-Est asiatique. Certes, la géographie, la démographie, l'infrastructure des réseaux terrestres, les traditions, les conditions politiques en Europe sont-elles différentes de celles aux USA ce qui peut expliquer un développement plus lent du marché, notamment de certains services utilisant les satellites.

Néanmoins, si les recommandations du Livre Vert de la Commission Européenne de novembre 1990 (appuyées par Mr. Caruso, ancien Directeur Général d'Eutelsat) étaient suivies, au moins en partie, elles devraient permettre un développement plus

dynamique de l'ensemble du domaine des télécommunications par satellite et un accroissement appréciable du marché global européen.

d) Une expansion assez remarquable de l'ensemble des télécommunications par satellites se manifeste en Asie du Sud-Est surtout depuis l'apparition d'une dérégulation, d'abord timide mais qui tend à se développer, notamment dans les domaines de la TV et des réseaux VSAT. On constate ainsi un accroissement sensible du nombre de satellites :

- La société thaïlandaise Shinawatra Computer Co, titulaire d'une licence du gouvernement thaï vient de commander 2 satellites (relativement légers) à Hughes.
- L'Indonésie exploitant déjà 2 satellites (Palapa B), disposera d'un 3ème qui doit être lancé au printemps prochain. Les transpondeurs des 2 premiers satellites sont pratiquement tous occupés et un grand nombre de ceux du futur 3ème sont déjà retenus. L'Indonésie demandera sans doute une 4ème position orbitale.
- Le satellite privé Asiasat (de Hong-Kong) commence à être bien occupé et un second satellite en cours de définition, devrait être bientôt commandé.
- La société privée américaine Alpha Lyracon, qui possède déjà le satellite Panamsat sur l'Atlantique, concurrençant Intelsat, doit incessamment commander un satellite sur le Pacifique (cette commande vient effectivement d'être annoncée le 31/07/91).
- La société Columbia Com doit bientôt mettre en service la capacité en bande C qu'elle a louée sur le satellite TDRS Pacifique de la NASA.

L'expansion des services de Télévision est en grande partie à l'origine de cette profusion de satellites ; c'est ainsi que les sociétés américaines CNN et HBO, des sociétés de Hong-Kong, une seconde chaîne privée en Indonésie, des groupes philippins, malais, thaïlandais, néozélandais, utilisent ou utiliseront les satellites

Palapa. La quantité de stations individuelles de réception utilisant des paraboles dépasse déjà 500 000 en Indonésie. Les réseaux VSAT se développent également dans l'ensemble des pays de l'ASEAN où le nombre de stations installées ou en cours d'installation atteint déjà plusieurs milliers.

5. Bref résumé et conclusions

1. La quantité de satellites géostationnaires de télécommunications dans le monde ne cesse de croître. On peut estimer à 16 environ le nombre de satellites commandés en moyenne par an entre 1991 et 2002, dont une partie importante est destinée à des remplacements.

L'expansion des réseaux terrestres en fibres optiques contribue à l'évolution des satellites vers les services de diffusion et les liaisons directes aux utilisateurs, avec en conséquence l'augmentation de leur masse au lancement, de leur complexité et des puissances qu'ils rayonnent. On s'efforce de compenser en partie cette augmentation de masse, amplifiée par l'extension de la durée de vie des satellites, en introduisant des technologies plus performantes, notamment dans la propulsion, les batteries, les cellules solaires, en améliorant le rendement des amplificateurs de puissance, etc.

2. Les services de télévision et de radio (distribution/diffusion, échanges de programmes, reportages, etc.) occupent déjà près des 3/4 de tous les transpondeurs en service tant aux USA qu'en Europe. Cette proportion est plus faible dans les pays en voie de développement mais elle croît rapidement. Favorisés par la dérégulation, les réseaux autonomes d'utilisateurs, équipés de petites stations (VSAT) sont en pleine expansion, tant dans les pays industrialisés que dans ceux en voie de développement. De même on assiste à une expansion qui va s'accélérer des services de communications avec tous les types de mobiles ; si dans ce domaine la plupart des systèmes sont basés sur des satellites géostationnaires, on doit signaler ceux en préparation aux USA qui comptent utiliser des satellites sur orbites basses et ceux étudiés en Europe qui envisagent des satellites sur orbites elliptiques très inclinées.
3. L'encombrement de l'orbite géostationnaire, les ressources limitées en bandes de fréquences et les difficultés croissantes de coordination, constitueront à l'avenir un problème majeur dans le développement des satellites de télécommunications. Plusieurs méthodes seront mises en œuvre pour remédier autant que possible à cet

état de choses, dont la sophistication des antennes (ex: faisceaux multiples) et l'amélioration d'efficacité de l'occupation spectrale (plus d'informations dans une bande de fréquences de largeur donnée). Cette dernière exige la numérisation des transmissions et l'emploi de techniques sophistiquées de modulation et de codage. La numérisation déjà largement entamée dans les services de téléphonie et de radio, affectera aussi la télévision, notamment distribution et diffusion; elle permettrait de transmettre avec un même transpondeur de 27 MHz, plusieurs programmes (ex.: quatre) avec réception d'images de bonne qualité. Des projets de ce type développés aux USA devraient devenir opérationnels en 1994. Ils constitueraient également un premier pas vers la transmission de TVHD (occupant la totalité du transpondeur) dont l'intérêt pratique pour les usagers viendrait surtout avec la mise sur le marché de nouveaux systèmes de visualisation à commande numérique, dont les écrans plats (à cristaux liquides) de grandes dimensions.

4. Le marché intérieur aux USA est supérieur d'environ 50% à celui en Europe, représentant près de 35% du marché mondial contre 23% au marché intérieur européen. Deux constructeurs se partagent la quasi totalité de ce marché (près de 90%), tandis que jusqu'à présent du moins, ils étaient nettement plus nombreux en Europe. Il est vrai qu'on y assiste depuis peu à une concentration, mais celle-ci semble répondre davantage à des considérations politiques qu'à celles d'efficacité. On doit souligner que les 2 constructeurs américains sont, à travers leurs filiales à 100%, opérateurs et exploitants de satellites ainsi que fournisseurs de services, et que près de la moitié du marché intérieur des USA est constitué de satellites que leur commandent ces filiales! Ceci leur donne par ailleurs une expérience et des références que ne possèdent pas les constructeurs européens.

En ce qui concerne le marché mondial des satellites de télécommunications au cours de la période 1991-1992, on peut estimer à 60% la part qui reviendra à des constructeurs américains, contre environ 30% à des constructeurs européens.

5. Le rôle des travaux de R&D est essentiel pour réaliser des progrès dans les satellites et conserver ou améliorer leur compétitivité. Aux USA ces progrès résultent souvent de l'adaptation de ceux obtenus dans les séries de satellites de télécommunications militaires, généralement réalisées par les mêmes constructeurs; on tend d'ailleurs à utiliser des éléments communs aux 2 types de satellites. Grâce

à ces satellites militaires, au volume du marché intérieur américain et à la part importante qui leur revient sur le marché mondial, les constructeurs américains peuvent amortir les coûts de leurs propres travaux de R&D.

En Europe, où il n'y a que peu de satellites militaires les travaux de R&D sont effectués dans le cadre des programmes des agences spatiales (essentiellement de l'ESA) et à l'occasion de contrats de satellites nationaux. Sauf dans ce dernier cas, leur application pratique est loin d'être immédiate. Si les technologies utilisées dans les satellites européens se maintiennent dans l'ensemble au niveau de celles des satellites américains, appliquées à des séries plus limitées elles n'ont pas les mêmes références.

Au Japon, il n'y a pas de satellites militaires, et les principaux travaux de R&D sont effectués dans le cadre des satellites technologiques de la NASDA. L'industrie japonaise ne réalise pas encore de satellites de télécommunications mais elle possède déjà un bon niveau technologique et un quasi monopole dans certains composants et équipements de base.

6. Il est difficile d'isoler l'influence de la dérégulation sur le développement des télécommunications par satellites. On peut toutefois constater :

- aux USA, où elle est quasi totale ("open sky policy"), un dynamisme remarquable dans tout le domaine, satellites et réseaux de stations, tant au niveau des quantités qu'à celui des innovations, des technologies et des services.
- au Japon et en Asie du Sud-Est où elle est récente et parfois partielle, une profusion de satellites et l'émergence de réseaux de stations VSAT et de nouveaux services.
- en Europe où elle est inexistante dans le segment spatial mais où elle commence dans plusieurs pays à se développer dans certains services du segment terrien, il n'y a rien de comparable au dynamisme américain, ni même à celui plus relatif du Japon et du Sud-Est asiatique.

7. Quelques conclusions

Des progrès importants ont été réalisés dans l'industrie européenne des télécommunications par satellites au cours des 10 dernières années. Mais la modestie relative du marché intérieur européen, l'absence de séries de satellites militaires, et ses structures propres ne permettent pas à cette industrie d'atteindre l'efficacité et la compétitivité auxquelles elle pourrait prétendre.

Des travaux importants de R&D indispensables pour la mise en oeuvre à relativement long terme de technologies nouvelles se font dans le cadre des programmes de l'ESA et des agences nationales. Toutefois, comme dans toutes les industries, une quantité suffisante de ces travaux doit avoir pour but des applications plus immédiates. Sauf dans quelques cas spécifiques, ce sont les constructeurs eux-mêmes qui seraient évidemment les plus aptes à les effectuer s'ils avaient des quantités suffisantes de satellites à réaliser. Actuellement le marché intérieur européen ne répond pas à cette exigence, par suite, en particulier, de son insuffisance relative, du nombre excessif d'industriels concernés et de l'absence d'un marché militaire significatif. Il n'y a, toutefois, pas de raisons fondamentales pour que cet état de choses n'évolue pas, notamment avec l'instauration fin 1992 du marché unique et avec les événements en Europe de l'Est. Plusieurs actions seraient nécessaires en vue de modifier la situation actuelle, toutes n'étant pas faciles à mettre en oeuvre :

- rationalisation de l'industrie concernée, impliquant inévitablement une réduction du nombre des participants.
- accroissement du marché intérieur européen en se dirigeant vers une plus grande libéralisation comme cela est recommandé dans le Livre Vert de la Commission des Communautés Européennes (20/11/90).

Deux points particuliers mériteraient par ailleurs d'être signalés :

- les constructeurs européens devraient, comme aux USA, pouvoir être, au moins en partie, les opérateurs des satellites qu'ils réalisent et leur domaine devrait inclure la fourniture de services.

- des efforts particuliers de R&D devraient être consacrés à des composants et équipements de base dans lesquels l'industrie japonaise possède actuellement un quasi monopole (ex: transistors et amplificateurs de puissance à l'état solide dans toutes les bandes de fréquences). Cet aspect dépasse en fait le cadre des satellites, ces composants ayant un domaine d'application sensiblement plus étendu.

EXPERTISE

sur les SATELLITES

de TELECOMMUNICATIONS

par B.BLACHIER - ALCATEL ESPACE

Cette expertise fait partie de l'Etude sur l'avenir de la politique spatiale Française et Européenne entreprise par le Sénateur LORJANI pour le compte de l'office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et techniques.

TABLE des MATIERES

Pages

SOMMAIRE	3
1. <u>TECHNOLOGIES PRESENTES ET FUTURES EN TELECOM- MUNICATIONS PAR SATELLITES</u>	4
1.1. INTRODUCTION	4
1.2. TELECOMMUNICATIONS PAR SATELLITES GEOSTATIONNAIRES	5
1.2.1. Technologies présentes et à venir	5
1.2.1.1. Les charges utiles de télécommunications des satellites géostationnaires.	7
1.2.1.1.1. Charges utiles de télécommunications - Etat de l'art	7
1.2.1.1.2. Les paramètres fondamentaux d'une liaison satellite géostationnaire	8
1.2.1.1.3. La technologie des charges utiles	15
1.2.1.2. Les satellites géostationnaires de télécommunications	24
1.2.1.2.1. Généralités	24
1.2.1.2.2. En Europe deux types de plate-forme sont les plus utilisés : Les plates-formes SPACEBUS et les plates-formes EUROSTAR	24
1.2.1.2.3. Le marché et la situation présente ont incité ALCATEL et AEROSPATIALE à développer une nouvelle famille de plate-forme avec les trois objectifs :	25
1.2.1.2.4. Cas des mini satellites géostationnaires	27
1.2.1.2.5. La propulsion ionique	28
1.2.1.2.6. Précision d'attitude des satellites	28
1.2.1.3. Rappel sur les lancements	29
1.2.1.3.1. La navette américaine SHUTTLE et les lanceurs conventionnels américains	29
1.2.1.3.2. Les avantages apportés par ARIANE 5	30
1.2.1.3.3. Les autres lanceurs commerciaux	32
1.2.1.3.4. Mini lanceurs	33
1.2.1.4. Les équipements sol	34
1.2.1.4.1. Introduction	34
1.2.1.4.2. Domaine des stations internationales	34
1.2.1.4.3. Les stations domestiques	35
1.2.1.4.4. Domaine des stations d'entreprise	35
1.2.1.4.5. Mentionnons pour mémoire les stations de contrôle	37
1.2.2. Particularités des charges utiles suivant les applications	37
1.2.2.1. Transmissions point-à-point - point - multipoints interactives	37

1.2.2.2. La radiodiffusion directe et la diffusion des sons et images	41
1.2.2.3. Communications avec les mobiles	43
1.2.2.4. Localisation, radio-navigation, détresse et sécurité, liaisons intersatellites	44
1.3. TELECOMMUNICATIONS PAR SATELLITES DEFILANTS	46
1.3.1. Présentation générale	46
1.3.2. Les applications possibles des satellites défilants aux télécommunications spatiales	47
1.3.2.1. Les services de télécommunications point à point par satellites défilants utilisent pour la plupart des orbites elliptiques dites HIEO (<i>Highly Inclined Elliptical Orbit</i>).	47
1.3.2.2. Le service de navigation TRANSIT	48
1.3.2.3. Les projets de constellation pour mobile et pour téléphone portatif	49
1.3.3. Conclusions relatives aux satellites défilants	51
1.4. TECHNOLOGIES CONCURRENTES AUX SATELLITES ET COMPLEMENTARITE	52
1.4.1. Les possibilités des fibres optiques	52
1.4.2. Les atouts des satellites	52
1.4.3. Complémentarité	53
2. <u>LES MARCHES ET LES INDUSTRIES</u>	54
2.1. INTRODUCTION	54
2.2. LE MARCHE ET LA POSITION DE NOS INDUSTRIES EN TELEPHONIE ET TRANSMISSION DE DONNEES PAR SATELLITES POUR SYSTEMES FIXES (HORS MOBILE)	54
2.2.1. INTELSAT	55
2.2.2. EUTELSAT	57
2.2.3. Les satellites nationaux	58
2.2.3.1. Position de l'industrie européenne des stations terriennes	61
2.3. DIFFUSION - RADIODIFFUSION	63
2.4. COMMUNICATIONS AVEC LES MOBILES	64
2.5. BILAN DES MARCHES PREVISIBLES	65
2.6. LA REGLEMENTATION ET SES CONSEQUENCES	66
2.6.1. Le GREEN PAPER de Bruxelles	66
2.6.2. D'une manière beaucoup plus générale	66
2.6.3. La verticalisation	67

3. <u>ETUDES - TRAVAUX ET PROGRAMMES</u>	70
3.1. CHARGES UTILES	70
3.1.1. Les réflecteurs d'antenne	70
3.1.2. Les sources d'antennes (éléments rayonnants)	71
3.1.3. Antennes actives	74
3.1.4. Equipements hyperfréquences	76
3.1.5. Traitement bord, Télécommande Télémessure, et équipements associés	76
3.1.6. Technologies hyperfréquences	77
3.1.7. Technologie numérique et fréquence intermédiaire	78
3.2. PLATES-FORMES POUR SATELLITES	80
3.2.1. Plates-formes pour satellites géostationnaires	80
3.2.2. Satellites défilants	80
3.3. INTERFACES LANCEURS	81
3.4. ETUDES SYSTEMES ET PROGRAMMES	82
4. <u>CONCLUSIONS</u>	84
<u>REMERCIEMENTS</u>	86
<u>REFERENCES</u>	87
<u>GLOSSAIRE</u>	91

SOMMAIRE

- Une première partie fait l'état des lieux des Télécommunications par satellite présentant les Technologies utilisées ainsi que les Technologies prévisibles pour les années 2000 et au-delà.
 - Les satellites géostationnaires et les satellites défilants seront traités séparément, chacun de ces types de satellite, correspondant à des technologies, des applications, et des états de développement différents.

- Une deuxième partie fait une évaluation des marchés présents et futurs et de la place de l'Industrie Française et Européenne vis-à-vis des marchés et face à la concurrence mondiale.

- Une troisième partie fait une présentation des études en cours et indique les compléments d'études envisageables à faire dans l'avenir, au niveau charges utiles des télécommunications et au niveau satellite d'une manière générale. Des programmes d'applications sont envisagés.

- Les conclusions donnent des recommandations d'actions pour le futur :
 - Compte-tenu des aides gouvernementales existant aux USA par le biais de programmes militaires et également civils (ACTS), il importe que des programmes nouveaux pré-opérationnels soient lancés, soit au niveau européen, soit au niveau national avec la collaboration de France-Télécom, du CNES et du Ministère des Armées.
Au niveau des équipements et des composants un effort doit être fait pour mettre l'Europe au niveau de la compétition Japonaise.
 - Une rationalisation industrielle est à faire au niveau des plates-formes de satellites et des équipements en général.

1. TECHNOLOGIES PRESENTES ET FUTURES EN TELECOMMUNICATIONS PAR SATELLITES

1.1. INTRODUCTION

Les Télécommunications spatiales n'ont pas de finalité différente des télécommunications classiques au sol. Elles ont, par contre, des spécificités propres découlant du fait qu'une partie des équipements utilisés est implantée à bord d'un satellite : ces satellites sont, en général, fixes par rapport au sol de la Terre. Ce sont des *satellites géostationnaires* et ils se trouvent tous localisés sur une seule et même orbite terrestre géostationnaire. D'autres satellites tournent autour de la terre sur d'autres orbites que l'orbite géostationnaire. Ils sont alors vus du sol comme des *satellites défilants* et voient, en général, périodiquement les mêmes parties du globe.

Les satellites de télécommunications utilisant les satellites géostationnaires ont une importance actuelle. Ils seront présentés séparément des satellites défilants qui ne sont pas au même niveau de maturité.

- **La présentation des télécommunications utilisant des *satellites géostationnaires* comporte une description technique des matériels et des technologies utilisés. Afin de mieux faire comprendre les évolutions envisageables, les paramètres fondamentaux d'une liaison par satellite géostationnaire sont présentés montrant les relations entre les équipements bord et sol. Leurs applications sont décrites ensuite avec leurs particularités techniques.**
 - **La présentation technologique décrit en premier les équipements de télécommunication à bord du satellite, appelés "Charge Utile", puis les satellites eux-mêmes, sans que soit traité le problème de la mise en orbite géostationnaire, ce point étant traité par une autre expertise. Certains problèmes spécifiques à ce sujet sont évoqués, tout particulièrement ceux liés à la masse à satelliser. Une présentation générale des équipements sol c'est-à-dire les stations sols est faite d'une manière globale. Le fait que les types de stations terriennes différent très notablement suivant les applications conduit à faire leur description à propos des applications.**
 - **Les applications sont nombreuses, certaines anciennes, d'autres en cours de création. Ces applications comprennent la téléphonie et les transmissions de données point à point, point à multipoints, la diffusion, la radiodiffusion du son et de l'image, les**

communications avec les mobiles, la localisation, la radio-navigation, la sécurité et signaux de détresse. Toutes les applications existantes ou prévisibles sont décrites en signalant leurs exigences particulières tant du côté satellite que du côté sol.

- D'une manière similaire, les technologies liées aux satellites non géostationnaires, c'est-à-dire défilants, sont décrites d'une manière plus sommaire, ces technologies n'étant, la plupart du temps, qu'à l'état de projets. Les applications prévues également seront décrites.
- Comme indiqué en début de cette introduction, les Télécommunications spatiales n'ont pas de finalités différentes des autres types de télécommunications. Toutes - ou presque toutes - sont à comparer avec des technologies conventionnelles n'utilisant pas de satellite. Une appréciation de la compétitivité de ces technologies face aux technologies au sol sera faite bien que l'aspect complémentarité l'emporte sur l'aspect compétitivité.

(♦ Référence N°1 ♦)

1.2. TELECOMMUNICATIONS PAR SATELLITES GÉOSTATIONNAIRES

Rappel liminaire sur l'orbite géostationnaire

Avant de décrire les technologies, rappelons qu'un satellite géostationnaire est à 36 000 km au-dessus de l'Equateur. En effet, les lois de KEPLER montrent que pour tourner autour de la Terre en 24 Heures, c'est-à-dire pour donner l'impression que ces satellites soient fixes pour un observateur terrestre, il n'y a pas d'autre possibilité que d'atteindre cette très grande altitude, et de propulser le satellite à une vitesse voisine de 11 000 km/H¹⁾. Ce faisant, tous les satellites tournent sur la même orbite circulaire, 36 000 kms au-dessus de l'Equateur, dans le plan de l'Equateur. Ils ont tous la même vitesse, ils sont à la queue leu-leu sur cette orbite, mais pour les observateurs terrestres, ils sont fixes à différentes positions angulaires longitudinales dans ce plan équatorial.

(♦ Référence N°2 ♦)

1.2.1. Technologies présentes et à venir

Les premières utilisations civiles des satellites géostationnaires ont été faites à propos de liaisons téléphoniques transatlantiques pour le compte d'INTELSAT - Organisme Inter-

1) On se reportera à l'expertise de M. POGGI "Accès à l'Espace". Il est montré que des vitesses bien supérieures sont nécessaires pour atteindre cette orbite.

national - créé en 1964. La mise en orbite d'un satellite géostationnaire était alors une opération difficile, maîtrisée par les Américains, les participants d'INTELSAT se contentant d'applaudir aux prouesses techniques de la technologie U.S.

Les temps ont changé le cadre de ces choses : les satellites se sont banalisés, des sociétés privées en font commerce. Les U.S. ne sont plus les seuls à savoir lancer des satellites géostationnaires, les Européens, les Chinois et les Japonais savent le faire également et ARIANESPACE possède plus de la moitié du marché des lancements civils.

Toutefois, cette nouvelle donne découle, semble-t-il, de certains choix effectués à certains instants dans certaines directions comme nous l'indiquerons à propos des lancements.

De la même manière, les Européens savent faire des satellites géostationnaires, ainsi que les équipements de télécommunications constituant la charge utile. Pour ce qui concerne les stations terriennes, ces dernières ont, par contre, toujours été fabriquées en France et en Europe. Toutefois, comme il le sera précisé ultérieurement, les nouvelles applications de télécommunications par satellite ainsi que les progrès de la technologie risquent de faire évoluer les positions dans ce domaine.

- L'Aspect Technique est présenté en premier décrivant les principes de fonctionnement de la grande majorité des charges utiles qui sont en cours d'exploitation ou de construction. On évoque l'évolution prévisible des schémas actuels et des progrès qui leur sont associés. Afin de faire comprendre les raisons de ces évolutions futures, un rappel sur les paramètres fondamentaux des liaisons par satellites indique comment ces derniers interagissent sur les performances des télécommunications.
- Les satellites servant de support aux charges utiles de télécommunications ne diffèrent pas dans leur principe de satellites géostationnaires servant à d'autres missions. Leur présentation est faite d'une manière générale ainsi que les axes d'évolutions et d'amélioration pour ces satellites. Quelques rappels sont faits au sujet des lancements des satellites géostationnaires.
- On présente également les stations terriennes et leurs évolutions prévisibles avant d'aborder les différentes applications des satellites géostationnaires de télécommunications.
- Pour chacune de ces applications, on met en évidence les spécificités, tout particulièrement au niveau des équipements. L'évolution des technologies de base existantes est étendue jusqu'aux nouvelles technologies que l'on prévoit entrer en application dans les prochaines années.

1.2.1.1. Les charges utiles de télécommunications des satellites géostationnaires.

1.2.1.1.1. Charges utiles de télécommunications - Etat de l'art

Les premières charges utiles ont été, il y a une vingtaine d'années, des répéteurs pour signaux téléphoniques. Les signaux, étaient émis d'un bord de l'Atlantique, parcouraient de l'ordre de 40 000 km pour atteindre le satellite qui se situait au milieu de l'Atlantique à 36 000 km au-dessus de l'Equateur, étaient amplifiés et translatés en fréquence à l'intérieur du satellite et amplifiés à nouveau à forte puissance afin de pouvoir redescendre vers la station de réception de l'autre côté de l'Atlantique.

Depuis vingt ans, ce schéma de transmission de signaux téléphoniques transatlantiques se perpétue dans son principe bien que les quelques voies téléphoniques d'il y a vingt ans soient au nombre de 30 000 comme par exemple dans le cas des satellites INTELSAT VI en cours de fonctionnement.

Il est bien concevable que les technologies nécessaires à transmettre 30 000 circuits soient différentes de celles des premiers satellites de Télécom bien que les principes de base soient quasiment invariants.

Comme nous le verrons par la suite, plusieurs types d'applications des satellites géostationnaires de télécommunications tels que la transmission des signaux de téléphonie ou de données numériques en bande étroite, la diffusion et la radio-diffusion des images, certaines communications avec les mobiles, utilisent le même schéma et les mêmes principes de base des premiers satellites INTELSAT.

Toutefois, toutes ces applications diffèrent les unes des autres par les bandes de fréquences utilisées, les antennes utilisées, les filtrages utilisés, les émetteurs utilisés et les récepteurs. Tous les éléments composant la charge utile diffèrent les uns des autres bien que tous ces satellites fonctionnent sur les mêmes schémas de base.

Ce schéma de base comprend : (*voir Figure 1*)

- Une ou plusieurs antennes de réception capables de recevoir les signaux en provenance de stations terriennes.
- Des amplificateurs faible bruit, ceci voulant dire que les signaux après 40 000 km de parcours sont à des niveaux extrêmement faibles environ 10^{-15} fois plus faibles que les signaux émis au sol, et qu'à ces niveaux, les bruits existants dans les

amplificateurs dus au mouvement des électrons sont du même ordre de grandeur que ces signaux arrivant du sol. Ces amplificateurs faible bruit sont suivis de translateurs et d'amplificateurs.

- Des filtres appelés démultiplexeurs permettant d'aiguiller les signaux vers les amplificateurs de puissance.
- Les amplificateurs de puissance capables d'émettre des signaux suffisamment puissants pour supporter l'atténuation de 40 000 km de propagation vers les stations sol.
- Des filtres à nouveau permettant de brancher plusieurs amplificateurs sur des antennes communiquant avec les stations de réception au sol, appelés Multiplexeurs.
- Une ou plusieurs antennes d'émissions souvent réutilisant les mêmes structures que les antennes de réception capables d'émettre les signaux de forte puissance en direction des stations terriennes.

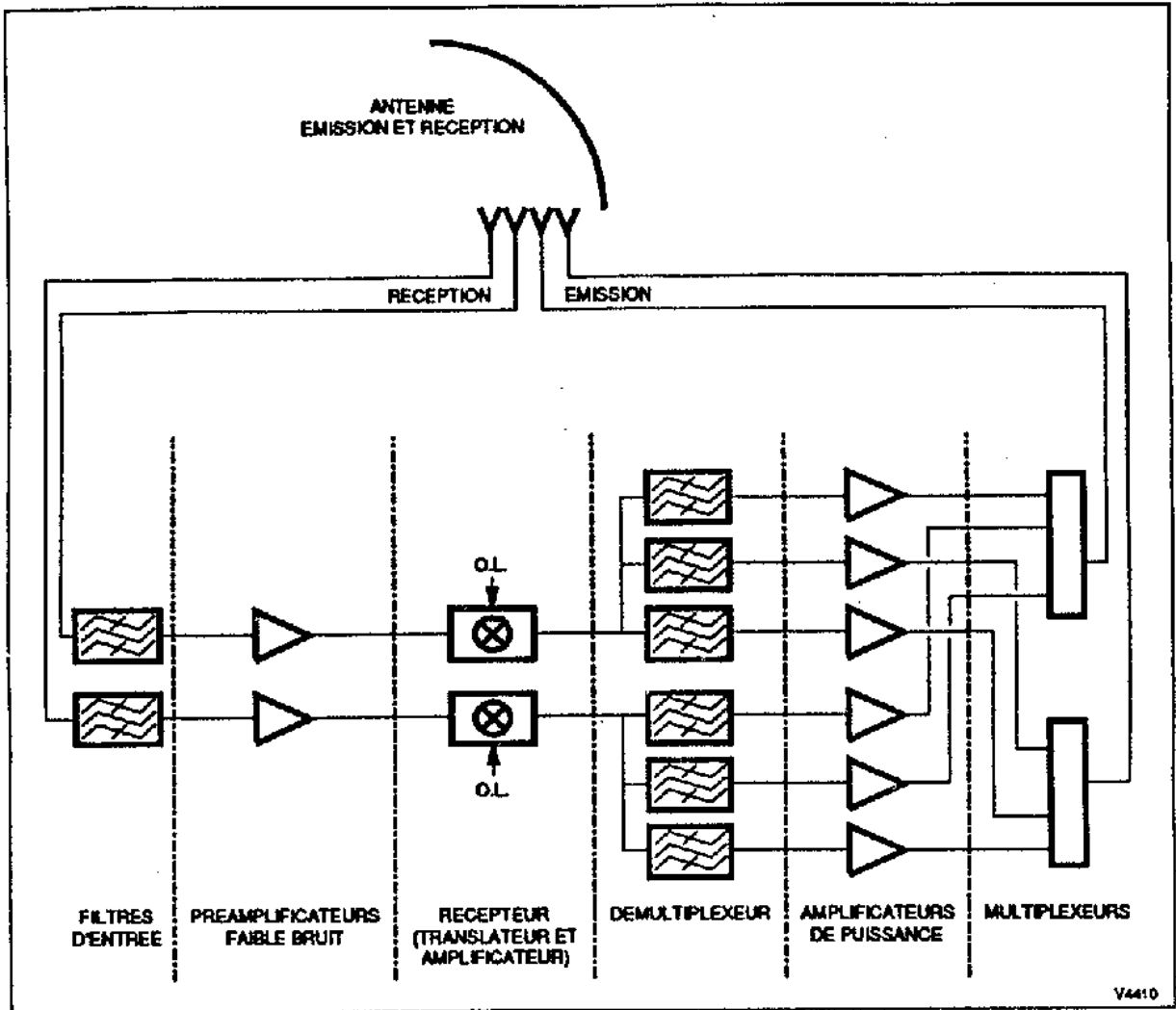


Figure 1

Schéma de base des charges utiles de télécommunications pour satellites géostationnaires

Tous ces équipements des charges utiles ont subi des améliorations de qualité se traduisant par des améliorations de performances intrinsèques, telles que la réduction des pertes internes, l'augmentation de la qualité des bandes (*existantes et nouvelles*) de transmission, la pureté des fréquences, mais pour tous, ces efforts ont surtout été dirigés vers la réduction de la masse, l'amélioration du rendement et l'augmentation de la fiabilité. Pour chacun de ces équipements, nous analyserons les efforts entrepris et les efforts à entreprendre.

Avant de rentrer dans l'analyse technologique des équipements, il est important de faire comprendre les raisons qui ont conduit au schéma de base actuel et ce qui pourra le faire évoluer. On est conduit à expliquer l'aspect global des télécommunications par satellite où interviennent non seulement le satellite mais aussi les stations sol.

1.2.1.1.2. Les paramètres fondamentaux d'une liaison satellite géostationnaire

Les signaux reçus par le satellite proviennent d'une station sol à environ 40 000 km de distance. Il faut que les signaux arrivent sur le satellite avec un niveau supérieur au bruit thermique existant dans les amplificateurs actifs d'entrée du satellite.

Il faut également que le satellite émette ses signaux avec une puissance suffisante pour que les stations sol puissent les recevoir.

Les facteurs positifs à cette transmission des signaux sont :

- a) le gain²⁾ de l'antenne d'émission, au sol pour le trajet montant et celui de l'antenne du satellite pour le trajet descendant.
- b) la puissance de l'émetteur d'émission au sol, pour le trajet montant et de celui du satellite pour le trajet descendant.
- c) le gain de l'antenne de réception, à bord du satellite pour le trajet montant et celui de l'antenne sol pour le trajet descendant.
- d) le niveau de bruit des amplificateurs d'entrée, à bord du satellite pour le trajet montant, au sol pour le trajet descendant.

2) *Le gain d'une antenne correspond à l'amélioration des signaux émis ou reçus dans une direction privilégiée par rapport aux autres directions.*

a) et b) s'associent dans le paramètre PIRE, ce qui veut dire puissance isotrope rayonnée équivalente qui n'est autre que le produit de a) par b).

De même que c) et d) s'associent dans le paramètre G/T, qui n'a pas d'autre nom mais qui est le rapport de c) sur d).

Plus la PIRE des stations sol est forte, plus le G/T du satellite est grand, mieux se fait la transmission des signaux du sol vers le satellite.

De même, les signaux reçus, par les stations sol, émis par le satellite, réagissent d'une manière similaire : Plus la PIRE du satellite est forte, et plus le G/T des stations terriennes est grand, meilleure est la transmission du satellite vers le sol.

Ce mieux de transmission peut se résumer par la capacité de transmission possible, c'est-à-dire, à la bande passante disponible, ou par exemple, au nombre de voies téléphoniques.

Signalons que PIRE comme G/T ont des contraintes inhérentes et qu'il n'est pas possible de leur donner des valeurs hors de certaines limites : en effet, le gain des antennes de satellites est limité par la couverture au sol. Plus la couverture est grande, plus faible est le gain de l'antenne. Une couverture vue du satellite sous un angle de 1° correspond à une zone au sol de 1000 km de diamètre pour des régions de notre latitude. A une couverture de 1000 km correspond une antenne satellite d'environ 10^4 (40 dB) de gain. La couverture globale de la Terre, le maximum que l'on puisse voir de la Terre d'un satellite géostationnaire correspond à un gain de l'antenne satellite de l'ordre de 65 (18 dB).

Dans les premiers satellites géostationnaires, les contraintes de précision d'attitude du satellite et de poids de la charge utile limitaient les tailles des antennes bord et seule la couverture globale était disponible. Les émetteurs de bord étaient également limités en puissance à une dizaine de Watts. Les stations sol, pour recevoir les signaux de ces satellites devaient avoir d'excellent G/T, c'est-à-dire, avoir de grandes antennes supérieures à 10 m de diamètre et de faible température de bruit, c'est-à-dire, avoir des masers ou des ampli-paramétriques cryogéniques. Aujourd'hui, les PIRE des satellites sont facilement 1000 fois supérieures et les tailles des antennes au sol peuvent être réduites dans un rapport de l'ordre de 20 pour des services similaires. Sans la cryogénie, les transistors ont amélioré leurs performances, se rapprochant de celles des amplificateurs paramétriques.

Le facteur négatif défavorisant la transmission est l'absorption atmosphérique qui est liée à la fréquence utilisée. Ce n'est pas la même chose sous tous les cieux, mais d'une manière générale, cette absorption croît avec la fréquence utilisée ainsi qu'avec le complément de l'angle d'élévation sous lequel le satellite est vu du sol :

Pour des zones climatiques tempérées, telles que l'Europe, l'absorption est limitée à une perte de 25 % par rapport à l'espace libre dans les bandes 4 et 6 GHz, et en-dessous de ces bandes.

Pour les bandes 11/14 GHz, dépendant des conditions climatiques journalières, les pertes peuvent se situer entre 50 % et 75 %. Lorsqu'il s'agit des bandes de 20/30 GHz, les pertes peuvent atteindre 80 % à 90 % et parfois, plus.

On peut se rendre compte que, pour une zone déterminée à couvrir au sol, ce qui définit le gain de l'antenne bord, les éléments déterminants de la transmission sont, d'une part, la taille de l'antenne sol, et, d'autre part, l'absorption atmosphérique. Tout semble recommander l'emploi de fréquences basses dans la mesure où les tailles des antennes de bord sont acceptables pour le satellite. Toutefois, comme nous le verrons, il ne faudrait pas tirer comme conclusion que les fréquences élevées sont condamnées. La montée en fréquence dans les télécommunications par satellite ne s'est faite qu'au fur et à mesure de la saturation des fréquences les plus basses. La saturation des bandes de fréquence pousse à l'emploi de fréquences nouvelles plus hautes. Toutefois, l'augmentation des fréquences permet des applications nouvelles et surtout augmente les bandes utilisables en facilitant la réutilisation des fréquences et la coordination de satellites entre-eux.

Coordination et réutilisation des fréquences

La réduction des coûts globaux est, et restera, le dogme de base. L'augmentation du trafic, toutes applications confondues, nécessite d'utiliser plusieurs fois les fréquences pour lesquelles l'absorption atmosphérique reste raisonnable. La seule limitation au nombre de fois où ces fréquences sont réutilisées est le coût lié à ces réutilisations avant de passer à des fréquences supérieures.

La réutilisation de fréquence existe à deux niveaux.

Le premier que nous qualifierons d'"orbital" est lié au nombre de satellites que l'on peut mettre sur l'orbite géostationnaire : Pour que deux satellites voisins travaillant dans la même bande de fréquence puissent ne pas se gêner entre eux, il faut que les stations sol aient des antennes suffisamment directives pour pouvoir "séparer" les

satellites entre eux. Plus les antennes sont grandes au sol et hautes en fréquence, mieux cette séparation est faite entre les satellites en orbite. Pour séparer deux satellites à 2 degrés l'un de l'autre, il faut des antennes de gain de l'ordre 10^5 (50dB) ce qui fait à 6 GHz de l'ordre 6 mètres, à 12 GHz de l'ordre 3 mètres, à 20 GHz de l'ordre du 1,8 mètre à 30 GHz 1,2 mètre.

Tout ceci ne sont que des ordres de grandeurs, mais, comme l'orbite géostationnaire est unique, les places disponibles sur une région déterminée sont limitées et vers les fréquences les plus basses, il est difficile de séparer, ou de réutiliser, entre deux systèmes par satellites des fréquences inférieures à 4/6 GHz sans avoir de grandes antennes au sol. On conçoit la réticence d'Intelsat, non propriétaire des antennes sol, à réduire ces tailles d'antennes au sol, car ce faisant, il s'oblige à écarter les satellites entre eux et à réduire la capacité du futur dans les bandes les plus basses.

Le *deuxième* niveau de la réutilisation de fréquence pratiquement indépendante du premier consiste à séparer les zones au sol par les antennes de bord. Même si les deux satellites sont très proches, voire même pour un seul et même satellite, il est possible de réutiliser les fréquences dans la mesure où les antennes de bord séparent les zones au sol avec suffisamment de découplage, ceci étant vrai pour chaque polarisation de l'onde électromagnétique, le découplage de polarisation n'offrant toutefois qu'une seule réutilisation par zone géographique.

Au niveau d'Intelsat, les fréquences sont déjà réutilisées entre les hémisphères EST et OUEST de part et d'autre de l'Atlantique. Cette forme de réutilisation de fréquence est appelée réutilisation "géographique".

D'une manière générale, on voit que la réutilisation "orbitale" a tendance à augmenter le diamètre des antennes au sol. La réutilisation "géographique" a tendance à augmenter le diamètre des antennes à bord du satellite. Mais dans les deux cas, la montée en fréquence simplifie la réutilisation des fréquences.

Un écologiste voulant sauvegarder l'avenir de l'orbite géostationnaire favoriserait la réutilisation "orbitale". Un pragmatique voulant favoriser le maximum de développement des communications par satellite est pour la réutilisation géographique et il semble bien que cette tendance l'emporte comme nous allons le montrer, car, l'analyse ne doit pas se limiter au coût du seul secteur spatial. Quand il s'agit de réduire les coûts, il ne s'agit pas de réduire le coût du satellite, mais de l'ensemble satellite et stations terriennes.

Mentionnons toutefois que l'orbite géostationnaire est réglementée au niveau fréquence par l'Union internationale des télécommunications UIT et que des règles strictes sont appliquées à la coordination des satellites entre eux, ces règles n'allant pas toujours dans l'axe "pragmatique" mais plutôt dans l'axe "écologique".

Réduction des coûts globaux satellite et stations sol

Les systèmes anciens, tel INTELSAT, se sont développés, au début, avec les possibilités orbitales des premiers satellites dont les PIRE limitées imposaient de grandes antennes au sol. Les progrès, des PIRE sur les satellites et des G/T pour le bord comme pour le sol ont permis l'apparition de toutes petites stations sol appelées VSAT (*Very Small Aperture Terminal*).

Bien que ce type de stations soit principalement développé aux USA, la tendance vers des petites stations est générale. Les petites stations sont généralement limitées en bande, c'est-à-dire en débit d'informations à ce jour, mais le futur permet d'envisager l'augmentation des débits tout en gardant ou diminuant les coûts unitaires de ces stations.

La multiplication du nombre de petites stations entraîne un nouveau type d'optimisation économique, où, le prix du sol devenant prépondérant, entraîne des obligations sur les charges utiles du futur en vue de la réduction des coûts du système complet satellite plus stations terrestres. Les stations VSAT ont déjà en gestation leur seconde génération appelée USAT (*Ultra Small Aperture Terminal*).

La conciliation de la tendance vers la réduction des coûts globaux tout en tenant compte des besoins d'élargissement des bandes, impose à terme des antennes directives à bord des satellites définissant des zones au sol de plus en plus restreintes.

Pour que ces zones au sol puissent communiquer entre elles, il faut que les satellites sachent orienter les signaux arrivant de ces différentes zones vers les zones qui leurs sont attribuées. C'est ce que l'on appelle le traitement bord, ce traitement pouvant prendre plusieurs formes comme il sera vu au niveau application.

Toutefois, le traitement bord n'est pas a priori indispensable pour la diffusion directe par satellite pour une région unique, bien que le besoin de minimiser le coût des antennes sol et d'élargir les bandes utilisables pousse également à l'utilisation de fréquences de plus en plus élevées.

De cette revue générale retenons les deux grandes tendances :

- Tendance vers la réduction du coût des stations sol, entraînant dans les systèmes interactifs le traitement bord,
- Tendance vers l'augmentation des bandes de fréquences soit par leur réutilisation, soit par l'utilisation de nouvelles fréquences.

1.2.1.1.3. La technologie des charges utiles

Pour chaque composante de la charge utile, à savoir, antenne, amplificateur, récepteurs, filtres, amplificateurs de puissance, on présente les technologies existantes et les évolutions envisageables.

De même, pour le traitement bord, on donne les différentes technologies en cours d'étude appliquées à différents types d'architectures de charges utiles.

Antennes

Les antennes émission et réception relèvent de technologies similaires et sont traitées ensemble.

Comme indiqué précédemment, les deux caractéristiques principales d'une antenne sont : le gain et la couverture terrestre. Ces deux paramètres sont intimement liés : plus la couverture est petite, plus le gain est grand. Lorsqu'un satellite a une vocation planétaire, comme les INTELSAT, soit l'on couvre par une antenne globale toute la partie visible de la Terre, et alors, on est conduit à utiliser de très grandes antennes au sol, soit on optimise le trafic et l'on doit impérativement fournir de fortes PIRE sur les zones à fort trafic permettant à beaucoup de stations terriennes de faible coût la possibilité de communiquer.

- Nous donnons l'exemple d'INTELSAT.

Dans les bandes 6/4 GHz, le satellite réutilise six fois les bandes à l'aide de six couvertures terrestres et trois fois à 14/12 GHz à l'aide de trois couvertures terrestres.

La forme de ces couvertures est un compromis entre les gains qu'il est possible d'offrir, les découplages entre couvertures, la taille des couvertures afin d'optimiser les communications entre couvertures. A ce jour, les limites au nombre de couvertures sont imposées par les possibilités d'adaptation et les possibilités d'interconnexion entre zones.

Les technologies encours d'étude améliorent ces deux possibilités : les antennes futures seront de plus en plus reconfigurables en vol et, comme déjà signalé, le traitement bord facilitera les interconnexions de couverture à couverture.

Ce qui est dit à propos l'INTELSAT s'applique également à INMARSAT dont la vocation est également planétaire. INMARSAT travaille à 1.6/1.5 GHz ce qui impose à bord du satellite des tailles d'antennes de l'ordre de 2 m pour des couvertures de 4000 kms de diamètre. INMARSAT III utilisera, sans réutilisation de fréquence, cinq pinceaux de ce type en complément d'une couverture globale.

Les antennes pour EUTELSAT sont également reconfigurables en vol, pouvant soit avoir une couverture complète, de la Turquie aux Açores, sur l'Europe, soit une couverture offrant une forte PIRE sur une couverture restreinte coïncidant avec une zone de fort trafic potentiel et permettant de la réception par de petites antennes au sol.

- Quand il s'agit d'antennes pour des satellites nationaux, les couvertures sont soit réduites à une couverture nationale pour des pays de faibles superficies, soit comme par exemple pour la 6/4 GHz de TELECOM 1, des spots sont pointés en directions des DOM. Dans le cas de pays de grande superficie les satellites découpent en zones le pays afin d'offrir des PIRE élevées sur les zones à fort trafic d'une manière similaire aux satellites internationaux.
- Les satellites pour la diffusion de TV conformément au plan de Genève ont, en général, une zone unique elliptique comme couverture.

On voit donc que suivant leurs applications les antennes de satellite sont plus ou moins compliquées avec plusieurs pinceaux ou, dans le cas de pays de taille limitée, un seul pinceau épousant la forme du pays.

La technologie des antennes, pour répondre à ces besoins est variée.

Il existe deux types principaux :

- Antennes à réflecteur avec sources primaires dans le plan focal,
- Antennes réseau à rayonnement direct (*ceci n'est pas l'Etat de l'art*).

Les antennes à réflecteurs possèdent éventuellement des réflecteurs auxiliaires. Le réflecteur principal est soit du type parabolique, soit une surface complexe permettant de former une tâche de diffraction adaptée à l'utilisation prévue. Il existe donc une très grande variété d'antennes à réflecteurs qui ont, comme nous le verrons à propos des applications, des avantages spécifiques s'adaptant à ces applications.

On notera deux grandes catégories :

- La première qui est la seule opérationnelle correspond aux antennes passives. Ces antennes à réflecteur ont dans leur plan focal un ensemble de sources rayonnantes. Ces antennes sont alimentées par un même élément actif, ou groupe d'éléments actifs. Ces éléments actifs étant des amplificateurs de puissance à l'émission ou des récepteurs à la réception. Fig. 2.
- La deuxième catégorie correspond aux antennes actives à réflecteurs. Chaque source du plan focal est connectée à un élément actif de type émission ou réception. A l'émission afin d'améliorer l'efficacité, on dispose une matrice hyperfréquence entre les sources et les éléments actifs. Plusieurs schémas sont possibles et en cours d'études. Fig. 3.

Les antennes réseaux sont soit alimentées par une source active unique, soit les sources sont incorporées à l'intérieur du réseau. Dans le premier cas, l'antenne est passive, dans le second cas, l'antenne est active. Les éléments rayonnants de ces antennes réseaux sont aussi très différents d'une antenne à l'autre suivant les fréquences et les largeurs des bandes de fréquence, les ouvertures angulaires nécessaires.

Indiquons que toutes ces antennes sont à l'extérieur du satellite, soit regardant le soleil, soit regardant les 3° KELVIN du ciel entraînant des gradients thermiques sur des surfaces où le dixième de la longueur d'onde doit être maintenu. On conçoit l'énormité des problèmes lorsqu'il s'agit d'antennes actives (c.f.: § 3.1.3).

Nous verrons à propos des applications de satellites que certains types d'antennes sont plus appropriés à telle application plutôt qu'à telle autre, mais que tous ces types d'antennes ont leur raison d'être.

Amplificateurs et récepteurs

On a évoqué la caractéristique fondamentale de la réception d'un satellite, le G/T, rapport entre le gain de l'antenne et la température équivalente de la réception. T se mesure en degrés Kelvin et plus T est petit, meilleure est la réception du satellite. Pour optimiser le T du satellite, il faut mettre un amplificateur faible bruit, soit le plus

près de l'antenne, soit dans l'antenne elle-même, ce qui est possible pour les antennes actives. Les amplificateurs à faible bruit sont à ce jour construits autour de transistors de haute qualité, les meilleurs provenant du JAPON. Ces transistors utilisent en hautes fréquences la technologie HEM (*High Electron Mobility*) sur des substrats Arséniure de Gallium, technologie inventée en France ...

Une fois les signaux amplifiés à un niveau les sortant des bruits ambiants, ces signaux sont translatés en fréquence dans un récepteur puis amplifiés à nouveau. Toutes ces opérations sont faites à ce jour par une boîte de l'ordre du kilogramme de masse. La technologie MMIC (*Microwave Monolithique Integrated Circuits*) réduira la masse de ces récepteurs d'une manière drastique. Il est aussi envisageable que les amplificateurs faible bruit soient faits en MMIC . Ils pourront alors s'intégrer dans les antennes actives. Les MMIC sont étudiés par le fabricant d'équipement mais la réalisation s'effectue chez un "fondeur". Il existe quelques fondeurs de cette espèce en Europe dont les performances ne sont pas à la hauteur des fondeurs Américains ou Japonais.

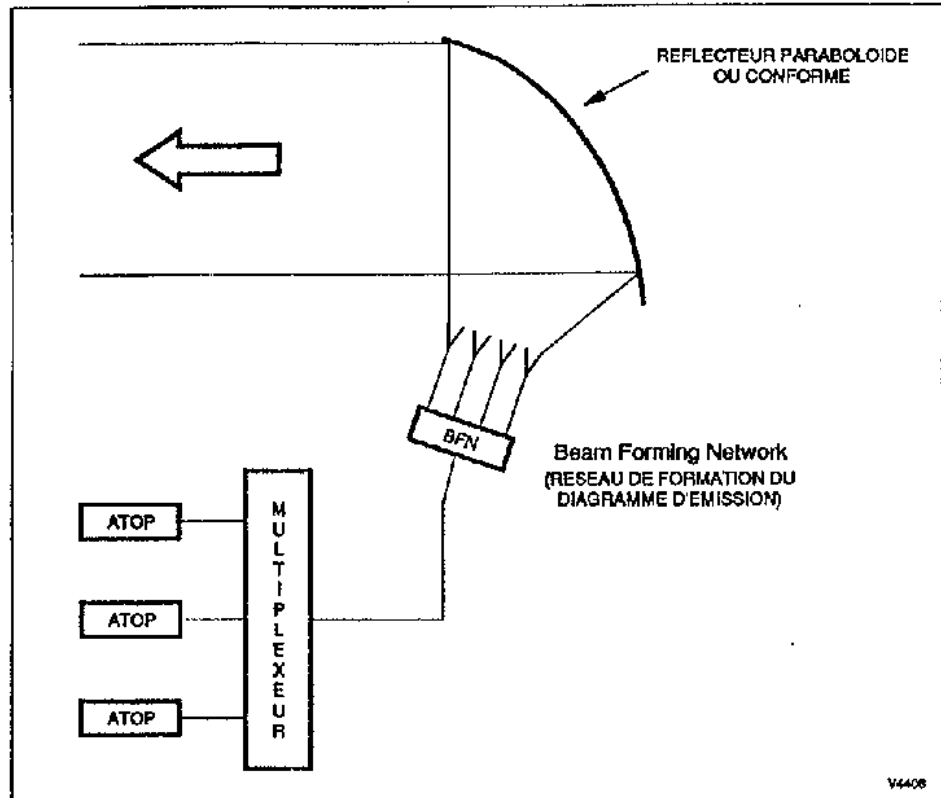


Figure 2

Antenne passive à réflecteur (Emission)
Schéma de principe

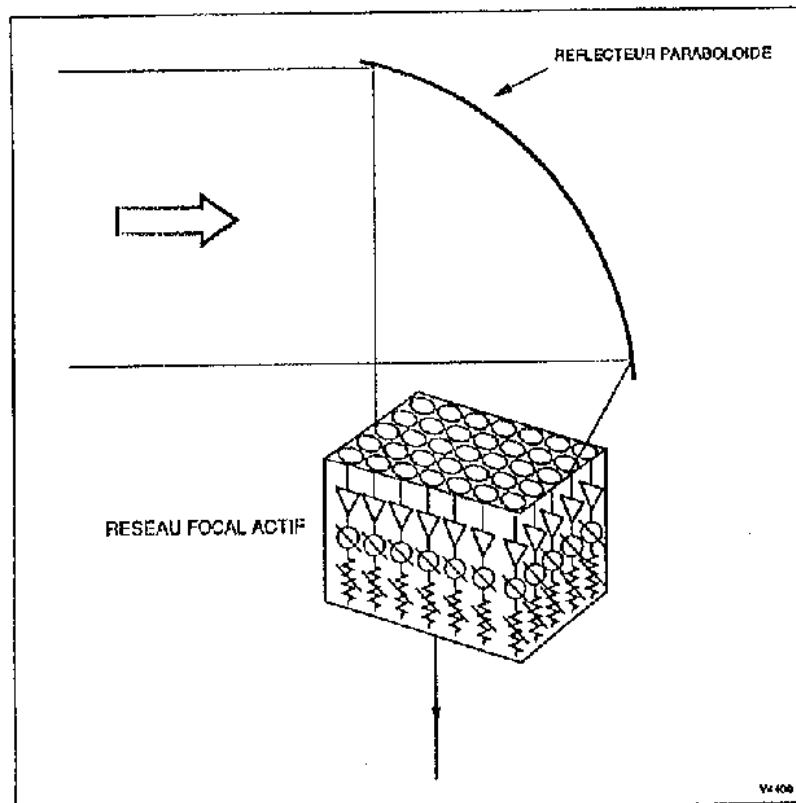


Figure 3

Antenne active à réflecteur (Réception)
Schéma de principe

Les récepteurs du futur auront donc des tailles très réduites. Ceci permettra à terme de les multiplier et également de passer à des bandes de fréquence intermédiaire, ce qui est indispensable lorsque l'on veut effectuer du traitement bord. Signalons cependant que INMARSAT passe déjà en fréquence intermédiaire pour effectuer ce qui est appelé du traitement bord transparent.

Filtres

Les filtres sont très utilisés dans les satellites opérationnels derrière l'antenne de réception, en démultiplexeur et en multiplexeurs avant les antennes d'émission. Tous ces filtres fonctionnent en hyperfréquences. Ils fonctionnent tous sur le même principe dit Dual Mode Elliptic Filter inventé il y a 23 ans par deux Français. Ils sont presque tous fabriqués au Canada ... Certes, la technologie a évolué depuis 23 ans, les cavités des résonateurs utilisent aujourd'hui des diélectriques de haut indice réduisant les masses et les volumes mais ces filtres, quand ils sont performants, sont volumineux. Il n'est donc pas possible de les utiliser dans les antennes réseaux où chaque source doit être filtrée à l'entrée. Il faudra donc intégrer ces filtres dans les circuits MMIC, ce qui demande à être très sérieusement étudié. Signalons que, dès lors que s'effectue du traitement bord, il est possible, pour les filtres démultiplexeurs, de filtrer à des fréquences intermédiaires, ce qui permet de réduire le poids et l'encombrement des filtres ou filtrer par filtrage numérique.

(♦ *Références N°3* ♦)

Amplificateurs de puissance

Deux types d'amplificateurs sont utilisés dans les charges utiles : les amplificateurs à tube à ondes progressives (TOP) et les amplificateurs à l'état solide (S.S.P.A.). Au-dessus d'une certaine fréquence qui se situent dans la bande Ku (12 GHz) les TOP l'emportent sur les SSPA, la performance étant liée au rendement et au poids.

Suivant la puissance demandée, il est souvent préférable d'utiliser des TOP aux transistors. En général, le rendement des TOP est meilleur que celui des transistors quand ces derniers fonctionnent linéairement ce qui est souvent nécessaire. L'amélioration du rendement des amplificateurs à transistors est prévisible, non seulement par l'amélioration des qualités des semiconducteurs, mais également par celle de circuits d'utilisation. Le poids des TOP est plus fort que l'équivalent en transistors. Ces deux types d'amplificateurs de puissance, à TOP et à transistors, ont des progrès à faire et doivent donc continuer à vivre longtemps, les transistors repoussant de plus en plus les TOP vers les hautes fréquences et les fortes puissances.

Pour les antennes réseaux, il paraît impossible de ne pas utiliser des transistors intégrés dans les structures d'antenne, ceci amenant, comme nous l'avons déjà fait remarqué à propos des antennes, de sérieux problèmes technologiques.

Remarque globale sur la technologie des charges utiles transparentes

Tous les éléments évoqués précédemment : antennes, amplificateurs faible bruit, filtres, amplificateurs de puissance peuvent appartenir dans le futur à l'antenne active. L'intégration de ces éléments dans l'antenne va donc amener des changements considérables qu'il n'est pas possible d'évoquer dans une analyse aussi générale.

Traitement bord

Nous avons déjà indiqué, que, lorsque le nombre de directions arrivant et partant du satellite est important, le traitement bord devient nécessaire.

Mais regardons-le également au niveau de la complexité des stations terriennes.

Prenons le cas complètement dépersonnalisé d'un système fermé comprenant N stations, les stations ayant deux à deux un trafic T_{xy} . Tout le trafic passe par un point central qui est le satellite.

Allant à Partant de	St1	St2	St3	-----	StN
St1	0	T12	T13	-----	T1N
St2	T21	0	T23	-----	T2N
St3	T31	T32	0	-----	T3N
-	.	.	.	-----	
-	.	.	.	-----	
-	.	.	.	-----	
-	.	.	.	-----	
StN	TN1	TN2	TN3	-----	0

Ce trafic entre les N stations St1, St2 ... StN peut être mis sous forme de matrice ou T12 est le trafic partant des stations St1 et allant sur les stations St2, T21 est le trafic partant de la station St2 et allant sur la station St1. En téléphonie $T21 = T12$. Ce n'est pas le cas en transmission de données. Tout ceci étant vrai pour tous les trafics T_{xy} et T_{yx} entre deux stations X et Y de l'ensemble N.

Une possibilité (n°1) pour réaliser les communications entre ces stations est que chaque station transmette une porteuse vers les autres stations ce qui fait $N(N-1)$ porteuses à émettre et à recevoir pour l'ensemble des N -stations.

Une autre possibilité (n°2) la plus classique, est que chaque station émette une seule porteuse, la réception de ces $N-1$ porteuses reste à faire dans chaque station. Dans ce cas on a N porteuses émises et $N(N-1)$ récepteurs dans les systèmes. Le trafic total est reçu dans chaque station ce qui, dans le cas de trafics équilibrés, revient à élargir la bande des récepteurs de chaque porteuse entraînant une augmentation de la taille de l'antenne de réception sol par rapport au cas n°1. Par contre, à l'émission l'emploi d'une seule porteuse dans l'émetteur permet de réduire la puissance des émetteurs des stations sol dans un rapport de l'ordre de 2.

Enfin, une troisième possibilité (n°3) est de synchroniser toutes les N -stations qui utilisent une seule porteuse à tour de rôle. Cette disposition s'appelle AMRT (*Accès Multiple par Répartition dans le Temps*).

Dans ce cas, on gagne un coefficient 2 sur la puissance à bord du satellite, mais la puissance instantanée de chaque station est multipliée par N par rapport au cas précédent n°2 et $N/2$ par rapport au cas n°1. La taille de l'antenne de réception est 1.4 fois plus petite que celle du cas n°2. Par contre, il n'y a qu'un émetteur par station et qu'un récepteur mais un système de synchronisation délicat dans chaque station.

Dans un système avec traitement bord dans le satellite, chaque station émet une seule porteuse et reçoit une seule porteuse. La porteuse reçue ne comporte que les informations utiles à la station et la bande étant réduite, la taille de l'antenne de réception peut être réduite, pour les mêmes PIRE disponibles dans le satellite, d'environ 30 % par rapport au cas n°1, ce qui n'est pas considérable. Mais dans ce cas, il n'y a qu'un petit émetteur et qu'un récepteur par station, soit une réduction considérable du coût total des stations par rapport au cas n°1. Par rapport au cas n°2, le gain en matériel est également très important. Par rapport au cas n°3, la réduction des puissances d'émission, de taille d'antenne et de simplicité du système sol fonctionnant en continu et non en impulsion réduit également le coût des stations.

Lorsque le satellite possède un nombre P de couvertures et que toutes ces couvertures ont du trafic entre elles, il faut soit que chaque station émette une porteuse en direction de chaque couverture, soit que l'on effectue un traitement bord.

- Dans le premier cas, le satellite doit être équipé d'au-moins P^2 filtres démultiplexeurs, en prenant l'hypothèse que tous les trafics de spot à spot sont du même ordre de grandeur. Sans réutilisation des fréquences entre les spots, on peut vérifier qu'il n'est pas possible d'avoir $P > 4$ en utilisant des filtres hyperfréquences, dans les bandes 6/4 et 14/12 GHz. Ce nombre P peut monter dans le cas de réutilisation des fréquences. La pratique se situe autour de $P=6$ au maximum.

L'utilisation de filtres hyperfréquences, en-dehors des considérations de poids, impose une répartition du trafic entre les spots qu'il est quasi impossible de faire varier.

- Dans le deuxième cas, on effectue un traitement à bord. Celui-ci peut prendre diverses formes avec ou sans démodulation bord.

Sans démodulation

Il est possible de passer à des fréquences intermédiaires où les filtres sont moins lourds et surtout où les bandes peuvent être réduites. Différents modèles existent utilisant soit des filtres à onde de surface permettant de faire varier les bandes utiles affectées aux différentes couvertures, soit des filtres numériques. C'est le cas du satellite INMARSAT III. Ce traitement est appelé "*traitement bord transparent*".

Avec démodulation

La démodulation peut se réduire à une fraction plus ou moins importante du trafic, voire se limiter à la signalisation. Dans ce domaine, l'ESA suit une voie exigeant des stations sol une synchronisation contraignante. INTELSAT aborde une voie plus libérale avec des démodulations bord complexes. Il existe d'autres voies. Les études à faire dans ce domaine sont nombreuses. A priori, étant donné la grande diversité des situations géographiques et de types de trafic, les solutions les plus évolutives et adaptatives sont a priori les plus prometteuses. Ceci peut être obtenu en effectuant le plus tôt possible la numérisation à bord du satellite. Une fois numérisés, les signaux subiront le traitement numérique approprié à leur modulation. Ce traitement numérique doit être fait de telle sorte qu'il puisse s'adapter au trafic et à la modulation.

Ceci impose une télécommande des microprocesseurs embarqués. Là aussi beaucoup de travail reste à faire pour optimiser les charges utiles du futur tout en tenant compte de l'optimisation des stations sol. Signalons que tout le trafic non soumis à de fortes fluctuations peut être traité en transparent.

Nous concluons ce paragraphe sur la technologie des charges utiles en soulignant l'importance de l'arrivée du numérique : un démodulateur analogique représentait un tiroir complet il y a quelques années. La MMIC et les ASIC avec l'amélioration des vitesses de microprocesseurs laissent envisager la réalisation d'un démodulateur numérique en quelques VLSI, et, suivant le type de modulation en un seul VLSI. Ce qui était impossible il y a quelques années devient possible aujourd'hui et sera indispensable demain. Signalons que les circuits à développer seront également utilisés dans toutes les stations fonctionnant avec le satellite.

(♦ *Références N°4* ♦)

1.2.1.2. Les satellites géostationnaires de télécommunications

1.2.1.2.1. Généralités

Les charges utiles évoquées précédemment varient en masse et consommation dans des proportions assez importantes suivant les types de services. Les charges utiles peuvent, pour les plus simples, ne comporter que quelques canaux, dans le cas, par exemple, de pays à faible trafic. Le cas des satellites très volumineux sont ceux correspondant aux missions internationales ou multinationales ou ayant plusieurs missions sur le même satellite.

- ❑ On peut ainsi identifier un très grand nombre de satellites géostationnaires avec une masse au lancement entre 1400 et 2500 Kgs.
- ❑ Mais d'autres missions font apparaître le besoin de satellite d'environ 900 Kgs compatibles des lancements Ariane 4 avec Spelda Ultra court.
- ❑ Des satellites lourds de près de quatre tonnes avec des charges utiles de l'ordre de 700 Kgs compatibles avec la capacité maximale d'ARIANE 44L correspondent aux missions les plus importantes.

1.2.1.2.2. En Europe deux types de plate-forme sont les plus utilisés : Les plates-formes SPACEBUS et les plates-formes EUROSTAR

Les SPACEBUS sont des plates-formes européennes dont la maîtrise d'oeuvre revient à l'Aérospatiale. Les masses au lancement de ces satellites vont de 1200 Kg pour les Spacebus de type 100A jusqu'à 2000 Kg pour les Spacebus 100B.

Les EUROSTAR sont également des plates-formes européennes dont la maîtrise d'oeuvre suivant le cas est chez British-Aerospace ou chez Matra. Les masses au lancement de ces satellites vont de 1200 Kg pour les Eurostar de type 1000 jusqu'à 2200 Kg pour les Eurostar 2000.

Spacebus 100B est utilisé en particulier pour les satellites EUTELSAT 2 et TURKSAT. EUROSTAR 2000 est utilisé pour le programme TELECOM 2.

Les capacités de ces types de plates-formes ne permettent pas de couvrir les gammes répertoriées en 1.2.1.2.1 et de nouvelles plates-formes doivent être développées pour tenir compte en particulier des futures capacités d'ARIANE 5.

Signalons que les Italiens ont développé leur propre plate-forme pour le satellite ITALSAT comme les Allemands pour leur satellite DFS-KOPERNIKUS.

1.2.1.2.3. Le marché et la situation présente ont incité ALCATEL et AEROSPATIALE à développer une nouvelle famille de plate-forme avec les trois objectifs :

Technique : Avoir le rapport masse charge utile à la masse de la plate-forme le plus fort possible de l'ordre de 0.4.

Coût : Réduction des coûts de 30 % de ceux existants (à masse comparable).

Calendrier : Organiser la production d'un satellite en 30 mois.

Les exigences de ce programme sont résumées dans le tableau suivant :

TYPE DE MISSION	SATELLITE GEOSTATIONNAIRE
PARAMETRES DE L'ORBITE GEO	LONGITUDE $\pm 0,05^\circ$ LATITUDE $\pm 0,1^\circ$
MASSE CHARGE UTILE ERGOLS AU LANCEMENT	DE 100 KG à 700 KG DE 700 KG à 2270 KG DE 1200 KG à 4200 KG
PUISSANCE GENERATEUR SOL- AIRE ELECTRIQUECHARGE UTILE ECLIPSE	6000 W 4500 W 5500 W
PRECISION DE ROULIS POINTAGE TANGAGE LACET	< 0,1° < 0,1° < 0,2°
DUREE DE VIE	10 ANS AVEC DES MARGES NOMINALES (LANCEMENT DEPUIS KOUROU ET CAP KENNEDY)
DUREE DE STOCKAGE	15 ANS SANS MARGE (LANCEMENT DEPUIS KOUROU)
FIABILITE	0,9 POUR 10 ANS DE DUREE DE VIE
LIMITATION PERTE D'ATTITUDE	LIMITEE A QUELQUES SECONDES POUR TOUS MODES DE PANNE DU CONTROLE D'ATTITUDE
MODE SECOURS	INDISPONIBILITE INFERIEURE A 50 MIN- UTES

L'ensemble des exigences résumées dans ce tableau entraîne les obligations suivantes au niveau des sous-ensembles et tout particulièrement :

- la même conception de l'architecture électrique et informatique pour tous les "membres" de la famille,
- le même concept de base pour l'architecture mécanique,

- une standardisation très poussée de tous les éléments communs conçus et réalisés pour tenir les spécifications imposées par le "membre" dimensionnant,
- la suppression ou la réduction des adaptations spécifiques réclamées par les différents membres,
- une adaptabilité simple et rapide des éléments demeurant spécifiques à chaque "membre".

A titre d'exemple, la conception des réservoirs modulaires est telle que le fonctionnement du système de propulsion n'est pas lié à un ratio de remplissage pénalisant.

NOTA : La présentation faite dans ce paragraphe est limitée aux travaux qu'entreprennent ALCATEL et Aérospatiale. Il est probable que le groupe Matra/British-Aerospace ou d'autres groupes en Europe ait une politique similaire dans ce domaine.

1.2.1.2.4. Cas des mini satellites géostationnaires

En deçà de la gamme prévue de 1200 kgs à 4200 kgs, il est très raisonnable de penser qu'un créneau existe pour les satellites de masses 900 kgs environ. Cette classe de satellite correspond à la "SDS" classe (*Spelda Dedicated Satellite*) offerte par ARIANE en lancement double à l'intérieur de la structure Spelda ultra courte à des prix très compétitifs.

Dans ce domaine également Aérospatiale et Alcatel étudient et proposent un satellite allégé dérivé du Spacebus 100A offrant des durées de vie de plus de 10 ans pour des masses de charges utiles pouvant atteindre 100 kgs.

Ce développement s'appuie sur des principes de conception à coûts objectifs plus faibles associant des méthodes de gestion et de contrôle moins lourdes mais suffisantes.

1.2.1.2.5. La propulsion ionique

- Les moteurs ioniques sont en cours de développement en Allemagne (MBB) au Japon et aux USA mais pas, à notre connaissance, en France.
- Le programme ELITE (*Electric Insertion Transfer Experiment*) est prévu pour 1996. Il démontrerait la possibilité de passer à l'orbite géostationnaire sans l'utilisation d'un moteur auxiliaire. Ce programme s'effectue en coopération entre TRW et l'AIR FORCE. Toutefois, le financement de ce programme ne paraît pas finalisé.
- Aérospatiale a étudié pour des missions précises, en particulier pour INTELSAT VII, l'intérêt de la propulsion ionique, non pour le transfert d'orbite, mais plus modestement pour le maintien en position orbitale. La conclusion de cette étude montre une augmentation de la masse sèche de l'ordre de 20 %. Ceci correspond à un satellite de 3570 kg de masse au lancement, de 438 kg de charge utile et d'une durée de vie de 15 ans. Cette amélioration de 20 % de la masse sèche n'est certainement pas vraie pour tous les satellites.
- Un problème critique pour la propulsion ionique, indépendamment de la durée de vie des moteurs ioniques, est le problème de la pollution du satellite lui-même par ses ions non parfaitement neutralisés. Il semble qu'une mission expérimentale devrait être faite avant toute décision d'emploi pour un satellite opérationnel, c'est ce que prévoit de faire le satellite expérimental ARTEMIS de l'ESA.

(♦ *Références N°5* ♦)

1.2.1.2.6. Précision d'attitude des satellites

Plus les satellites utiliseront des pinceaux fins sur les stations terriennes, plus la précision de pointage des antennes doit être grande. On a déjà parlé d'antenne de satellite ayant une couverture terrestre de 1000 kms de diamètre et correspond à des gains d'antennes de l'ordre de 40 dB avec une ouverture d'antenne de l'ordre du degré. Lorsque l'on monte en fréquence par exemple à 20 GHz, il est possible d'améliorer les gains d'antennes et les tailles des spots sont réduites dans un rapport d'au moins deux sans difficulté, et éventuellement, beaucoup plus.

L'ouverture angulaire des antennes étant réduite, les précisions de pointage de ces antennes devront être plusieurs fois meilleures que celles utilisées à ce jour. Ceci impose toute une analyse pour améliorer l'attitude du satellite, mais aussi ses

déformations en fonction de la position du soleil. En particulier, les systèmes de pointage stellaire seront utilisés en conjonction avec les systèmes plus classiques par l'intermédiaire du calculateur de bord.

Le programme ARTEMIS de l'ESA prend en considération différents aspects de ce problème de précision d'attitude des satellites.

1.2.1.3. Rappel sur les lancements

Comme déjà signalé au début de cette expertise l'Europe, grâce à Ariane Espace, a été capable d'être en position de leader dans un domaine où les USA avaient un monopole. Nous examinerons les raisons historiques de cette perte de maîtrise des lancements commerciaux. Sans vouloir empiéter sur le domaine de l'expertise de M. POGGI, nous signalerons également les avantages que l'on peut tirer d'ARIANE 5 en signalant la place des autres lanceurs dans le monde.

1.2.1.3.1. La navette américaine SHUTTLE et les lanceurs conventionnels américains

En 1960, les USA, considérant que les fusées pour lancer les satellites étaient chères, envisagèrent de faire des fusées réutilisables afin de réduire les coûts de mise en orbite. Cette idée très louable s'est progressivement transformée en un programme beaucoup plus ambitieux, celui d'un véhicule spatial capable de partir du sol et emmenant dans sa soute une très grande quantité de satellites, le tout piloté, ou pour le moins, accompagné par des cosmonautes.

En tenant compte de la fiabilité requise pour des vols habités, la facture de ce programme est devenue excessive, tout particulièrement au goût du congrès américain qui demanda aux constructeurs de faire un choix : soit vous faites le SHUTTLE mais on arrête le financement des fusées classiques, soit vous réduisez les coûts du SHUTTLE et l'on continue le financement des fusées classiques. Ces mêmes constructeurs U.S, considérant qu'il n'était pas possible de réduire les coûts du SHUTTLE, mais surtout très confiant dans les vertues de ce Shuttle, abandonnèrent les fusées classiques au grand désespoir d'ingénieurs américains parfaitement au courant des risques pris. Cette décision U.S. eut un effet en Europe où certains esprits considérèrent qu'il était vain de tenter le développement d'une fusée européenne qui serait obsolète à sa naissance, le shuttle ayant des prix de mise en orbite défiant toute concurrence. Heureusement, l'Europe, contre ces esprits chagrins, continua le développement d'ARIANE.

Signalons que les années 1960 sont différentes des années 1990.

Aujourd'hui l'Europe s'est engagée sur un programme ARIANE 5. Elle étudie des programmes de vols habités dont ARIANE 5 sera le vecteur de lancement initial, c'est à dire qu'ARIANE 5 a été optimisé pour le maximum de masse en orbite basse. En effet, ARIANE 5 est capable de mettre 23 tonnes en orbite basse de parking.

Ceci est à comparer aux possibilités de mise en orbite basse d'ARIANE 4 qui se situent aux environs de 6 tonnes³⁾. On ne peut qu'apprécier cette remarquable performance d'ARIANE 5.

Toutefois, quand on compare les 6,9 tonnes de masses possibles en GTO d'ARIANE 5 avec les 4,4 tonnes d'ARIANE 4, il paraît évident qu'ARIANE 5 n'a pas été optimisé pour les lancements en orbite géostationnaire et sa compétitivité dans ce genre de service en souffrira éventuellement.

Il est difficile de tout concilier et ARIANE 5 est réputée capable de lancer HERMES. Nous verrons par la suite que les satellites basses orbites ont un grand avenir devant eux, et, ARIANE 5 peut, peut être, être adaptable à ces nouvelles générations. Mais ceci est du domaine de l'expertise de M. POGGI.

1.2.1.3.2. Les avantages apportés par ARIANE 5

La nouvelle génération de lanceurs (*Ariane 5 TITAN IV*) arrivera sur le marché alors même que la capacité d'ARIANE IV sera encore suffisante.

Toutefois ARIANE 5 apporte des avantages essentiellement de 3 ordres :

- Augmentation des masses au lancement
- Augmentation des dimensions de coiffes :
 - volume
 - diamètre
- Eventuelle réduction des coûts de lancement.

L'évaluation précédente des missions de Télécommunication montre que les besoins ne s'étendent pas, pour l'instant, au-delà de satellites de 4200 Kgs.

3) Ces 6 tonnes ont été imposées par des limitations de diamètres possibles à réaliser.

La pleine capacité d'ARIANE 5 ne présente donc pas à priori l'occasion de développement de plates-formes adaptées à ce cas de figure. Mais le potentiel existe.

Toutefois les avantages d'ARIANE 5 seront obtenus par les quatre points suivants :

Lancements doubles

Le principal avantage offert par ARIANE 5 réside dans sa capacité à offrir des lancements doubles pour des satellites de la classe 4200 Kgs (ARIANE 44L) avec un potentiel de croissance pouvant aller jusqu'à 4500 Kgs.

La masse maximale initialement permise pour un lancement double était avec Ariane 44L de 2800 Kgs.

On constate donc que l'ensemble des membres de la nouvelle famille de plates-formes présentée précédemment devient compatible de lancements doubles avec Ariane 5.

Augmentation des dimensions des coiffes

Ce nouvel avantage affectera essentiellement la configuration des antennes, des appendices divers.

De nouvelles possibilités sont offertes pour permettre des antennes à réflecteurs déployables rigides jusqu'à 4 mètres de diamètre et éventuellement des supports de sources externes à la plate-forme si nécessaire.

Avantages économiques

Les satellites de masse supérieure à 2800 Kgs devraient tirer un double avantage économique.

- Celui tiré des coûts de lancements Ariane 5 réputés être à la baisse.
- Ajouté à celui du lancement double maintenant possible jusqu'à 4500 Kgs.

Justification du développement de la nouvelle famille de plates-formes

On peut constater l'adéquation des exigences de développement de la nouvelle famille de plates-formes aux caractéristiques d'Ariane 5 pour couvrir les besoins des nouvelles missions de télécommunications au-delà de 2005.

1.2.1.3.3. Les autres lanceurs commerciaux

USA

Les lanceurs USA présentent d'entrée l'inconvénient d'être lancés d'un site situé à une latitude plus élevée que Kourou les pénalisant a priori sur la durée de vie (*à masse au décollage égale*).

A ce jour, seuls les lanceurs ATLAS de General Dynamics et Delta de Mc Donald Douglas peuvent être compétitifs pour des satellites de masse (*max : 1600 Kgs*) et d'encombrement réduits.

Les lanceurs TITAN ne sont pas commercialisés.

Les lancements DELTA et ATLAS ne peuvent envisager des lancements doubles de satellites de Télécommunication (*sauf pour des mini satellites*).

Des développements sont en cours pour augmenter les potentiels d'ATLAS et DELTA en performance et en volume sous coiffe.

Ces développements sont difficiles (*échec du dernier Atlas*), et apportent peu d'augmentation de potentiel pour un prix relativement élevé.

URSS

Les Russes sont prêts à commercialiser 2 lanceurs et tout particulièrement le lanceur PROTON qui a la capacité de mettre directement en orbite géostationnaire des satellites de masse 2.2.T. ce qui est considérable du fait des quantités réduites d'ergols nécessaires pour le satellite. Il a également l'avantage de ne pas nécessiter d'opérations de mise à poste au niveau satellite. Ce lanceur est très fiable.

Les prix proposés sont très attractifs. Mais les conditions politiques ne semblent pas encore réunies.

CHINE

La Chine essaie également de forcer le marché avec ses fusées LONG MARCH 2 et 2E. Les prix proposés sont très attractifs, mais les développements sont difficiles, la transparence rare, les services de lancement inexistant et la fiabilité mauvaise. Les conditions politiques ne semblent pas non plus réunies.

De plus, les capacités du LONG MARCH 3 sont réduites de l'ordre de 1500 kgs et le LONG MARCH 2 nécessite un moteur de périgée très pénalisant.

JAPON

Le Japon cherche délibérément à se placer progressivement. Mais pour l'instant il n'est pas dans la course et fait lancer ses satellites (*avec peu de chance*) par les Européens. De plus, il souffre terriblement de règlements intérieurs qui empêchent les lancements pendant de longues périodes de l'année ce qui a un aspect très négatif pour les lancements commerciaux.

AUSTRALIE

Un projet existe de lancer le lanceur soviétique ZENITH depuis un site australien. ZENITH est une fusée entièrement automatique pouvant mettre directement en orbite géostationnaire 1,8 Tonnes à prix attractif.

Ce projet pourrait être concurrentiel s'il finissait par voir le jour dans un nouveau contexte politique.

1.2.1.3.4. Mini lanceurs

A ce jour, il n'existe aucun mini lanceur européen permettant de lancer les petits satellites de façon flexible, à la demande.

Ce besoin semble se faire surtout pour les orbites basses mais serait également utilisé pour des mini géostationnaires.

Un tel lanceur d'une capacité de 1000 kgs en orbite basse et 500 kg en géostationnaire (*de mise en oeuvre rapide et simple*) semble nécessaire.

Signalons que les USA sont en train de mettre au point un lanceur PEGASUS, plutôt orienté vers les orbites basses.

1.2.1.4. Les équipements sol

1.2.1.4.1. Introduction

Parallèlement au développement des charges utiles et de leurs performances, les stations terriennes ont subi des mutations importantes, à la fois en capacité et en coût, mais aussi dans la diversité de leurs applications.

On distingue :

- les stations dites internationales, principalement destinées à assurer les télécommunications téléphoniques entre continents et son pays, voire le secours de câbles sous-marins,
- les stations dites domestiques, principalement destinées au désenclavement des villages ou villes des pays en voie de développement,
- les stations de télévision et réception TV ou Audio,
- les stations mobiles.

Nous évoquerons, pour mémoire, le problème des stations de contrôle.

1.2.1.4.2. Domaine des stations internationales

Les caractéristiques techniques des stations internationales sont définies par INTELSAT.

Il y a encore 5 ans, la majorité des stations internationales utilisaient des antennes de très grande dimension (32 m), ces stations utilisant pour la plupart des systèmes de transmissions analogiques, le prix moyen d'une station équipée variait entre 50 et 100 MF.

De nos jours, l'évolution des spécifications d'INTELSAT permet maintenant de réaliser des stations utilisant des antennes d'un diamètre bien plus faibles : 16 à 21 m, voire 13 m.

En outre, ces mêmes stations utilisent des systèmes de transmissions numériques à 2, 8 ou 45 Mbit/s, suivant la norme IDR "Intermediate Data Rate" d'INTELSAT. Ces équipements sont capables, grâce à des systèmes de traitement des silences et de codage de la parole, de transporter quelques 150 voies téléphoniques sur une seule porteuse de 2 Mbit/s : DCM "Digital Circuit Multiplication Equipment".

Dans le même temps, les équipements Radio ont vu leur prix baisser de façon significative, le contrôle des stations être assisté par ordinateur, etc ... De ce fait, le prix moyen d'une station INTELSAT "STANDARD A" est maintenant tombé entre 20 et 50 MF.

1.2.1.4.3. Les stations domestiques

Les stations domestiques sont utilisées dans deux applications principales :

- les liaisons hautes/moyennes capacités interurbaines,
- les stations dites de distributions téléphoniques des zones à faible population.

Les liaisons interurbaines

Là aussi l'introduction de technologies numériques de type IDR permet maintenant de répondre à moindre coût aux besoins des liaisons interurbaines, que celles-ci soient en liaison point à point, ou en liaison multi-destinations (*4 destinations par terminal*). Bien que théoriquement avantageuse, l'utilisation de systèmes DCME demeure encore marginale dans ces types de réseaux.

Elles consistent soit à utiliser une porteuse faible capacité par liaison téléphonique (*SCPC : Single Channel Per Carrier*), et éventuellement, à allouer une paire de voies par communication entre deux stations, permettant ainsi une allocation des voies permanente ou à la demande, et un maillage du réseau (*une station pouvant dialoguer avec différentes stations sur des canaux différents*). Cette technique a été abondamment utilisée jusqu'à présent, en utilisant des principes de transmission analogiques (FM), chaque paire de porteuses véhiculant une communication téléphonique entre deux stations. Cependant, l'introduction de techniques de modulation et démodulation numérique de porteuses, associées à des codages de compression de parole a permis, dans un premier temps, de mettre en oeuvre des canaux numériques SCPC à 32 kbit/s (*au lieu de 64 kbits*). En outre, les performances de plus en plus prometteuses des processeurs de traitement de signal permettent de construire des solutions d'avenir économiques, avec des codages de parole et de Fac Similé à 16 kbit/s.

1.2.1.4.4. Domaine des stations d'entreprise

Grâce à la libéralisation de l'accès satellite aux USA, à la surcapacité satellite disponible, à l'instabilité des tarifs qui a suivi la division de AT&T et la création des RBOC, les télécommunications privées par satellite ont trouvé un terrain très favorable

à leur développement. De ce fait et après quelques péripéties de mise au point de la technologie VSAT, péripéties qui ont résulté en la disparition ou le rachat par des opérateurs de la majorité des sociétés s'étant engagées dans le développement des produits VSAT nécessaires, le marché a connu une forte croissance. Cette dernière permet aujourd'hui aux concurrents américains survivants de s'assurer une prédominance mondiale incontestée, en particulier : HUGHES (*après rachat de MIA-COM*), AT&T (*après rachat de TRIDOM*).

Les systèmes VSAT utilisent une station centrale qui assure le contrôle du réseau et un nombre plus ou moins important de micro-stations organisées le plus souvent en sous-réseaux indépendants. Aujourd'hui, la technologie permet principalement le transfert de données entre les micro-stations elles-mêmes et/ou avec la station centrale⁴⁾ où sont connectés les terminaux, calculateurs, serveurs de l'utilisateur. L'établissement des communications est bien entendu transparent pour l'utilisateur qui ne "voit" pas la différence entre l'établissement d'une liaison terrestre (*quand elle existe*) et l'utilisation du satellite (*protocoles de type IBM ou CCITT X.25*), si ce n'est au niveau de son coût d'exploitation.

En fait, le développement de la technologie repose sur deux aspects clef :

- Le prix de revient d'une station VSAT, qui pour être compétitif nécessite d'être produit en quantité, et la disponibilité de composants hyperfréquence (*radio*) très intégrés. A ce jour, la majorité des équipements radio proviennent d'Extrême-Orient, et mettent en oeuvre des circuits intégrés AsGa (MMIC). La production atteint environ 1000 par mois pour le leader américain, et le prix de vente d'une station varie de 50 kF à 100 kF suivant les pays et les quantités.
- La maîtrise du logiciel système, des passerelles entre protocoles de transmission de données des utilisateurs et du protocole satellite. Le développement et la mise au point du logiciel d'un système VSAT fut la cause principale de la disparition des pionniers du VSAT.

A court terme, on peut distinguer deux axes de développement des VSAT :

- Le développement VSAT avec l'introduction des services supplémentaires tels que nouveaux protocoles, la téléphonie de bonne qualité (*aujourd'hui déjà accessible avec des codages de parole à 16 kbit/s voire moins*).
- Le développement des terminaux ciblés pour des applications particulières :

4) *Hub (moyen) selon l'expression usuelle.*

- Faible débit avec des USTA's dont le prix sera encore inférieur à celui d'un VSAT (*Ex.: applications cartes de crédit, télécontrôle, etc ...*).
- Hauts débits, réseaux maillés avec des technologies d'accès permettant un maillage complet du système et permettant d'offrir de la téléphonie de haute qualité, des liaisons RNIS, des transmissions de données et de la visio-conférence (*Ex.: liaisons inter-entreprises*).

A plus long terme, il est nécessaire de franchir une nouvelle étape technologique pour augmenter les performances et réduire encore le coût des stations. Cette étape sera franchie grâce à l'introduction de techniques de traitements à bord du satellite en conjonction avec des stations sol optimisées et miniaturisées.

1.2.1.4.5. Mentionnons pour mémoire les stations de contrôle

Contrôle de la position géographique en orbite et de surveillance de la plate-forme.
 Contrôle des charges utiles, lié au respect des bandes et PIRE des stations sol.

Dans ces domaines, les automatismes remplacent de plus en plus les opérateurs bien que les cas de pannes soient traités par du personnel spécialisé.

1.2.2. Particularités des charges utiles suivant les applications

Tout ce qui a été présenté précédemment n'était spécifique d'aucune application. Dans ce paragraphe, nous allons analyser successivement ces différentes applications possibles des satellites géostationnaires aux Télécommunications.

Nous verrons successivement :

- La transmission de point-à-point, et, point à multipoints interactive, type voix et données.
- La Radiodiffusion et la diffusion des sons et des images.
- Les communications avec les mobiles.
- Les autres applications tels que localisation, radio navigation, détresse et sécurité et les liaisons intersatellites.

1.2.2.1. Transmissions point-à-point - point - multipoints interactives

Ce domaine est le plus ancien et il englobe les satellites internationaux et beaucoup de satellites nationaux.

Les satellites internationaux

Nous avons déjà parlé d'INTELSAT et d'EUTELSAT. Regardons les spécificités techniques de ces deux systèmes internationaux.

INTELSAT offre, à l'aide de ses satellites Atlantiques, Indiens et Pacifiques, la possibilité de réaliser un réseau mondial. Ce réseau mondial est fait avec des stations terriennes qui sont propriété des administrations des pays signataires, et de COMSAT pour les Etats-Unis. Le réseau mondial ne fait pas communiquer deux à deux toutes les stations INTELSAT. Un certain nombre de liaisons par satellite se complètent avec des câbles au sol, ne serait ce que pour éviter les doubles bonds. Il n'existe pas, en général, une couverture d'antenne par pays et les couvertures qu'offre INTELSAT sont généralement partagées par plusieurs pays. Les couvertures en bande C sont grandes et sont, principalement, définies par les problèmes de réutilisation de ces bandes de fréquences.

L'augmentation du trafic amènera probablement une augmentation du nombre de couvertures et du nombre de réutilisation des bandes. En bande Ku très probablement. En bande C, il est pensable que l'on ne soit pas loin de l'optimum sans traitement bord et que, comme nous l'avons fait remarquer, il serait plus intéressant, soit d'utiliser de nouvelles bandes, soit de réutiliser beaucoup plus la bande Ku, soit d'effectuer du traitement bord, soit de réaliser un panachage de ces possibilités.

INTELSAT continuera de proposer des services nationaux à des pays sans satellite national. A priori cette tendance s'accroîtra et ce besoin doit tendre à augmenter les possibilités d'adaptation des antennes et donc, le nombre de couvertures. Bien évidemment, ce type d'offre devra être évalué et comparé aux systèmes dédiés.

Le marché INTELSAT sera discuté au Chapitre 2, mais a priori, la croissance du trafic INTELSAT amènera à prévoir des évolutions technologiques importantes qui sont dans les axes évoqués précédemment. Augmentation du nombre de couvertures, possibilité de faire varier les couvertures, nouvelles bandes de fréquences, traitement bord soit transparent compte-tenu de la diversité des intervenants, soit avec une technologie bien normalisée, éventuellement de type asynchrone.

EUTELSAT a un trafic très différent de celui d'INTELSAT. La majorité de sa capacité est affectée à la diffusion d'Images de Télévision à travers l'Europe. La faiblesse des réseaux sol des pays antérieurement de l'Est ne va-t-elle pas changer cette répartition ? L'utilisation des VSAT trans-frontières ne va-t-elle pas également changer cette répartition ?

Beaucoup de questions liées à la politique sont évoquées au Chapitre 2. Raisons supplémentaires pour prévoir des satellites EUTELSAT extrêmement "versatiles" dans l'acception anglo-saxonne.

On peut s'attendre donc pour EUTELSAT à des antennes fournissant des couvertures adaptables. A l'intérieur de la communauté Européenne un consensus devrait se faire sur un type de traitement bord et que soit poussé un système complet : charge utile/stations terriennes capables d'offrir des services rentables avec beaucoup de petites stations VSAT. Ce type de service risque d'être offert par un opérateur privé non européen s'il n'est pas offert par EUTELSAT.

Le besoin de transport entre réseaux locaux a très clairement été mis en évidence par les travaux de RACE. Ceci revient à faire entre deux points, ou entre plusieurs points, des liaisons à hauts débits entre des LAN ou des MAN et WAN.

Pour répondre à ce besoin, le satellite devra avoir des antennes directives orientées sur les points voulant communiquer entre eux. Il est souhaitable que pour s'adapter aux besoins, l'orientation des antennes puisse changer : Plus ces antennes seront directives, moins chères seront les stations au sol et l'on doit envisager un très grand nombre de stations terriennes travaillant avec un grand nombre de spots. Ceci ne sera possible que dans des bandes de fréquence élevées, éventuellement au-delà des bandes 11/14 GHz.

Les satellites nationaux

Historiquement, les satellites nationaux aux USA reliaient les centres de transit de la Côte Atlantique avec ceux de la Côte Pacifique. Leur utilisation n'était pas différente de celle des satellites Intelsat. IBM, par la suite, a lancé un programme de liaison entre ordinateurs, programme qui n'a pas été satisfaisant sur le plan commercial : ce programme SBS, similaire au système TELECOM I de transmission à haut débit de données, nécessitait des stations terriennes onéreuses tant sur le plan de la gestion des données que sur le plan radioélectrique.

Aujourd'hui, les communications téléphoniques aux USA sont de moins en moins faites par satellite. Il y a plusieurs raisons dont la principale est liée à l'utilisation de suppresseur d'écho de mauvaise qualité :

En effet, les signaux téléphoniques par satellites doivent parcourir de l'ordre de 80.000 kms ce qui fait un quart de seconde de retard. La réponse à une question d'un abonné a donc une demi seconde de retard ce qui est peu sensible. Mais lorsque les deux abonnés du téléphone parlent en même temps, dans les anciens dispositifs de suppres-

seurs d'échos, la liaison était coupée aussi longtemps que les abonnés criaient : "Allô Allô" de chaque côté de la liaison. La nouvelle génération de supprimeur d'échos ne coupe plus la liaison mais les modifications sont arrivées trop tard, le grand public, pour le moins aux USA, préférant des liaisons téléphoniques sans retard au sol.

Aujourd'hui aux USA, les satellites ont été reconvertis en transmission de programmes de télévision et de programmes radio ainsi qu'en transmission de données à faible débit pour les V.S.A.T. et de plus en plus en transmission de données haut débit de Type T₁.

Les satellites américains ont en général une couverture au sol dite Conus recouvrant la totalité des USA, ainsi que des pinceaux orientés sur la côte Est et sur la côte Ouest. Tous les satellites sont transparents.

Les utilisations des satellites nationaux sont souvent différentes d'un pays à l'autre. En France, TELECOM 1 sera bientôt remplacé par TELECOM 2 qui est partagé entre des applications civiles et des applications militaires. Les applications militaires ne faisant pas partie de cette expertise ne sont pas présentées. Rappelons que TELECOM 1 et 2 ont deux missions civiles :

La première offre des liaisons entre la métropole et les départements d'outre-mer comme les Antilles, Guyane, Saint Pierre & Miquelon, et La Réunion. Ce trafic, à lui seul, justifie l'existence de TELECOM 1 et TELECOM 2. L'autre mission était à l'origine la transmission de données à hauts débits mais l'importance des stations terriennes choisies n'a pas permis d'offrir le service à un prix attrayant. Aussi cette mission a, pour le moment, été réduite. Les services de diffusion des programmes de télévision et de radio occupent la majeure partie des satellites TELECOM 1.

Les Allemands ont fait un satellite national du nom de DFS-KOPERNIKUS. Ce programme qui donnait des inquiétudes à la DEUTSCHE BUNDENPOST est aujourd'hui un grand succès puisque, les deux satellites en opération vont être portés à trois.

Les pays en voie de développement ont eu recours aux satellites pour assurer les premières liaisons téléphoniques entre villes ou villages. Ce fut le cas de l'Indonésie, du Brésil, du Mexique, de l'Inde, des Pays Arabes.

D'autres pays développés tels que l'Australie, le Canada, l'Italie, le Japon, ont également mis en opération des satellites nationaux.

D'autres pays sont sur le point d'avoir leur satellite national comme la Turquie ou l'Espagne, la Thaïlande, la Corée...

Tous ces satellites sont transparents. Parfois ils ont plusieurs missions tel le satellite indien servant aux télécommunications et à la météorologie. La couverture des antennes est la plupart du temps formée d'un seul faisceau couvrant le pays concerné.

L'utilisation de ces satellites est variée suivant les pays : pour les pays en voie de développement l'utilisation principale est la téléphonie. Pour les pays développés, c'est, comme aux USA, l'utilisation en diffusion de télévision et de radio ainsi qu'en réseaux V.S.A.T. et prochainement les transmissions de données à haut débit.

1.2.2.2. La radiodiffusion directe et la diffusion des sons et images

Il faut bien distinguer la notion de radiodiffusion directe et la notion de diffusion :

- Ce qui est appelé radiodiffusion directe par satellite est destiné à fonctionner dans des bandes de fréquence qui ont été réparties entre tous les pays de l'IUT, c'est-à-dire la totalité des pays de notre planète. C'est le cas pour la télévision standard qui a été réglementée par la conférence administrative mondiale dite WARC 77. Ce sera, en 1992, le cas pour radiodiffusion directe de la télévision haute définition et la radiodiffusion des programmes sonores.
- Ce qui est appelé diffusion, de télévision ou de son, est ce qui est fait communément par les satellites, actuellement, en opération alimentant soit des têtes de câble, soit des émetteurs de radiodiffusion et non pas des récepteurs individuels. La diffusion est faite dans les bandes du service fixe et met en jeu normalement au sol des antennes de diamètre important. Les stations du service fixe ont besoin de coordination quand elles sont émettrices. Elles peuvent, à moins de réglementation monopolistique, être utilisées à la réception sans coordination. Lorsque les satellites du service fixe utilisent des tubes de 50 W avec des antennes de bord de 40 dB de gain, les PIRE sont de l'ordre de 54 dBw (*pour une même bande équivalente*). Les satellites de radiodiffusion directe n'ont des PIRE supérieures que de 6 dB. Ceci étant, on reçoit aussi bien les images de diffusion avec une antenne de 80 cm que les images de radiodiffusion directe avec une antenne de 40 cm. ASTRA, en mettant tous ses satellites à la même position orbitale, offre aux particuliers un très grand nombre de programmes dans la bande du service fixe. Ceci explique les difficultés des gros satellites de radiodiffusion TDF, TVSAT, qui ont, non seulement pris des risques technologiques en utilisant des tubes à ondes progressives de 230 watts, mais qui limitent, ipso facto, le nombre

de canaux embarquables sur un même satellite. Qui plus est, le plan de fréquence de la WARC 77 limite à cinq le nombre de canaux par pays et l'offre de cinq canaux ne justifie pas l'investissement d'une antenne de réception individuelle.

Telle est la réalité de la radiodiffusion directe par satellite et celle de la diffusion par satellite. C'est le résultat d'une réglementation mal adaptée, cette réglementation n'étant pas facile à faire dans une ambiance onusienne telle que celle des WARC.

Pour envisager les développements à faire pour la radiodiffusion par satellite, il faudrait être certain des contraintes réglementaires ce qui est difficile de prévoir. Indiquons toutefois ce qui est souhaitable :

□ Pour la radiodiffusion directe, il faut qu'un téléspectateur n'ait à regarder qu'à une seule position orbitale et obtienne un "maximum" de programmes. Il vaut mieux que le téléspectateur ait une antenne de 40 cm au lieu d'une antenne de 80 cm. Est-il possible d'offrir ce service à un prix raisonnable ? Comment le service se compare-t-il avec un service par câble de type Pay per view ? Quelles normes ? Analogue, digitale ? Toutes ces questions sont chaudes et ne peuvent être traitées dans cette expertise, mais, indiquons seulement que le câblage généralisé en fibre optique n'est pas pour demain, et que d'ici son avènement, les satellites peuvent jouer un rôle de première importance dans tous les pays. Tous les satellites de diffusion et de radiodiffusion directe sont transparents. Il paraît raisonnable de ne les faire reconfigurables que dans des cas bien particuliers. Il paraît souhaitable de les faire les plus puissants possibles sans que leur fiabilité soit mise en cause. Afin de diminuer les risques au lancement, il est souhaitable de faire plusieurs satellites colocalisés à la même position orbitale de préférence à un énorme satellite à moins que l'avantage de prix soit vraiment important.

- Le cas de la radiodiffusion directe et de la diffusion de la télévision haute définition mérite toutefois une attention particulière :

Le démarrage de ce service devra coïncider avec la mise sur le marché des grands écrans les plus plats possibles. La bande utile à ce service, si digitalisée, se situera aux alentours de 140 Mbits, ce qui exige de la bande et de la puissance et suivant le type de modulation plus de l'une que de l'autre. La généralisation de ce service impose des recherches de nouvelles bandes de fréquence. Les satellites semblent parfaitement adaptés à fournir ce nouveau service en radiodiffusion directe. Dans le domaine de la radiodiffusion directe en haute définition, une expertise spécifique est à faire mais, indépendamment de tous

travaux d'approfondissement, et quel que soit le type de modulation et de bande, le rôle du satellite paraît de la plus haute importance. Les satellites seront puissants et à large bande et ils continueront à être transparents.

- Mentionnons aussi le satellite collecteur d'images que les anglo saxons appellent NEWS GATHERING. Il faudrait qu'un cameraman, avec un système portable, puisse envoyer vers un satellite ses images alors que le matériel de reportage actuel est lourd et encombrant. Ceci nécessite un pinceau directif de réception du satellite pointé vers ce cameraman, de telle sorte que celui-ci n'ait pas besoin d'un gros émetteur pour envoyer ses images vers le satellite. Que ces images soient directement radiodiffusées en direct, ou qu'elles subissent un double bond pour passer par une régie d'images est de peu d'importance. Il faut un pinceau directif vers le cameraman. Ce besoin impose une antenne spécifique sur le satellite qui n'est pas forcément le satellite de radiodiffusion directe. Le cameraman a besoin d'une voie de service bidirectionnelle ce qui ne demande pas de développement particulier.

1.2.2.3. Communications avec les mobiles

INMARSAT le fait bien : ce service créé à l'origine pour donner aux bateaux la phonie ou le télex suivant, le type d'équipement bord, veut étendre son domaine aux avions et aux mobiles sol. Ce problème nécessite une analyse particulière :

- Les satellites géostationnaires sont mal adaptés aux communications avec les mobiles au sol. En effet, en télécommunications par satellite, il est nécessaire d'avoir la visibilité directe. Un mobile dans une vallée, derrière une maison, n'a pas de visibilité suffisante en direction du satellite en général. En ville, les communications par satellites géostationnaires sont impensables. Aussi a-t-on en étude d'autres types de satellites, dits défilants, qui seront décrits dans un paragraphe spécifique.

Par contre les satellites géostationnaires paraissent bien adaptés aux communications avec les avions. Ce domaine est très important car il est lié également à la sécurité et au contrôle des vols aériens. Les Anglais prévoient d'investir dans les dix années à venir des sommes très importantes et ils ont raison. Tout reste à faire dans ce domaine où les besoins sont énormes.

INMARSAT a donc un grand avenir devant lui à moins qu'une déréglementation ou une concurrence par satellites défilants ne lui coupe un peu les ailes. Pour augmenter ses services, INMARSAT devra encore multiplier ses spots et réutiliser ses fréquences, ce qu'il ne fait pas encore. Ses antennes seront de plus en plus sophistiquées et performantes, le traitement bord qui est actuellement du type traitement bord transparent ira probablement vers la démodulation bord.

La communication avec les aéronefs exige pour tous les services de sécurité l'utilisation de satellites géostationnaires. Ces satellites utiliseront toutes les nouvelles technologies dont nous avons déjà parlées, principalement les antennes réseaux et la démodulation bord.

1.2.2.4. Localisation, radio-navigation, détresse et sécurité, liaisons intersatellites

Les sujets localisation, radio-navigation, détresse et sécurité s'appliquent aux satellites géostationnaires par contre le sujet "Liaisons intersatellites" s'applique surtout aux liaisons satellite géostationnaire/satellite défilant.

- *L'avenir de la localisation* paraît certainement sombre aux actionnaires de LOCSTAR et GEOSTAR. La vision de ceux qui participent à EUTELTRAC ou OMNITRAC est par contre plus optimiste.

Rappelons le contexte : Locstar comme son prédécesseur aux USA a voulu réaliser un satellite spécialisé dans la localisation et la messagerie des mobiles. Malgré une étude de marché démontrant la rentabilité d'un tel projet, les investisseurs n'ont pas suivi et les besoins financiers n'ont pas pu être capitalisés. Pour des services équivalents, Euteltrac utilise un satellite existant, EUTELSAT en l'occurrence. Les stations terriennes sont, peut-être, un peu plus chères mais il n'y a pas les frais d'un satellite dédié. Il paraît très raisonnable de débiter avec un satellite partagé avant que le marché ait clairement été identifié. EUTELTRAC semble amorcer une bonne carrière commerciale.

Signalons que le service de messagerie, a pour EUTELTRAC, une importance aussi grande que le service de localisation.

La navigation a une importance très grande pour les avions. La conjonction de satellites de type GPS avec des satellites de type géostationnaires permet d'offrir

un système de localisation absolument sûr. Ce domaine est appelé à un développement important, et, éventuellement s'étendra au contrôle du trafic aérien régional.

Les européens doivent ils créer un troisième dispositif de localisation en plus de GPS et GLONASS ? Il est regrettable qu'ils ne participent pas à ces programmes mais la raison militaire peut éventuellement engendrer un programme national ou européen de cette espèce : quand on se rend compte de la simplicité d'emploi des récepteurs GPS on peut envisager beaucoup d'applications militaires et civiles. Les systèmes de détresse seront vus à propos des satellites défilants.

- *Les liaisons intersatellites* pourraient se justifier dans les systèmes géostationnaires. Du côté militaire, ils évitent des relais au sol dans des zones insuffisamment protégées. Du côté civil, le système Intelsat pourrait réduire l'investissement sol en reliant des satellites voisins, soit entre deux satellites Intelsat, soit entre un Intelsat et satellite domestique. Les propositions faites à Intelsat dans ce domaine ont souverainement été rejetées. Elles sont peut être vraiment sans intérêt, mais Intelsat ne possédant que les satellites n'a que faire des investissements au sol.

Du côté du rapatriement des données des satellites basse orbite en temps réel ou quasi réel, les liaisons interorbitales ont beaucoup d'applications militaires. Du côté civil, les liaisons permanentes avec des missions habitées semblent indispensables. Même si dans les vols habités les cosmonautes sont remplacés par des robots, le contrôle de ces robots paraît tout autant nécessaire que celui des humains. Les liaisons interorbitales civiles et militaires sont importantes. La question de la technologie à employer pour le rapatriement des données dépend des débits de ces données. V.W.S. CHAN dans le LINCOLN LABORATORY JOURNAL Automne 88 vol 1, N° 2, compare les poids des différents systèmes entre eux. Le laser est plus léger que les systèmes à 60 GHz pour des débits supérieurs à 200 Mbits. Les besoins recensés à ce jour avec les enregistreurs prévus du futur sont plus près de la vingtaine de mégabits. Toutefois, sans enregistreur tampon ce sont des débits de 1 Gbit qu'il faut rapatrier. Il faut alors redescendre du satellite géostationnaire relais en débit de 1 Gbit dans la bande des 20 GHz. Les liaisons optiques se justifieraient dans le cas où l'on voudrait éliminer les enregistreurs tampons des satellites défilants, ce qui n'est pas forcément la solution la plus économique. Les systèmes à 60 GHz sont beaucoup plus simples et donc moins chers que les systèmes optiques qui ne doivent être utilisés que lorsque l'on ne peut faire autrement. Signalons que les bandes 2 et 23 GHz sont envisagées dans le programme DRS de l'ESA.

1.3. TELECOMMUNICATIONS PAR SATELLITES DEFILANTS

1.3.1. Présentation générale

L'arrivée des satellites géostationnaires pour les télécommunications apparut décisive et élimina beaucoup de projets par satellites défilants de l'époque. Il peut paraître surprenant que des projets puissent s'entreprendre à l'aide de satellites défilants plus de trente ans après l'arrivée des géostationnaires.

On peut donner *deux raisons fondamentales* à ce regain d'intérêt des orbites non géostationnaires.

La première est liée au coût de la mise en orbite géostationnaire : Prenons le cas d'ARIANE 5 pouvant mettre en basse orbite 23 tonnes. En orbite GTO il peut mettre 6,9 tonnes auxquelles il faut retirer le poids des moteurs d'apogées avec leurs carburants. La comparaison des masses mis en orbite met en évidence un ratio de coût de l'ordre de 6 entre le prix du kilo de charge utile en orbite base et celui en orbite géostationnaire. Ce chiffre est probablement plus fort avec ARIANE 5 que pour d'autres lanceurs mais il reste en tous cas élevé.

Le coût des lancements étant du même ordre de grandeur que celui des satellites, on comprend l'intérêt des orbites basses.

La seconde, qui a plusieurs conséquences importantes, est liée à la distance entre le satellite et les stations terriennes : dans le cas des orbites basses cette distance est environ 30 fois plus faible que pour les orbites géostationnaires. La perte de propagation est 1000 fois plus faible (30 dB) dans le cas des orbites basses, ceci ne s'appliquant pas aux orbites elliptiques.

Il est donc possible de réduire considérablement les coûts, soit des stations terriennes, soit des satellites soit des deux. *Une conséquence très importante* de la proximité satellite/station terrienne est *la réduction du retard de propagation* dans ce même rapport 30, ce qui élimine certaines critiques contre les satellites géostationnaires.

Tous les avantages sont à ce point importants qu'on pourrait se demander par quelle aberration on a utilisé jusqu'à ce jour des satellites géostationnaires. On ne trouvera qu'une partie de la réponse dans ce qui suit :

Les satellites défilants possèdent par contre quelques inconvénients dont le principal est "qu'ils défilent", c'est-à-dire que par rapport à la terre, ils se déplacent. Un seul satellite ne peut assurer à lui seul une couverture permanente dans une zone terrestre. Toutefois

plusieurs de ces satellites, une constellation mise sur des orbites appropriées peut soit effectuer une couverture permanente d'une zone ou de zones terrestres, soit effectuer la couverture terrestre totale.

1.3.2. Les applications possibles des satellites défilants aux télécommunications spatiales

Ces satellites ont de nombreuses applications, certaines historiques, d'autres d'une actualité immédiate :

- Les satellites défilants ont été surtout utilisés par l'URSS et les USA pour des applications militaires et pour des applications civiles de télécommunications point à point.
- Les services de sécurité et de détresse utilisent également des satellites défilants.
- Comme nous l'avons déjà évoqué les systèmes GLONASS et GPS de localisation utilisent des satellites défilants, de même que les prédécesseurs de ces systèmes, tel TRANSIT.
- Des projets sont en cours de gestation pour réaliser des services pour Mobile et pour des services de téléphone portatif à l'échelle mondiale. C'est là que se situe l'activité immédiate.

Ces types de services sont détaillés par la suite.

(♦ *Références N°6* ♦)

1.3.2.1. Les services de télécommunications point à point par satellites défilants utilisent pour la plupart des orbites elliptiques dites HIEO (*Highly Inclined Elliptical Orbit*).

Ces orbites sont du type MOLNYIA avec une période de 12 heures et du type TOUNDRA avec une période de 24 heures.

Ces orbites sont particulièrement intéressantes pour les pays près des pôles. L'orbite est une ellipse de forte excentricité dans un plan incliné de 60° environ, par rapport au plan de l'Equateur. Le périégée se trouve dans l'Hémisphère Sud et a une altitude de l'ordre de 5000 km, l'apogée aux environs de 35000 km au-dessus de l'Hémisphère Nord.

Ces satellites tournant dans le même sens que la terre restent pendant une longue durée pratiquement à la verticale d'une zone dans le cas du 24 heures, de deux zones dans le cas du 12 heures. Ces zones englobent des latitudes comprises entre 20° et 80° Nord pour les 12 heures et sont beaucoup plus larges dans le cas des 24 heures.

La visibilité sur ces zones atteint de l'ordre de 8 heures pour les orbites de 12 heures ce qui impose dans ce cas d'avoir trois satellites opérationnels dans trois plans différents pour obtenir une couverture permanente d'une zone déterminée. Dans le cas des 24 heures, deux satellites peuvent suffire.

A l'origine, les satellites étaient utilisés pour des services téléphoniques. Ils étaient bien adaptés aux pays nordiques qui voient les satellites géostationnaires sous une élévation très faible. Au-delà de 70° Nord, les satellites géostationnaires ne sont plus utilisables.

Signalons que ces orbites HIEO ont été reprises par de nombreux projets tous plus ou moins similaires : MBB a proposé le projet LOOPUS. L'ESA a proposé ARCHIMEDES, le CNES a également un projet SYCOMORES. Le but était de faire un système pour les télécommunications avec les mobiles pour la zone européenne, ou Europe + USA + ASIE.

Ces satellites HIEO proposés sont en vue des mobiles avec de fortes élévations permettant de réduire les effets de masque par le terrain et les constructions. Ils sont donc très intéressants pour les communications avec les mobiles terrestres. Ces projets sont coûteux et doivent être comparés à d'autres solutions avant d'en décider leur réalisation. Certains de ces projets offrent en plus des services de messagerie, de "PAGING" et de téléphonie, un service de localisation à l'aide de plusieurs satellites. Signalons que les satellites HIEO sont mal adaptés à un lancement ARIANE 4.

1.3.2.2. Le service de navigation TRANSIT utilise des satellites défilants sur des orbites de 1000 km d'altitude. Ce système a débuté en 1960 et doit finir en 1996. La mesure de l'effet Doppler permet la localisation d'un mobile avec un seul satellite.

Les satellites GPS déjà présentés précédemment remplacent progressivement les satellites Transit. Les mesures de localisation sont faites en utilisant plusieurs satellites et permettent d'excellentes précisions. Bien évidemment, un grand nombre de satellites est nécessaire, 24 comme signalé précédemment.

Le projet SARSAT est un projet Franco-Canadien-Américain-Soviétique. Il utilise des satellites polaires défilants à 800 km et offre à tout utilisateur d'une balise, la possibilité d'envoyer un message de détresse et d'être localisé.

Le CNES étudie un nouveau système de satellites polaires synchronisés, intitulé STARNET S80. Le système complet utilisera 24 satellites en orbites polaires à environ 1 300 km. d'altitude. Les services proposés sont du type messagerie et radio localisation

dans la bande 148.5/137.5 MHz. Les satellites utilisés seront de type MINI ou MICRO. Un satellite expérimental S80 T est prévu d'être mis en orbite en 1993.

Le terminal au sol aurait un prix de 3 580 F. Le CNES évalue à un million le nombre des clients potentiels.

Aux USA le système ORBSYS proposerait des services similaires.

1.3.2.3. Les projets de constellation pour mobile et pour téléphone portatif

Plusieurs projets utilisant des constellations de satellites ont vu le jour récemment.

Tous ces projets ont pour but les communications au niveau planétaire avec les mobiles de tous ordres et vont, pour la plupart, au niveau des communications par téléphones portatifs.

Nous signalerons les projets **IRIDIUM** de Motorola, **Globalstar** de LORAL. Il en existe d'autres tels **ODYSSEY** de TRW et **ARIES** de DCI/MICROSAT/CCI, que nous ne faisons que mentionner.

IRIDIUM

Ce que nous donnons comme information sur le projet **IRIDIUM** correspond à l'application faite par Motorola auprès de Federal Communication Commission FCC des USA datant du 3 décembre 1990. Il peut se faire que le projet ait été simplifié depuis mais nous ne connaissons pas son évolution.

Motorola a étudié une constellation de 77 satellites dans 7 plans polaires comprenant chacun 11 satellites. Ces satellites se trouvent sur des orbites d'environ 800 km d'altitude. Ils communiquent entre eux de proche en proche par liaisons intersatellites. Cet ensemble, ou constellation de satellites, peut être considéré comme un système cellulaire "à l'envers". Un système cellulaire dispose de stations au sol avec lesquelles les mobiles communiquent. Ici les stations au sol sont remplacées par des satellites défilants, ces stations se déplaçant à 7400 mètres/seconde (26600 km/h). Ces satellites offrent au niveau mondial des possibilités de communications par équipements portatifs.

Ce projet est donc en compétition avec tous les projets de télécommunications pour mobile. Les bandes de fréquence prévues appartiennent à ce jour au domaine RDSS (*Radio Determination Satellite System*) 1610-1626.5 MHz pour le trajet terre-satellite et 2483.5-2500 pour le trajet satellite-terre. Le système utilise également 200 MHz dans la bande Ka pour les liaisons satellite/stations terriennes de connexion (GATEWAY) et

200 MHz dans la bande Ka pour les liaisons intersatellites. Motorola espère débiter la construction des satellites en 1992, lancer les premiers satellites en 1994 et finir les lancements de la constellation pour 1996. Les services seront offerts au public en 1997. Les stations de connexions seront la propriété des opérateurs. Le coût du programme complet avoisine 4 milliards de dollars U.S. que Motorola s'engagerait à financer. On ignore à ce jour la participation militaire à ce projet mais ce projet découle de travaux financés par les militaires.

Ce programme a le mérite d'être le premier à fournir une constellation de satellites capables de résoudre au niveau mondial les communications pour mobile avec des postes téléphoniques portatifs. Le nombre de satellites est élevé, chaque satellite étant compliqué avec un système d'aiguillage soit vers les liaisons à d'autres satellites, soit vers les stations de connexions, soit vers les mobiles. Les liaisons intersatellites, bien que se faisant sur de courtes distances de l'ordre de 3000 km, augmentent la complexité des satellites.

GLOBALSTAR

LORAL Cellular System Corp a, comme Motorola, demandé au FCC l'autorisation de construire un système global de service de radio détermination par satellite (RDSS). Cette demande date du 3 juin 1991. Cette société demanderesse LORAL Cellular System Corp est une filiale de LORAL Aerospace Corp et de QUALCOMM INC. Loral Aerospace Corp est l'ancien Ford Aerospace Corporation. Loral Cellular System fera construire ses satellites par SPACE SYSTEMS/LORAL (SS/L) dont 49 % du capital est partagé entre ALCATEL ALENIA et AEROSPATIALE. QUALCOMM Inc est bien connu en Europe avec le système EUTELTRAC qui utilise les possibilités du CDMA (*Code Division Multiple Access*) pour localisation et messagerie pour mobiles.

Il n'est pas souhaitable de décrire ici le système GLOBALSTAR : Signalons que la constellation envisagée comporte 24 satellites en orbite basse, à l'origine optimisée pour les communications sur le territoire des USA. Le système sera étendu à 48 satellites capables de couvrir la totalité du globe lorsque les autorisations auront été obtenues. Le système peut offrir 100000 communications simultanées avec 48 satellites. Chaque satellite est transparent. Tout le traitement s'effectue au sol dans des stations de connexion. Ce dispositif réduit considérablement les coûts. Il n'existe aucune liaison intersatellite, les stations de connexion étant bien évidemment reliées au réseau public de télécommunication au sol.

Pour les bandes utilisées, deux cas de figure sont envisagés, soit en bande L avec liaisons de connexion en bande C, soit en bande L et S avec les liaisons de connexion en bande C. La bande L est comprise entre 1610-1626,5 MHz. La bande S est comprise entre 2483,5-2500 MHz qui sont les bandes du service RDSS. Le système fonctionnera en CDMA. Cette technique de spectre étalé permet de fonctionner sans interférences significatives (HARMFUL) avec d'autres systèmes RDSS. Les services offerts sont, la navigation, la messagerie (RDSS) ainsi que la voix et les données avec connexion directe aux réseaux publics. L'estimation de ce système est de 829 millions de dollars U.S.

(♦ *Références N°7* ♦)

1.3.3. Conclusions relatives aux satellites défilants

Il ne faut surtout pas juger l'importance des satellites défilants au nombre de pages que cette expertise leur dédit :

Les satellites défilants vont avoir une très grande importance dans le futur. Le constat des coûts élevés des lancements, dont on ne sait pas prévoir la baisse d'une manière significative, impose de nouvelles stratégies. Une orientation vers l'utilisation des orbites basses, semble prometteuse. De même qu'ARIANE 4 était optimisé pour les lancements géostationnaires, les coûts les plus bas du lancement de ces constellations seront obtenus avec des lanceurs optimisés.

La réduction du retard de propagation rend ces systèmes extrêmement compétitifs des systèmes localisés au sol tout particulièrement pour les mobiles et les téléphones portatifs. Ces satellites ont même été envisagés en utilisation large bande⁹⁾. Signalons enfin une étude de l'efficacité spectrale comparée entre IRIDIUM et INMARSAT ou IRIDIUM est de l'ordre de 40 fois supérieur à INMARSAT dans ce domaine.

Il ne faut pas non plus conclure que les satellites géostationnaires vont être balayés par les satellites défilants. Pour séduisants que soient ces projets de satellites défilants, ils n'engendrent pas moins des problèmes difficiles tels que ceux du passage d'un satellite à un autre au milieu d'une transmission de données, les phénomènes DOPPLER, les interférences, etc. Beaucoup d'investissements sont à faire pour arriver à des services compétitifs. A priori les satellites géostationnaires ont encore et pour longtemps de nombreux services à rendre.

5) *Laurent GILLE-SIRIUS/IDAT*

1.4. TECHNOLOGIES CONCURRENTES AUX SATELLITES ET COMPLEMENTAIRE

1.4.1. Les possibilités des fibres optiques

L'arrivée des fibres optiques comme moyen de transport de l'information au sol est un événement fondamental. Les fibres optiques sont en effet moins chers au kilomètre que les câbles coaxiaux. Les fibres optiques sont également moins chers que les faisceaux hertziens, les satellites géostationnaires n'étant pas, pour le moment, très différents de faisceaux hertziens perchés sur un pylone artificiel de 36000 km d'altitude. On annonce pour ces fibres optiques des bandes de 560 Mbits bidirectionnelles avec des pertes de 3/100 dB/km. Avec des fibres dopées à l'HERBIUM, on prévoit la régénération des signaux. Les câbles transatlantiques TAT8 sont suivis des câbles TAT9, TAT10 et 11. Les bandes vont atteindre le Gigabit sur l'Atlantique.

Tout ceci est impressionnant et peut, à terme, balayer des institutions de type INTELSAT dont la source de revenu provient des communications transocéans.

D'autre part, la distribution par fibre optique permettra à chacun d'obtenir à son poste de travail, ou à son domicile, les services large bande capables, soit de travailler à distance avec des ordinateurs à haut débit, soit d'avoir toutes les images, animées ou fixes de vidéothèques.

Toutes ces données brutales pourraient inciter les investisseurs à s'orienter vers les fibres optiques et à délaisser les télécommunications par satellites. Or il n'en est rien : l'ATT aux USA vient de commander à GE des satellites pour ses besoins propres de télécommunications fixes, le nombre de VSAT est en pleine expansion aux USA. La radiodiffusion de télévision commence avec HUGHES/DBS/SKYCABLE, Motorola investit dans un projet gigantesque destiné aux mobiles, pour ne citer que quelques exemples.

(♦ *Références N°8* ♦)

1.4.2. Les atouts des satellites

A moins d'un maillage complètement généralisé, les fibres optiques ne font que relier deux points entre eux avec des possibilités de très forts débits. Il n'y a pas de souplesse dans ce type de liaison, les deux points étant fixes. Lorsque le maillage en fibres optiques atteindra celui du réseau téléphonique des pays développés, les communications par satellites en service fixe seront très sérieusement limitées : toutefois le Japon n'envisage pas cette

situation avant 2015 avec un investissement de 200 milliards de dollars. La généralisation au monde sera bien au delà de 2015 et il y a le temps pour plusieurs générations de satellites d'exister.

En effet, les satellites ont pour eux la souplesse. Ils peuvent répondre ponctuellement ou globalement avec des couvertures larges ou des pinceaux étroits, ces derniers étant orientables et pouvant offrir de forts débits.

Dans un autre domaine, il n'est pas question de relier les mobiles avec des fibres optiques et tous les programmes de satellites de communications avec les mobiles, qu'ils soient géostationnaires ou défilants n'ont aucune crainte à avoir de la part de la compétition des fibres optiques.

Dans le domaine de la radiodiffusion, par contre, lorsque la fibre optique sera généralisée, la compétition sera rude, mais comme nous l'avons déjà vu, s'il est opportun de câbler certaines zones denses, il restera des zones qui ne justifieront jamais l'investissement du câblage fibre optique.

1.4.3. Complémentarité

L'OCDE a édité un document "Satellites and Fibre Optics. Competition and Complementary", en 1988. Les valeurs sur les possibilités des fibres optiques étaient suffisamment prospectives pour qu'elles soient toujours d'actualité. Les conclusions de ce rapport insistent sur la complémentarité de ces techniques restent vraies.

2. LES MARCHES ET LES INDUSTRIES

2.1. INTRODUCTION

Il est possible de présenter les satellites de télécommunications existants et donner quelques indications sur leurs coûts, sur leur rentabilité et sur les sociétés qui les construisent. Ceci existe dans des ouvrages⁶⁾ dont nous emprunterons certains chiffres. Mais ce qui est beaucoup plus important pour orienter une politique à l'échelle d'un pays, c'est de savoir quels seront les marchés dans 10 et 20 ans. Tout ce qui a été dit dans la première partie de ce rapport était purement technique. Or pour apprécier les marchés futurs, à 10 et 20 ans, ce qui correspond aux ordres de grandeur des durées de vie des programmes satellites, il faut prendre en compte d'autres éléments que ceux purement techniques, par exemple les taux de croissance des pays riches et des pays pauvres, les évolutions des accords internationaux type GATT etc. Ceci est directement influencé par la conjoncture et la politique et sort de cette expertise. Le but de cette deuxième partie est surtout de situer la position du pays face à la concurrence mondiale et de suggérer ce qui pourrait aider le pays à garder et surtout améliorer sa position dans le marché des satellites de télécommunications. Les différents domaines d'applications sont successivement présentés avant de regarder l'implication de la réglementation.

(♦ *Références N°9* ♦)

2.2. LE MARCHE ET LA POSITION DE NOS INDUSTRIES EN TELEPHONIE ET TRANSMISSION DE DONNEES PAR SATELLITES POUR SYSTEMES FIXES (HORS MOBILE)

Comme il a déjà été évoqué, il existe un marché pour les satellites internationaux de type INTELSAT et EUTELSAT ainsi que pour des satellites nationaux dont le rôle bien souvent déborde les frontières. Ces cas seront vus successivement.

(♦ *Références N°10* ♦)

6) *The competitiveness of the European Industry Janv. 1991 ESTEC contract N° 8876/90/NL/DG WORL SPACE Industry Survey Euroconsult*

2.2.1. INTELSAT

Le système Intelsat a déjà été présenté sous l'aspect technique. Depuis sa création de 1964, Intelsat a défini six générations de satellites, la première étant antérieure à sa création. Ceci fait en moyenne une génération tous les 5 ans. Chaque génération s'adapte le mieux possible au marché qui varie considérablement suivant le rôle imparti à INTELSAT.

Le rôle d'INTELSAT, fondé sous l'aire KENNEDY, était de faire participer tous les pays du monde aux bienfaits de la technologie spatiale appliquée aux télécommunications. A cette époque bien révolue de la conquête de l'inutile, comme par exemple de la lune, INTELSAT offrait à tous les pays des possibilités de télécommunications indispensables à leur développement. Lorsque l'on compare le coût d'un "TRUNK" ou d'un ensemble de centaines de voies multiplexées entre New-York et Londres à celui du circuit ou quelques circuits nécessaires à un pays en voie de développement, on peut soit garder l'esprit Kennedien d'origine et faire payer d'une manière égale la voie à tout le monde, soit appliquer une logique de compétition pure et dure et faire payer la voie au coût réel. On voit que cette question est directement liée à la réglementation internationale qui devrait, semble-t-il, préserver en partie le rôle initial d'INTELSAT : Il ne faut pas qu'INTELSAT monopolise les communications internationales et gêne le développement des communications de par le monde. Il ne faut pas qu'Intelsat abandonne son rôle initial. La réglementation à son sujet doit être optimisée et évolutive.

Indépendamment de ces considérations humanitaires le marché d'Intelsat a deux segments :

- Le premier correspond au grand réseau international.
 - Le second correspond à aider localement les pays à faire leurs télécommunications locales.
- Lorsque l'on regarde les courbes de trafic international, on s'aperçoit que le trafic est en perpétuelle croissance. La répartition du trafic passant dans les câbles sous-marins ou par satellite n'est pas libéralisée. Pour lutter contre la concurrence des câbles, Intelsat n'a pas modifié le coût de ses TRUNKS, dont la capacité a été multipliée par 6 avec l'aide de la digitalisation et de la compression et ceci avec les mêmes bandes et puissances des dispositifs antérieurs. Les revenus d'INTELSAT ont donc chuté, mais ceci ne semble qu'une question de gestion et de tarification dans la mesure où les répartitions du trafic sont équilibrées :

Il faut qu'Intelsat puisse offrir des circuits pour les gros trafics sur l'Atlantique et le Pacifique à des prix compétitifs et offrir des circuits sur les zones à faible trafic de la façon la plus économique, tel est le problème d'Intelsat.

Signalons que les satellites Intelsat sont de gros satellites capables, suivant les séries, d'offrir de 15000 à 30000 circuits, que le coût par circuit et par an se situe aux environs de 1000 US \$⁷⁾ pour la partie satellite, auquel il faut rajouter les coûts de gestion du satellite en orbite, des stations sol, des réseaux sol pour avoir le coût réel.

Les séries Intelsat comprennent des commandes de 5 à 9 satellites, ce qui représente des marchés de l'ordre de 500 millions de US \$ et des coûts de lancement du même ordre de grandeur.

Intelsat a sur ce marché des communications transocéaniques deux types de concurrents :

Les satellites privés et les câbles.

Les satellites privés sont limités et soumis à l'agrément d'Intelsat. Panamsat est opérationnel. Il semble être un projet rentable. ORION le suivra s'il obtient les autorisations.

Beaucoup plus dangereuse est la concurrence des câbles, tout particulièrement les câbles optiques. Sans réglementation, ces câbles peuvent tuer INTELSAT ce qui n'est pas souhaitable.

- Intelsat offre à des pays, en voie de développement ou même développés, des répéteurs pour résoudre des problèmes de trafic national.

Cette offre de service est doublement intéressante : en premier lieu elle permet à un pays, qui n'a pas le trafic d'une importance suffisante pour remplir un satellite national, de pouvoir effectuer des communications par satellites. Au fur et à mesure que ce pays développe ses communications, il se met progressivement dans la situation de disposer d'un satellite national ce qui est bon pour ce pays et pour la communauté des fabricants de satellites et des lanceurs de satellites. Intelsat a parfois poussé ce rôle de fournisseur de répéteurs au détriment de son rôle premier de

7) Chiffre d'EUROCONSULT

fournisseur de réseau international mettant en danger ses capacités transatlantiques et favorisant ses concurrents. Ainsi a-t-il été obligé d'acheter les satellites INTELSAT K à GE (SATCOM K4) pour combler un manque de capacité.

Les investissements pour la fabrication de ces grandes séries de satellites sont importants. La décision pour le choix du constructeur est faite par les gouvernements d'Intelsat dont les voix sont pondérées par le trafic du pays qu'ils représentent. Le plus gros trafic étant celui des USA, il est assez normal que des consortiums se forment avec pour chef de file un américain. C'est ainsi que HUGUES, LORAL (anciennement Ford Aerospace) ont gagné les derniers appels d'offres. Signalons que TRW et GE sont d'éventuels candidats.

Par le passé, aucun européen n'avait suffisamment de surface pour obtenir une majorité auprès d'Intelsat bien que MATRA ait toutefois fait une offre pour INTELSAT 7. Les regroupements entrepris ces derniers temps en Europe vont dans le bon sens pour faire plus participer l'Europe à ce marché auquel elle participait, déjà sans doute, mais dans une position inconfortable de sous-traitant. Encore faut-il que les constructeurs européens soient compétitifs par rapport à ceux du nouveau monde, problème que nous aborderons à propos des satellites nationaux.

Signalons qu'Intelsat représente un marché moyen annuel de l'ordre de 200 millions de US \$ par an, lanceur compris, uniquement pour la partie spatiale hors secteur terrestre.

2.2.2. EUTELSAT

De même que l'E.S.A regroupe les pays européens pour mettre en commun leurs études et satellites expérimentaux, EUTELSAT regroupe les administrations européennes de télécommunications afin de mettre en orbite des satellites pour l'ensemble de l'Europe. Le trafic des satellites Eutelsat est totalement différent de celui des satellites Intelsat. Alors qu'Intelsat a 80 % de son trafic en communications (*voix et données*), Eutelsat a 80 % de son trafic en transport de télévision. 14 % sont affectés aux communications de voix et données et 6 % aux communications privées de type inter-entreprise.

Le type de trafic d'Eutelsat tient à ce jour à la géographie de l'Europe, à la forte implantation des réseaux au sol et aux nombreux échanges d'images à l'intérieur de l'Europe. Eutelsat sert pour le moment à la diffusion de télévision à l'intérieur des pays membres. Mais cette répartition évoluera d'abord par les modifications apportées à l'Est ensuite par l'arrivée des services large bande.

Les pays de l'Est ont une infrastructure au sol tout à fait insuffisante et le recours au satellite, tout particulièrement aux services de type VSAT va amener une augmentation importante du trafic dans les satellites Eutelsat.

Comme l'a étudié le projet RA CE, la montée des besoins de trafic à haute capacité de point à point va également engendrer une augmentation de trafic liée tout d'abord aux interconnexions entre LAN et MAN avant de se généraliser. Ces nouveaux types de trafic engendreront de nouvelles spécifications de satellites qui correspondront aux prochaines générations. Au sujet des communications large bande, il est important que les procédures et les protocoles employés prennent en compte les délais de transmission par satellite. Si les organismes de normalisation n'exigent pas cette prise en compte, les communications larges bandes risquent de voir leur développement par satellite considérablement freiné.

Dans la compétition pour la fabrication des satellites Eutelsat, seules les firmes européennes étaient en compétition. Eutelsat a reçu également pour mission de définir et d'approvisionner les satellites Europesat, ou, pour le moins Pré-Europesat, pour la radiodiffusion directe de télévision. Toutefois, ces satellites sont ou seront en compétition avec les satellites SES, BSB et peut-être d'autres dans la mesure où la déréglementation sera effectuée. Actuellement l'Europe n'est pas prête à se battre d'une manière compétitive avec l'industrie américaine. Nous reparlerons des problèmes du manque de compétitivité de l'Industrie Européenne et surtout des moyens pour améliorer la position européenne à propos du marché des satellites nationaux et du problème de la réglementation.

2.2.3. Les satellites nationaux

La France, l'Allemagne, l'Italie et bientôt l'Espagne auront mis en orbite leurs satellites nationaux. A l'exception de l'Espagne, tous ces satellites ont été développés et intégrés par des sociétés propres à chaque pays ce qui veut dire qu'en Europe, il existe au moins autant de maîtres d'oeuvres potentiels que de satellites nationaux, et même plus, car certains pays tels que la France et l'Angleterre ont deux ou trois maîtres d'oeuvres potentiels.

Aux USA, il existe également beaucoup de constructeurs mais trois seulement dans le domaine des télécommunications commerciales, HUGHES, G.E. et LORAL. Les autres tels Lockheed, TRW sont surtout présents sur le marché militaire. Les besoins en satellites aux U.S. sont plus importants qu'en Europe de par la taille du pays, la concentration de la population sur les côtes Est et Ouest et la dissémination au centre.

Le Canada possède ses propres satellites et sa propre industrie.

Le Japon n'est pas encore sur le marché des satellites mais il pourra y être en peu de temps car il a déjà investi dans ce domaine, tout particulièrement au niveau des équipements des charges utiles de télécommunications. De par son avance en composants hyperfréquences, le Japon a d'énormes facilités dans ce domaine.

L'Australie, le Brésil, le Mexique, l'Indonésie, la Thaïlande, la Turquie et bien d'autres sont des pays qui ont besoin de satellites et qui sont des marchés présents et potentiels.

Signalons le cas récent de l'Argentine, pays qui ne demande pas un satellite, mais de la capacité spatiale gratuite pour ses besoins gouvernementaux, en échange de la mise à disposition de ses positions orbitales à un opérateur. C'est un cas, non pas de fournitures de satellites, mais de fournitures de services de communications par satellite.

Tel est le marché des satellites nationaux. Il est bien évident que les fabricants européens ont du mal à se mesurer avec les constructeurs américains. Aussi est-il intéressant de focaliser son attention sur les USA. Nous reproduisons ici l'analyse faite par ALCATEL.

Le cas particulier des Etats-Unis (extrait de la ♦ Références N°1 ♦)

" Le handicap majeur de l'industrie européenne des satellites de télécommunications face à son homologue aux USA, est la différence de taille et de concentration des marchés. Le chiffre d'affaire de l'industrie américaine est dix fois supérieur à celui des marchés réputés profitables et à forte croissance jusqu'à présent. 20 % seulement de ce chiffre d'affaire est constitué par des marchés commerciaux concurrentiels, à faible marge bénéficiaire donc, alors que ce chiffre atteint 50 % en Europe.

Marché NASA : l'expérience de l'ACTS à 500 millions de dollars

Le rôle de la NASA en matière de développement technologique de satellite de télécommunications est redevenu prépondérant depuis 1978. Exemple en est du programme ACTS (*Advanced Communications Technology Satellite*). Ce programme, commencé en 1973, a reçu un budget en 1990 de 62 millions de dollars, sur un coût total estimé à 500 millions de dollars.

ACTS est un programme de développement technologique très ambitieux. Il joue un rôle fédérateur au sein de l'industrie, l'ensemble des fabricants étant impliqués : General Electric pour la plate-forme et TRW, Space System Loral, Hughes Electron Dynamics, Motorola et d'autres pour la charge utile.

ACTS permet à l'industrie américaine de s'assurer une avance dans cinq domaines technologiques clés :

- Processeur de signaux digitaux, en bande de base.
- Matrice de commutation dynamique hyperfréquence.
- Equipements répéteur en bande 30/20 GHz.
- Antennes reconfigurables à multifaisceaux et à balayage.
- Contrôle du signal par insertion dynamique de codes dans le signal.

Ce programme permettra d'expérimenter les réseaux de télécommunications par satellites de demain :

- Réseaux maillés de VSAT pour les communications privées.
- Vidéo conférence interactive multi-débit.
- Transmission téléphonique en large bande.
- Télécommunications mobiles en bande Ka.
- Télévision digitale haute définition.

Marchés militaires : des programmes de plus de deux milliards de dollars

Globalement, le marché militaire annuel des systèmes de satellite de télécommunications et de navigation, lancement non compris, est évalué aux USA à 7 milliards de dollars.

Le budget spatial militaire américain doit être vingt fois supérieur à son équivalent européen, avec un budget de R&D de l'ordre de 500 millions de dollars pour les programmes de télécommunications.

Contrairement à l'Europe où les programmes militaires de télécommunications par satellite utilisent les technologies développées dans le domaine civil, le Département de la Défense américain joue un rôle aussi prépondérant que la NASA en matière de développement technologique, mais de manière complémentaire.

Les principaux programmes militaires actuels sont les suivants :

	Nombre	Fournisseur	Budget 89	Coût actuel
DCSC-III	14	GE Astro	88 M\$	1 900 M\$
UHF F/O	9	Hughes	194 M\$	1 100 M\$
Milstar	8	Lockeed	273 M\$	2 200 M\$
Navstar-II	28	Rockwell/GE Astro	122 M\$	1 700 M\$
Lightsat	?	DSI	?	120 M\$
SLC-SAT	?		25 M\$	

(♦ *Références N°11* ♦)

2.2.3.1. Position de l'industrie européenne des stations terriennes

L'industrie européenne est morcelée. Quelques pays ont une industrie locale (*Allemagne, France, Italie, Angleterre, Norvège*) mais au niveau mondial, seules deux et ponctuellement quatre compagnies sont présentes dans les grands appels d'offres à l'export :

- **ALCATEL** : > 80 % des AO
- **SIEMENS** : 20 % des AO
- **ALENIA SPAZIO** et **ANT** avec une présence symbolique.

SIEMENS, ALENIA et **ANT** tentent plutôt leur chance dans le domaine des grandes stations internationales, et n'ont en-dehors de leur pays qu'une part mineure du marché.

Dans ce domaine, la compétition est largement américaine, japonaise et française :

- **ALCATEL**
- **CALIFORNIA MICROWAVES (STS)**
- **HUGHES**
- **NEC**
- **SCIENTIFIC ATLANTA**

Dans le segment des grandes stations internationales, seuls **ALCATEL** et à un moindre degré **SIEMENS** voire **ALENIA** sont encore capables d'offrir leurs propres modems, équipements radio et des antennes.

L'industrie européenne est encore moins présente dans le marché DOMSAT où seul **ALCATEL** peut proposer ses équipements et a une part de marché significative contre **NEC, S.A., ... HNS** et **SPAR**.

Enfin, dans le domaine des communications d'entreprises, à la suite de la libéralisation des stations de réception, seule les Européens ont développé des équipements et une technologie. C'est le cas pour **MATRA** fournisseur du système **POLYCOM**, qui s'est approprié une part de marché significative en Europe sur la base d'une technologie d'origine **HARRIS**.

Dans le domaine des stations émission et réception, et spécialement des VSAT, les Américains s'appuient sur un marché domestique fort et dominant très majoritairement (*face à NEC*) le marché mondial, à telle enseigne que les compagnies européennes, peu sûres du développement de leur marché ont négocié des accords avec les fabricants américains. Ces accords sont très variés dans leur nature et vont de la simple représentation commerciale locale (*la plus fréquente*), à une licence de vente et support commercial et marketing sur la plus grande partie de l'Europe (*DORNIER avec HUGHES*). Là aussi, seul **ALCATEL** devant la nécessité de conserver la possibilité de

vendre à l'export sans contrainte de "licences", a développé son propre système mais a dû se résoudre à développer une radio fabriquée aux USA sur ses chaînes de mobiles (*Euteltraks*) par son partenaire QUALCOMM.

Si l'utilisation de matériels étrangers permet de prendre pied dans un marché naissant et incertain, cette stratégie ne permet pas le développement de la technologie européenne ni son extension à l'export. A moins d'ambitions limitées, elle ne peut être que court terme ou nationale. Il est donc nécessaire que les industries européennes puissent se libérer de leur dépendance dans les secteurs à fort potentiel sous peine de disparaître petit à petit et/ou de se transformer en revendeur. Ceci ne peut être accompli que grâce à des investissements et programmes européens nouveaux auxquels ces entreprises devront participer, y acquérir et y conforter leur compétence et retrouver une compétitivité dans des domaines nouveaux, prendre de l'avance (*Ex.: mobiles, traitement à bord, etc ...*).

En outre les entreprises européennes qui font aujourd'hui face à des entreprises intégrées (*opérateur et fabricant*) ayant la possibilité de subventionner une activité par l'autre, risquent de se trouver bientôt face à de nouveaux opérateurs dans les pays de l'Est. Nouveaux opérateurs largement liés par exemple aux RBOC qui, limitées dans le cadre de la loi aux Etats-Unis, ont trouvé un terrain de développement tout naturel en Europe de l'Est.

De quelle liberté disposeront ces nouveaux opérateurs, au niveau accès satellite, capacité de lancement, approvisionnement de matériel, alors que les lois américaines sont toujours aussi limitatives pour les non-américains ? Il y a un déséquilibre potentiel qui peut là aussi permettre de maintenir l'industrie et les services en otage.

Un des moyens de limiter cette colonisation est technologique, et suppose que de nouvelles technologies soient mises en oeuvre, que les industries européennes s'associent et la technologie s'impose de par son avance.

Un autre moyen est légal, il concerne la réciprocité des limitations et des ouvertures, ceci ne pouvant être bénéfique qu'après la mise à niveau de la production européenne.

2.3. DIFFUSION - RADIODIFFUSION

Le marché de la diffusion a déjà été évoqué. Il appartient à celui du service fixe et a donc été présenté aux paragraphes précédents. Nous avons déjà parlé techniquement de la radiodiffusion au § 1.2.2.2 ainsi qu'au § 2.2.2.

Le marché n'a pas réellement démarré aux USA mais les grosses plates-formes de HUGHES et de GE sont capables de satisfaire le marché. HAC a formé avec SKY CABLE en association avec NBC, News Corp et Cable vision le premier projet de radiodiffusion de télévision par satellite. La PIRE est de 58 dBW. Les signaux sont numérisés et compressés. Au Japon, les projets BS font de la radiodiffusion de TV en bande Ku avec des PIRE de l'ordre de 56 dBW pour BS3 et 62 dBW pour BS2X. Ces satellites sont coproduits avec GE ASTRO par NEC, MITSUBISHI.

Pour le moment l'Europe a confié à EUTELSAT le soin de définir les compléments de TDF et TVSAT (Pré Europesat).

Le réel démarrage en Europe, comme en général dans le monde de la radiodiffusion de télévision par satellite est directement lié aux normes. Ce sujet mérite d'être développé dans une expertise spécifique et dépasse le cadre de cette expertise.

On peut affirmer que le domaine de la radiodiffusion par satellite correspond à un marché potentiel important en télévision classique et encore plus important en télévision haute définition. La WARC 92 doit définir les bandes de fréquence de la radiodiffusion sonore par satellite dont l'analyse du marché potentiel reste à faire.

(♦ *Références N°12* ♦)

2.4. COMMUNICATIONS AVEC LES MOBILES

Nous avons déjà présenté certains aspects techniques du système INMARSAT de télécommunications avec les mobiles ainsi que les projets en gestation de satellites défilants aux § 1.2.2.3 et 1.3.2 respectivement. Rappelons que les satellites géostationnaires ne présentent pas de difficulté d'emploi pour les communications avec les bateaux et les avions. Par contre au sol, sur terre, leur fonctionnement est gêné par les obstacles naturels et les constructions. Satellites géostationnaires et défilants ont leurs qualités propres et il n'est pas prévisible que les constellations de satellites défilants éliminent les satellites géostationnaires. En particulier les aspects de sécurité liés au positionnement des avions et des bateaux ainsi que tous les aspects de contrôle paraissent, à priori, devoir, être conservés par les satellites géostationnaires.

L'Europe, et tout particulièrement le Royaume Uni, joue un rôle important dans le consortium INMARSAT où les pouvoirs des pays sont proportionnels à leur trafic maritime. INMARSAT ayant été fondé à l'origine pour les communications maritimes, ambitionne un rôle beaucoup plus important vers les communications avec les avions, le contrôle aérien, et les communications avec les mobiles sol. La répartition des pondérations des voix des participants devra, au cas où le rôle d'INMARSAT s'étend à ces nouveaux domaines, être remis en question.

L'Europe n'a pas engendré de projet spécifique de communications avec satellites en orbites basses. Par contre elle a plusieurs projets de HEO satellites. Matra participe au projet IRIDIUM ALENIA, ALCATEL, AEROSPATIALE participent au projet GLOBALSTAR. Il est peut être regrettable que l'initiative des projets basses orbites ne vienne pas de l'Europe mais les financements de ces projets sont tels que l'association EUROPE/USA paraît indispensable.

L'ensemble de ces nouveaux projets géostationnaires et défilants doit englober l'aspect navigation détresse et sécurité.

(♦ *Références N°13* ♦)

2.5. BILAN DES MARCHES PREVISIBLES

Indépendamment de la position commerciale des sociétés européennes, le marché potentiel des satellites de télécommunications est résumé ci-dessous :

Télécommunications - Service Fixe (FSS)

INTELSAT :	Téléphonie, Transmission de données faible et fort débits, Transport d'images
EUTELSAT :	Transport d'images, Transmission de données faible et fort débits, voix digitalisées compressées pour pays de l'Est, Radiodiffusion images et sons.
SATELLITES NATIONAUX :	Diffusion images, Radiodiffusion images et sons, voix, données faible et fort débits.

Tous les services transmission de données seront orientés vers les applications de VSAT, les compléments du BISDN, les réseaux VSAT, BISDN étant ouverts ou fermés.

Radiodiffusion par satellites (images et sons)

- Marché en cours de définition au niveau mondial mais vaste marché avec accélération prévisible amenée par la HDTV.

Télécommunications avec les mobiles (MSS)

- Marché pour satellites géostationnaires type INMARSAT
- Nouveaux marchés avec satellites défilants.

Sécurité - navigation - contrôle aérien et maritime

- Marché partagé entre satellites géostationnaires et défilants d'une manière complémentaire.

2.6. LA REGLEMENTATION ET SES CONSEQUENCES

2.6.1. Le GREEN PAPER de Bruxelles

Il serait plus d'actualité de parler de déréglementation que de réglementation : la communauté européenne a publié en novembre 90, un livre vert intitulé "Approche Commune dans le domaine des communications par satellites dans la Communauté Européenne" pronant l'ouverture complète du ciel européen à tout prestataire de services de télécommunications par satellites. Les arguments donnés ne sont pas inexacts, tels les changements de l'Est, les lois du marché, etc. Bruxelles considère cette ouverture bénéfique pour l'Europe :

La réponse d'Alcatel à ce livre vert a été : "Si la recherche de compétitivité au niveau des services doit conduire à une totale liberté d'approvisionnement des matériels, l'Industrie Spatiale Européenne risque d'être balayée par ses concurrents américains et japonais".

L'explication est donnée en trois points :

- Le marché accessible aux industriels européens est au moins 10 fois inférieur à celui des industriels américains.
- L'industrie japonaise en matière de composant et leur capacité financière peut créer une situation insurmontable.
- Enfin, les concurrents américains se sont verticalisés, c'est-à-dire que non seulement ils fabriquent leurs équipements, leurs satellites, mais encore ils possèdent des sociétés de services fournissant des transmissions de bout en bout avec les protocoles qui vont bien. Cette capacité d'attaque du marché européen n'a pas d'équivalent en Europe à ce jour.

On peut rajouter à ce dernier point que lorsque HUGHES met sur le marché une nouvelle série de satellites, par exemple la série 601, ces satellites ont été amortis par un marché militaire et le prix proposé sur le marché est celui de la série, qui, est bas compte-tenu de l'importance de la série.

2.6.2. D'une manière beaucoup plus générale, nous avons déjà parlé du rôle d'Intelsat au niveau mondial et du souhait formulé pour qu'Intelsat perpétue sa mission. Ici, le danger ne vient

pas de HUGHES ou de G.E., mais des câblers, et, seule une réglementation du trafic Atlantique et Pacifique peut éviter une banqueroute à terme pour Intelsat. D'une manière plus modeste, Eutelsat disparaîtrait sous le choc d'une concurrence immédiate américaine.

Il n'est pas question de laisser des sociétés monopolistiques telles Intelsat ou Eutelsat sans stimulation. Il n'est pas question de détruire ce qui a été construit ces vingt dernières années mais il est question d'améliorer et de rendre compétitif l'industrie spatiale.

Signalons que le ciel britannique a été partiellement déréglementé et que le ciel de la RFA est en cours de déréglementation partielle.

2.6.3. La verticalisation

Il existe en Europe des opérateurs parfaitement compétents pour les services de télécommunications. France-Télécom, Deutsche Bundespost en sont des exemples. Ce savoir faire d'opérateur est précieux.

Il existe de grands constructeurs de matériels de télécommunications par satellite.

Il serait très bénéfique que ces deux types d'entités s'associent dans des sociétés communes où les savoir faire se combineraient, c'est ici un avis d'expert très technique et pas forcément l'avis d'ALCATEL. MBB est déjà lié à Deutsche Bundespost en RFA. MBB est lié à ALCATEL. Deutsche Bundespost et France-Télécom ont déjà des sujets de collaboration. Il existe bien d'autres possibilités.

Nous donnons par la suite quelques informations sur la verticalisation du marché commercial au USA extraites de la Référence N°1.

" Marché commercial domestique USA : intégration verticale "

Estimé à 2,5 milliards de dollars en 1990, on peut considérer que le marché des satellites domestiques américains en est à sa troisième génération, qui se caractérise par des satellites hybrides bandes C + KU plus gros que ceux des générations précédentes. Cette troisième génération se caractérise aussi par une concentration des intervenants autour de quatre pôles : les deux sociétés de télécommunications AT&T et GTE Contel, ainsi que les deux principaux industriels/opérateurs : Hughes Aircraft + Hughes American et GE AstroSpace + GE Americom. Il faut noter une baisse des prix de location des répéteurs, moins 60 % en cinq ans, du fait de la surcapacité actuelle où l'offre est d'environ 700 répéteurs (*Bandes C et KU confondues, ou équivalent à 36 MHz*) alors que la demande est limitée à 500 répéteurs.

Les programmes commerciaux de satellite sont les suivants :

	Nombre	Opérateur	Fournisseur	Bande
Satcom	10	GE American	GE Astropace	C/KU
Galaxy	11	Hughes Com	Hughes Aircraft	C
Westar	3	Hughes Com	Hughes Aircraft	C
SBS	7	Hughes Com	Hughes Aircraft	KU
Telstar	5	AT&T	GE Astro	C/KU
Spacenet	4	GTE Contel	GE Astro	C/KU
GSTAR	4	GTE Contel	GE Astro	KU
ASC	2	GTE Contel	GE Astro	C/KU
Sky Cable	4	Sky Cable	Hughes Aircraft	KU (DBS)
M-SAT	2	AMSC/TMI	Hughes Aircraft	L
Geostar		Geostar	GE Astro	L

De ce marché des télécommunications par satellites déjà à maturité pour les télécommunications fixes, et en pleine effervescence pour les télécommunications avec les mobiles et la télévision directe, deux industriels américains vont sortir renforcés grâce à une intégration verticale des services : le groupe Hughes (General Motors) et le groupe General Electric.

Le groupe Hughes s'est fortement consolidé ces dernières années par un processus de fusions, absorptions, et est maintenant présent sur six niveaux :

Hughes Aircraft :

La maison mère et l'industriel fabricant de satellites, leader mondial.

Hughes Network System :

L'intégrateur de réseaux et fabricant de stations terriennes, leader sur le marché domestique, après notamment le rachat des activités satellites de MA/COM.

Hughes Communication :

L'opérateur de télécommunications fixes, premier opérateur américain en bande C sur les satellites GALAXY, et ayant racheté les satellites de Western Union (WESTAR) et d'IBM (SBS) en bande KU. Hughes Communication est de plus l'opérateur des satellites LEASAT loué à l'U.S. Navy.

Electronic Data System :

L'opérateur du réseau privé de General Motors, premier réseau privé américain de télécommunications par satellites.

Galaxy Broadcasting :

Essentiellement l'actionnaire de la Joint Venture Sky Cable initialisée par Hughes, avec la participation d'autres investisseurs dont NBC, et futur opérateur de satellite de télévision directe.

Mobile satellite service :

Essentiellement l'actionnaire du consortium American Mobile communication Satellite Corp. qui, avec Telesat Mobile Inc., exploitera le satellite américano/canadien M-SAT.

De son côté, le groupe General Electric a suivi un chemin équivalent, avec quatre niveaux d'intégration.

General Electric Astropace :

L'industriel fabricant de satellite, leader du marché domestique américain.

General Electric Americom :

L'opérateur de télécommunications fixes, leader du marché avec 24 % des capacités disponibles en orbite.

National Broadcasting Corp. :

Une des trois premières chaînes nationales de télévision aux USA.

(♦ *Références N°14* ♦)

3. ETUDES - TRAVAUX ET PROGRAMMES

Ce chapitre reprend la totalité des études et travaux à faire pour que l'industrie européenne des satellites de télécommunications puisse continuer à se développer dans la compétition mondiale.

Nous indiquerons en premier les travaux spécifiques liés aux charges utiles de télécommunications en rappelant sommairement les travaux liés aux plates-formes satellites et aux interfaces lanceurs avant de définir les études systèmes devant déboucher sur des programmes.

3.1. CHARGES UTILES

Les paragraphes qui suivent présentent par thèmes, des techniques et technologies :

- a) en cours de développement,
- b) à poursuivre ou à initier pour dominer chaque domaine.

3.1.1. Les réflecteurs d'antenne

- a) La performance d'une antenne complète pour une couverture fixe peut être atteinte avec un réseau de sources ou en déformant les réflecteurs. Cette deuxième approche est maintenant faisable, liée aux progrès des simulations.

Ainsi pour un grand nombre de couverture fixe il est extrêmement intéressant (*financièrement et techniquement*) de simplifier la source en la réduisant à 1 ou quelques éléments rayonnants et à optimiser la forme de la surface du réflecteur. On peut aussi appliquer ce concept à des réflecteurs bigrille dans les cas où la réutilisation de polarisation le nécessite. Les études en cours portent sur les logiciels d'optimisation des surfaces de réflecteur en fonction des couvertures désirées, sur les dégradations liées au déformation thermique et dans le cas des bi-grilles sur la qualité du rayonnement (*pureté de polarisation*).

- b) Les études à initier ou à poursuivre portent sur 4 axes :
 - L'augmentation de la taille des réflecteurs. Techniquement les solutions s'orientent vers des réflecteurs déroulables ou déployables.
 - Des investigations technologiques afin de réduire la masse, ceci est une constante dans l'industrie spatiale.
 - Une industrialisation plus poussée afin de réduire le coût non récurrent et récurrent.

- Des investigations théoriques et technologiques sur la réalisation de réflecteur sélectif en fréquence (*transparent pour une fréquence, réfléchissant pour une autre*) permettant de gagner en encombrement sur un satellite en utilisant la même antenne pour des missions de fréquences différentes.

3.1.2. Les sources d'antennes (éléments rayonnants)

Le terme de sources représente ici la partie qui transforme une énergie électrique guidée en énergie rayonnée dans l'espace par un ou plusieurs éléments rayonnants, (*sur un réflecteur ou directement sur sa cible*).

Classiquement ces sources d'antennes sont des cornets plus ou moins sophistiqués suivant les performances attendues, avec leurs réseaux de répartition de puissance. Deux exemples de complexité importante sont la source bande C de l'antenne Télécom 2 et la source bande Ku d'EUTELSAT 2 (*Figure 3.1.2-a et b*).

Outre les problèmes classiques de tenue aux vibrations et à l'environnement thermique, les problèmes rencontrés sont liés aux répartiteurs de puissance entre les cornets qui doivent être légers, compacts et avoir les bonnes propriétés électriques. Dans les cas de forte puissance (DBS) les différents canaux qui traversent ces répartiteurs ne doivent pas intermoduler⁸⁾ (*créer des parasites qui brouilleraient systématiquement certains canaux*), cette contrainte a de fortes conséquences sur les choix des matériaux et leurs traitements de surface.

a) Les travaux en cours portent sur :

- La réalisation d'éléments rayonnants peu encombrants souvent imprimés sur un substrat diélectrique. Ils remplacent ainsi des cornets bien plus lourds et volumineux sur le satellite
- La réalisation de multi-sources à cornets pouvant transmettre de fortes puissances en optimisant à la fois performances électriques, masses, volumes et problèmes thermiques.

8) Intermodulation

2 fréquences f_1 et f_2 intermodulent dans des éléments non linéaires. Il y a alors création de raie parasite à $nf_1 + mf_2$ qui peuvent alors gêner une fréquence $f_3 = nf_1 + mf_2$. L'intermodulation est dite active quand elle est générée par des composants électroniques tels les diodes, les transistors, les ATOP. Elle est dite passive quand elle est créée par des matériaux ou des associations de matériaux) tels les métaux ou les diélectriques qui présentent des propriétés non-linéaires pour les fortes puissances (> 100 W) initialement assez inattendues.

b) Les travaux à poursuivre concernent :

- La généralisation à toutes les fréquences d'éléments rayonnants compacts et/ou imprimés,
- La finalisation des études sur les réseaux de répartition de puissance à faibles pertes hyperfréquences,
- La qualification spatiale.

Figure 3.1.2.a:
Antenne Bande C Télécom 2 (Vue CAO)

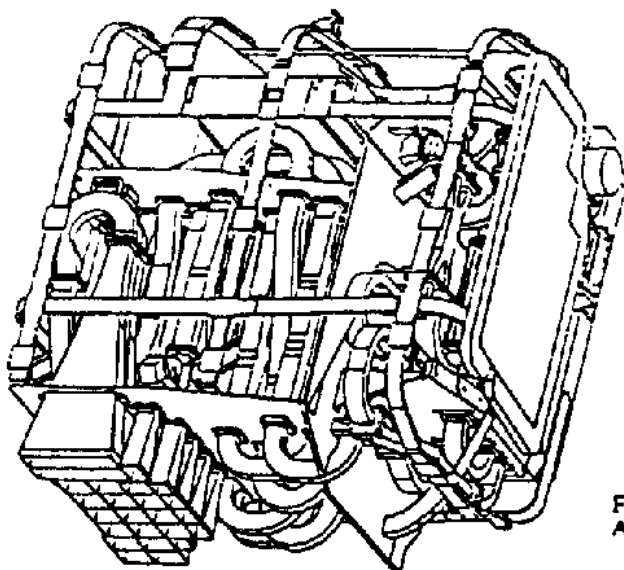
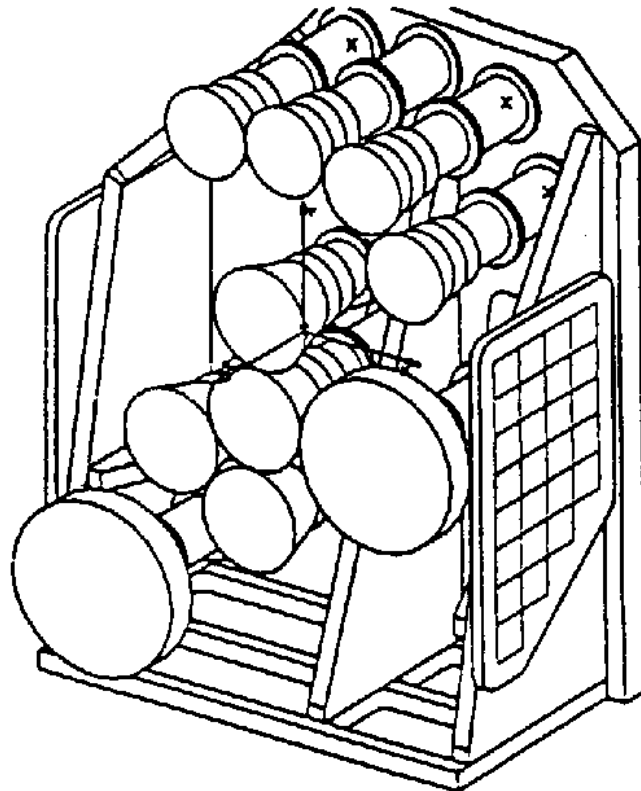


Figure 3.1.2.b:
Antenne Bande Ku Eutelsat 2 (Vue CAO)

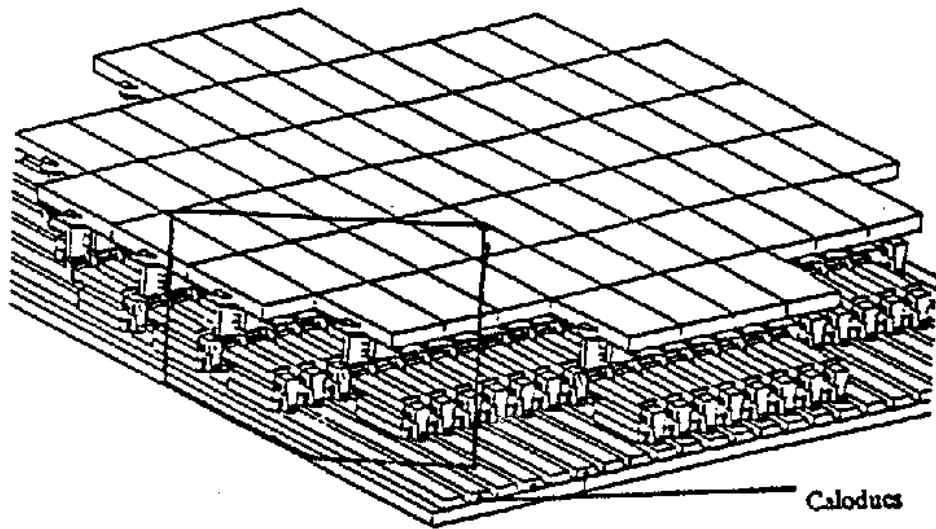
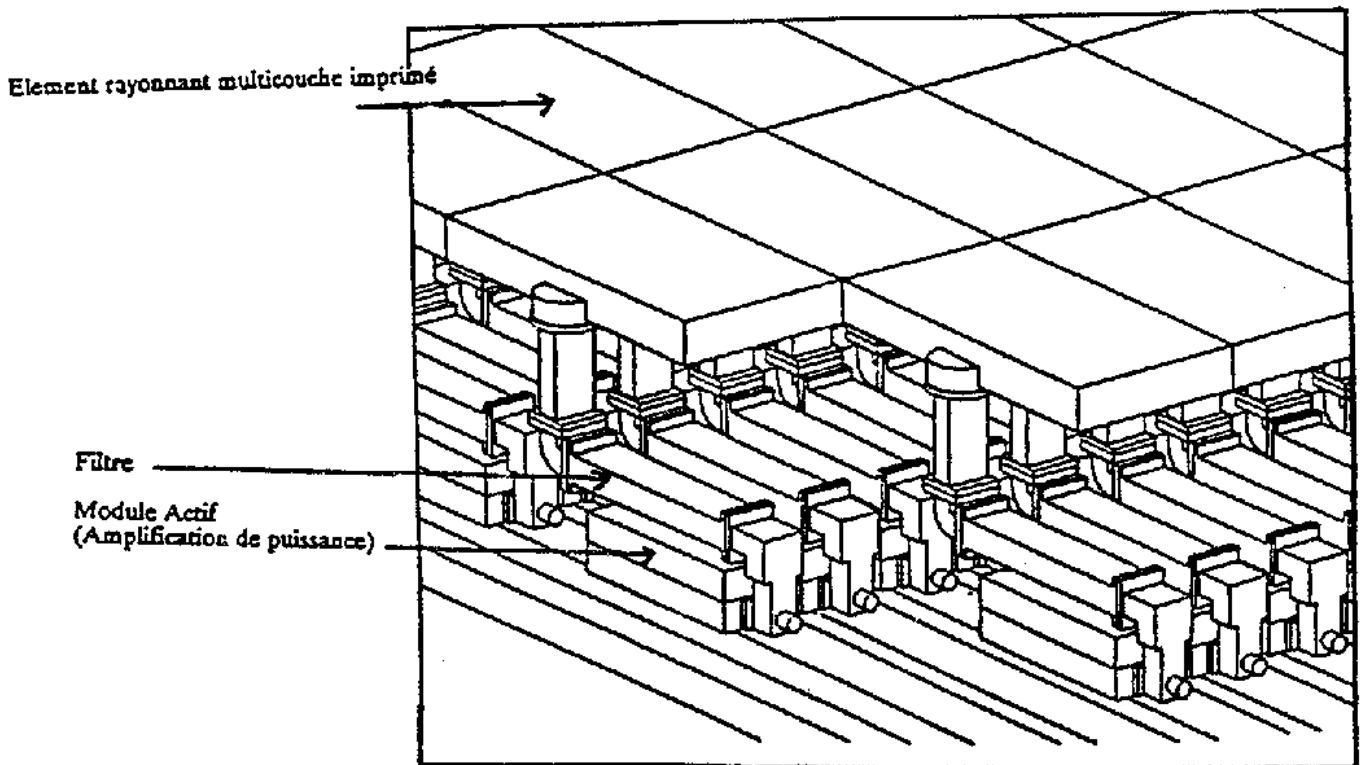


Figure 3.1.3: Avant-projet antenne active émission bande Ku pour France Telecom et détails du panneau rayonnant (ci dessous)



3.1.3. Antennes actives

L'association d'éléments actifs tels que des amplificateurs et des déphaseurs avec des éléments rayonnants permet en vol de modifier la couverture d'une antenne, et a donné naissance à de nouveaux concepts dit d'"antennes actives".

Pour les télécommunications, l'intérêt est de pouvoir avec la même antenne créer plusieurs faisceaux, soit pour obtenir plus de gain et donc des terminaux sol plus petits, soit pour pouvoir réutiliser la même bande de fréquence pour des faisceaux bénéficiant d'une isolation spatiale suffisante, soit encore tout simplement pour adapter les couvertures à des besoins évolutifs durant la vie du satellite.

Aucune antenne civile de ce type ne vole à ce jour.

- a) Les études portent sur les différents types d'architecture de ces antennes et débouchent sur des besoins technologiques et techniques nouveaux : en effet, pour des raisons de perte hyperfréquence, les amplificateurs de puissance pour l'émission, et faible bruit pour la réception, doivent se trouver intégrés près des éléments rayonnants. Si les éléments rayonnants sont imprimés sur un panneau on parle alors de sandwich actif, intégrant éléments actifs, filtres et éléments rayonnants (voir figure 3.3.1). Comme le nombre d'éléments rayonnants est grand (environ 100 pour une antenne de télécom civile), le nombre de filtres et d'amplificateurs l'est aussi et ceci impose d'utiliser des technologies permettant une grande miniaturisation. Ce sont les technologies "hybride" (utilisation de puce nue) ou "monolithique" (fonctions complexes gravées sur les puces de silicium ou d'Arseniure de Gallium). Ces technologies sont décrites aux § 3.1.6. & § 3.1.7.

Parmi les équipements nouveaux associés aux antennes actives il y a aussi les réseaux de formation de pinceaux (RFP) : pour diriger un pinceau dans une direction définie, il faut alimenter en hyperfréquence l'ensemble des éléments rayonnants avec une loi d'amplitude et de phase déterminée. C'est à l'intérieur du RFP que le signal devant se diriger vers un faisceau donné, est divisé autant de fois qu'il y a d'éléments rayonnants et chaque partie ainsi obtenue est amplifiée et déphasée de manière adéquate. Ensuite pour chaque élément rayonnant, les signaux devant aller dans les différents faisceaux y sont sommés. Le RFP avec son unité de gestion est le coeur de l'antenne active.

France-Télécom soutient une étude d'envergure sur une antenne active à 12 GHz de 64 éléments rayonnants (*voir figure 3.1.3*) devant émettre 8 faisceaux dans chaque polarisation. Cette étude aboutira à un démonstrateur. La solution retenue pourrait être applicable à EUTELSAT 3. Le CNES finance une étude de faisabilité de grands panneaux rayonnants à 1.5 GHz visant à mieux définir les performances électriques mais aussi thermiques et mécaniques d'une grande antenne active déployable sans oublier les effets de couplage avec le satellite. L'ESA initie en ce moment les phases C/D du programme Artemis dans lequel il y a 2 antennes actives à 2 GHz dont l'une a le soutien de la France et sera réalisée à Alcatel Espace.

Il y a aussi une grande synergie entre les technologies antennes actives pour télécommunication et les antennes actives radar pour l'observation de la terre. Les techniques développées et mises au point sur les démonstrateurs radars (*il y en a deux financés à ce jour, par le CNES en bande X et par l'ESA en bande C*) sont largement applicables aux télécommunications spatiales.

- b) Nous sommes encore au tout début des travaux sur les antennes actives qui semblent une voie très prometteuse pour l'avenir des satellites de Télécom. La faisabilité est aujourd'hui démontrée.

Les études à poursuivre sont :

- Les logiciels d'optimisation des lois d'éclairement prenant en compte les problèmes de variations de paramètre électrique des composants en température, en vieillissement, de non linéarité.
- La qualification spatiale des filières technologiques nécessitées pour les antennes actives (*panneau rayonnant, technologie monolithique,*).
- L'étude d'antenne active aux fréquences plus élevées pour augmenter les débits terre/sol.
- L'étude d'antenne active très directive afin de former des faisceaux de la taille d'une ville pour une réutilisation maximum des fréquences.

Toutes ces études se recoupent partiellement et font appel à des spécialités jusqu'à maintenant distinctes (*antenne, hyperfréquence active, électronique numérique, électronique de puissance, sans oublier la technologie*) et les industriels doivent s'organiser efficacement pour aboutir rapidement et résoudre tous les problèmes.

3.1.4. Equipements hyperfréquences

Les fonctions hyperfréquence telles que : amplification, mélange de fréquence, génération de fréquence, filtrage sont la base de toutes les charges utiles actuelles.

- a) Les études en cours portent sur les limites actuelles des composants semi-conducteurs, citons par exemple, l'amplification à haute puissance 50 W à 4 GHz, 10 W à 12 GHz ou l'amplification aux fréquences entre 30 et 60 GHz, avec les transistors les plus performants du moment. Les études portent aussi sur tous les moyens technologiques permettant soit de diminuer la taille des équipements, soit l'amélioration des rendements, soit de monter en fréquence, citons la technologie MMIC, les filtres à résonateur diélectrique.... France-Télécom soutient le développement des équipements les plus nouveaux et le CNES aide à financer les qualifications spatiales des nouvelles technologies utilisées. L'objectif étant de rester concurrentiel à l'exportation. Alcatel Espace est un fournisseur mondial pour ce type d'équipements.
- b) Les études à poursuivre concernent les mêmes sujets technologiques que ceux cités ci-dessus. La compétition entre les nombreux fournisseurs d'équipements et la concurrence très dure avec le Japonais NEC pousse à développer de nouvelles technologies permettant l'emploi des composants (*japonais*) les plus performants.

Citons pour mémoire, les Tubes à ondes progressives dont les rendements : aux très hautes fréquences sont meilleurs que ceux des semi-conducteurs. La compétition entre ces deux technologies se fait au niveau des rendements de puissances, des fiabilités, des masses ; les tubes électroniques perdant du terrain vis-à-vis des semi-conducteurs.

3.1.5. Traitement bord, Télécommande Télémessure, et équipements associés

Les charges utiles des satellites civils de télécommunication actuels ne font pas de traitement sophistiqué si ce n'est du routage de canal, sans régénération du signal bord. Les équipements de télémessure et télécommande (TTC) qui permettent la gestion technique du satellite à partir du sol ont par contre toujours présenté des fonctions de traitement du signal. Ce traitement s'effectue toujours à basse fréquence (< 500 MHz), il nécessite des technologies spécifiques différentes de celles des hyperfréquences et très proches du numérique (*composants montés en surface sur des circuits époxy ou polyimide multicouches*).

- a) Pour les charges utiles les études portent sur deux types de traitement :

- 1.- la commutation transparente (*voir § 1.2 et 1.3*) où les canaux montants sont démultiplexés en sous-canaux par des filtres SAW et multiplexés dans les faisceaux descendants de manière dynamique et souple pour permettre de s'adapter au trafic. C'est la version la plus facile à implémenter dans un satellite, toutes les technologies sont à ce jour qualifiées.
- 2.- la démodulation bord où le signal est numérisé et traité plus ou moins finement selon les besoins et les possibilités spatialisables. Le point bloquant est le peu de microprocesseurs embarquables et les technologies numériques qualifiées. La consommation de puissance des circuits numériques est à ce jour très pénalisante. Les études en cours portent sur le filtrage numérique sur les algorithmes de démodulation multiporteuse (*marchés Intelsat et ESA*) et sur les technologies numériques haut débit, haute densité d'intégration, décrites au § 3.1.7.

Dans le domaine de la TTC une étude ESA est en cours et porte sur des récepteurs permettant le décodage d'un signal codé par étalement de spectre (*afin d'augmenter la fiabilité de la liaison de TTC*). L'effort est aussi porté sur la refonte de ces récepteurs et émetteurs en utilisant les plus récentes innovations technologiques (*circuit MMIC, circuit ASIC*) de manière à en réduire taille, encombrement et bien sur coût.

- b) Les études à poursuivre doivent traiter le problème de filtrage numérique de démodulation numérique et finaliser la définition de technologies adaptées aux besoins et aux contraintes du spatial (*problèmes de consommation, de tenue aux radiations et de fiabilité*).

Il est clair que la génération de satellite avec traitement bord est incontournable, seules les exigences technologiques peuvent en retarder l'application. Cette nouvelle génération aura de plus en plus d'éléments hyperfréquences dans l'antenne active, le reste tendant vers la commutation ou le brassage de circuits.

Pour la TTC l'ESA et la NASA sont en train de définir un nouveau standard de formatage des données, les équipements devront être modifiés pour être compatibles avec ce nouveau standard.

3.1.6. Technologies hyperfréquences

Les technologies hyperfréquence utilise ce jour essentiellement des composants actifs en boîtier individuel rapporté sur des substrats alumine de dimensions inférieures à 1 pouce par 1 pouce.

Pour le satellite Eutelsat 2 une technologie "hybride" a été développée : elle permet de mettre dans un grand boîtier hermétique de nombreuses puces nues de transistors hyperfréquences, ce qui facilite énormément la tenue de certaines performances et réduit poids et volume des équipements qui l'utilise.

- a) Les études en cours concernent la technologie monolithique (ou *MMIC monolithic microwave integrated circuit*) qui permet d'intégrer des fonctions complexes sur des substrats d'Arsenium de Gallium (ces fonctions sont néanmoins simples comparées à ce que l'on peut faire sur du silicium à plus basse fréquence). Soutenue par le CNES, la technologie permettant l'utilisation de puce MMIC est en cours de qualification spatiale. Elle est essentielle pour la réalisation des modules émission/réception des antennes actives.

Pour la fabrication de puces MMIC, il y a en France 2 fondeurs TMS (*Thomson usine de Corbeville*) et PML (*Philips Microwave Limeuil*). TMS propose plusieurs filières (*puissance, faible bruit*) qui doivent maintenant entrer en phase d'industrialisation. PML dispose d'une seule filière (*faible puissance*) qui semble mieux stabilisée. Aucun des deux ne peut à ce jour fournir des puces modèles de vol qui doivent donc être achetées aux USA.

- b) Pour les fondeurs, les études à poursuivre sont l'industrialisation et la qualification spatiale des filières MMIC. Pour les équipementiers ces études concernent les améliorations à apporter aux reports des puces monolithiques (*problème d'évacuation de la chaleur ...*), à l'emballage de ces puces dans des boîtiers très légers (*composite matrice métallique*). Des études doivent aussi être menées pour préparer la montée en fréquence (*nouveau substrat, nouveau composant, gravure plus précise*).

3.1.7. Technologie numérique et fréquence intermédiaire

Les technologies utilisées pour traiter les signaux numériques et analogiques jusqu'à 1 GHz sont très proches. A ce jour sont qualifiés spatial, le montage de composants en surface sur des circuits multicouches sur lequel peuvent être montés des composants en boîtier allant jusqu'à une centaine de broches, et d'autre part une technologie "hybride puce nue" permettant de monter des puces silicium sur des substrats multicouches. En France, les fondeurs silicium sont essentiellement TMS (*Thomson usine de Saint Egrève*) pour les ASIC analogiques et Matra Harris pour les ASIC numériques. Mais les composants élémentaires numériques sont principalement importés des USA (*Texas Instrument*)

- a) Chez les équipementiers les études en cours ont pour but d'accroître la densité d'intégration : câblage de boîtier 250 broches, macro hybrides permettant l'utilisation de puces silicium, étude sur la connectique permettant de traiter des signaux d'horloge 200 MHz.

Chez les fondeurs de circuit silicium, TMS est en train d'acquérir un procédé numérique sur Arseniure de gallium permettant une fréquence d'horloge de 500 MHz. ES2 société Aixoise propose un procédé de gravure par faisceau laser, qui optimise le cycle de conception auquel s'intéresse les équipementiers et l'ESA. En ce qui concerne les composants durcis aux radiations TMS développe une nouvelle filière mais les modèles de vol doivent encore être achetés à l'étranger.

- b) Chez les fondeurs, les études à initier doivent permettre de rattraper les concurrents américains, japonais, mais aussi anglais et suédois afin de produire avec un niveau de qualité spatial des composants rapides ou ayant ou une meilleure résistance aux radiations.

Chez les équipementiers, il faut viser la qualification de macro hybride intégrant puces numériques et puces analogiques dans un même boîtier étanche. Les applications, outre le traitement bord des satellites de télécommunication, sont nombreuses pour les missions scientifiques et/ou militaires.

3.2. PLATES-FORMES POUR SATELLITES

Nous différencierons, ici, les plates-formes des satellites géostationnaires de celles des défilants comme nous l'avons déjà fait précédemment.

3.2.1. Plates-formes pour satellites géostationnaires

Comme indiqué au § 1.2.1.2, les missions de télécommunications par satellite conduisent à des masses au lancement comprises, en général, entre 1400 et 2500 kg pour un grand nombre des satellites de télécommunications.

Il est donc impératif qu'une, ou des plate(s)-forme(s), puisse être conçue pour s'adapter à ces missions. Dans ce domaine l'effort doit porter sur l'industrialisation des fabrications pour obtenir des produits standards les plus compétitifs. Nous renvoyons le lecteur au § 1.2.1.2. pour compléments d'informations sur ce sujet.

Signalons l'exigence de la précision d'attitude qui découle des directivités d'antennes, et, les améliorations éventuelles de la propulsion ionique dont il reste à démontrer la fiabilité, la non-pollution, et la compétitivité économique.

3.2.2. Satellites défilants

Il est primordial que les divers programmes envisagés de satellites défilants aient stabilisé leurs besoins pour que se dégagent les caractéristiques des plates-formes. Signalons que les programmes d'observation utilisent des satellites défilants et qu'il est souhaitable de coordonner les efforts dans ce domaine.

3.3. INTERFACES LANCEURS

Nous rappelons, ici, quelques éléments du § 1.2.1.3. où nous constatons les performances d'ARIANE 4 pour les lancements des satellites géostationnaires et ses faiblesses pour les lancements en orbites basses pour satellites défilants. Pour ARIANE 5, les conclusions semblent inversées, l'orbite basse semblant privilégiée par rapport à l'orbite géostationnaire. Les deux types d'orbite étant nécessaires, les interfaces satellites/lanceurs doivent être optimisées :

- Le lancement des constellations de satellites basses orbites se fera-t-il avec ARIANE 5 ou les mini-lanceurs type PEGASUS ? Le passage de l'orbite basse d'ARIANE 5 en orbite GTO peut-il garantir le kilo géostationnaire aux prix de la concurrence mondiale ? Ces questions se posent aux utilisateurs de satellites.

3.4. ETUDES SYSTEMES ET PROGRAMMES

De nouvelles applications des satellites de télécommunications ont été évoquées au cours de cette expertise, tant du côté des satellites géostationnaires que défilants.

- Pour les satellites géostationnaires, il y aura continuité des applications au niveau international dans les programmes tels que : INTELSAT, INMARSAT et EUTELSAT. Dans ce domaine, il n'y aura continuité des services existants que dans la mesure où ces services seront offerts à des prix compétitifs à ceux obtenus sur Terre. Le but est donc de produire des satellites compétitifs, les plus légers possibles pour minimiser les coûts de lancement.

Du côté des nouvelles applications précédemment mentionnées, telles que les communications hauts débits avec de petites stations terriennes, il est nécessaire de bien évaluer le système à mettre en place : comment ces nouvelles applications peuvent-elles co-exister avec les applications traditionnelles sans multiplier le nombre de satellites opérationnels. Les USA ont eu un programme expérimental (ACTS). Il semble nécessaire qu'un programme européen existe afin d'optimiser le couple satellite/stations terriennes.

- Pour les applications des satellites défilants, les investissements de constellations de 77, 48, 24 satellites paraissent impressionnants. Ne serait-il pas plus raisonnable de débiter avec un programme pré-opérationnel limité montrant la faisabilité partielle d'un tel projet ?

Du côté militaire, une constellation de 6 satellites a été envisagée pour relier les antipodes à la Métropole. Cette petite constellation offre des possibilités similaires à un système de satellites relais. N'est-il pas possible d'associer des besoins civils et militaires sur un programme commun comme il a été fait pour TELECOM 1/SYRACUSE I ?

Bien évidemment, avant de se lancer dans ces programmes de type nouveau, un travail système est indispensable.

- Pour les satellites de radio-diffusion, nous avons signalé le problème des Normes : les USA envisagent de faire passer 7 programmes dans un canal de télévision classique. Ce besoin apparaît autant au niveau de la distribution par câble au sol qu'au niveau satellite. Ces problèmes sont liés aux qualités des algorithmes de compression et à la technologie des circuits types VLSI permettant d'offrir à tout utilisateur individuel un récepteur à un prix abordable. Quelles que soient les normes adoptées, les satellites de diffusion directe sont transparents et les problèmes de transmission se limitent principalement à la PIRE du satellite.

Au sol, par contre, le passage d'un système analogique à un système numérique demande de grosses modifications au niveau du récepteur. Le passage à la TVHD demande également de grosses modifications, indépendamment du problème des écrans.

Or le besoin de diffusion direct existe : les normes devront prendre en compte des évolutions de technologies pour minimiser les coûts des changements au sol. Ceci est un problème système délicat, mais indispensable à résoudre.

- Rappelons que les problèmes de sécurité, de contrôle du trafic avions et maritimes ont tendance à évoluer vers des systèmes mixtes utilisant des satellites fixes et éventuellement, défilants. Dans ce domaine, des études systèmes sont à prévoir. Un système pré-opérationnel pourrait tester de tels dispositifs.
- Pour le rapatriement des données des satellites basses orbites, l'ESA a envisagé le programme DRS. Ce programme, similaire au programme TDRSS, aux USA, a l'avantage d'une complémentarité avec ce dernier ainsi qu'avec un système similaire Japonais. Ce programme est très lié au programme de l'infrastructure orbitale et aux programmes d'observation.

Signalons que cette expertise n'a pas la prétention de définir les programmes pré-opérationnels à lancer. Il importe que les organismes français d'une part, à savoir France-Télécom, le Ministère des Armées, le CNES, et, pour l'Europe, l'ESA évaluent les meilleurs programmes pré-opérationnels à mettre en oeuvre pour que la France et l'Europe progressent dans le domaine des satellites de télécommunications.

(♦ *Références N°15* ♦)

4. CONCLUSIONS

Cette expertise a montré dans une première partie l'aspect technique des satellites de télécommunications. Elle s'est surtout consacrée à définir les nouvelles orientations des charges utiles des satellites géostationnaires, puis elle a indiqué d'une manière générale l'intérêt des satellites non géostationnaires.

Dans une deuxième partie, l'expertise définit les marchés potentiels, sans donner d'estimations précises des tailles des marchés, celles-ci étant définies par l'expertise de M. GIGET. Elle met en évidence la fragilité actuelle des industriels européens face à la concurrence américaine.

Une troisième partie donne le recensement des études en cours et les compléments envisageables.

Dans cette conclusion, il est souhaitable d'insister sur les problèmes à résoudre pour rendre l'Europe compétitive :

- ❑ Les satellites ont un rôle et des applications purement civiles. Toutefois, les USA consacrent des sommes beaucoup plus importantes à l'espace militaire. Il est impossible de dissocier ces deux domaines qui sont étroitement liés :
 - Au niveau charges utiles, les composants de base sont identiques.
 - Au niveau des satellites, les plates-formes ont beaucoup d'éléments communs. Sans position forte au niveau des composants, ainsi qu'au niveau des satellites militaires, la position des industriels dans les satellites de télécommunications civiles sera difficile.
- ❑ Les études présentées au chapitre 3 sont à prendre en compte. Elles découlent des présentations faites aux chapitres précédents. Elles sont nécessaires pour améliorer la place de l'industrie française face à la compétition internationale.
- ❑ Des programmes pré-opérationnels sont à envisager pour promouvoir les nouvelles applications des satellites de télécommunications.
 - Dans le domaine des satellites géostationnaires, les communications à hauts débits avec de petites stations à faibles coûts.
 - Pour les satellites défilants basses orbites, un programme limité devrait montrer les possibilités avec des équipements portatifs. Ce programme limité pourrait être entrepris en coopération, soit au niveau européen, soit comme dans le cas de TELECOM 1 en coopération civile et militaire au niveau français.

- Les exemples européens d'ARIANE et d'AIRBUS pourraient inciter à promouvoir un regroupement des forces européennes pour la production de satellites. Toutefois, si de longues séries peuvent être envisagées au niveau des plates-formes, les charges utiles et par conséquent, les satellites de télécommunications n'offrent que des séries de production limitées à quelques unités.

Il est donc indispensable qu'une capacité d'analyse et d'adaptation puisse optimiser les charges utiles de télécommunications aux besoins du marché. Le producteur des équipements de télécommunications semble le mieux adapté à faire ces analyses, en tenant compte d'une part des possibilités des équipements de télécommunications qu'il est nécessaire de normaliser afin d'accroître les productions de série, et d'autre part, les besoins du système de télécommunications du client tout en tenant compte des caractéristiques standards de la plate-forme.

- La rationalisation de la production des équipements des satellites de télécommunications au niveau européen paraît très souhaitable. ALCATEL ESPACE poursuit cette rationalisation avec l'AEROSPATIALE en France, ALENIA en Italie et DASA en Allemagne.

REMERCIEMENTS

L'Auteur remercie le Sénateur LORIDANT et M. de FLEURIEU de lui avoir donné l'occasion de faire cette expertise sur les satellites de Télécommunications. Il les remercie de tous leurs conseils et recommandations.

L'Auteur remercie également toutes les personnes qui l'ont aidé à réaliser et à écrire cette expertise sur les satellites de télécommunications :

- MM. HOUSSIN & RAMAT de France-Télécom ont eu la gentillesse d'accorder de nombreuses heures de discussions sur le sujet.
Souhaitons que leurs pensées et idées n'aient pas été trop déformées.
- Cette expertise a emprunté des portions entières à des travaux antérieurs faits par M. HUSSON et M. de BAYSER ; souhaitons qu'ils ne se formalisent pas de ces emprunts.
- M. COUET d'ALCATEL TELSPACE, M. BERTRAND et M. MARTI d'ALCATEL ESPACE ont rédigé les portions relatives aux stations terriennes, aux études, aux plates-formes de satellites.
Je leur adresse mes plus chaleureux remerciements pour le gros travail qu'ils ont fourni et qui était indispensable à la rédaction de l'expertise.
- Des commentaires écrits ont été faits pour l'amélioration de cette expertise par M. LUGINBUHL, M. HAGENBUCHER, M. SIMON, M. VIDAL SAINT ANDRE. Des discussions ont eu lieu avec M. MICHAUD et M. ROUFFET.
Qu'ils trouvent ici l'expression de ma reconnaissance.
- Merci à Melle Clémence PELERIN pour tout le travail matériel de frappe relatif à ce document.

REFERENCES

- 1 ♦ Aspects futurs des télécommunications spatiales
par Jean-claude HUSSON ATES 91 1260 SD 95 du 16 Avril 1991
Présentation à l'ESA
- 2 ♦ Proceedings of the IEEE
July 1990 Special issue on satellite communications
- 3 ♦ DISTRIBUTED MICROWAVE ACTIVE FILTERS
with Ga As FETs (C. RAUSCHER)
1985 IEEE MTTs - 0149-645x/85/0000-0273
- 4 ♦ Digital front-end for on board processing
RFP INTELSAT 1156 26/03/91
- ♦ Saw time compressors and expander for on board processing
RFD INTELSAT 22/03/91
- ♦ Revue des télécommunications
Volume 64 N°2/3 1990
La technologie large bande
- ♦ Satellite systems with on board processing capabilities
R. HAGENBUCHER and P. RENNEY ESPACE RCO
- ♦ Packet switching by satellite
System design issues (C. SOPRANO) ESA Journal 1990 vol 14
- ♦ R1002 Satellite in the IBCN
overview - Executive summary 02/SAT/000/AS/B/029 Race project
- ♦ On board processing architectures for international communications satellite applications
B.A. PONTANO and others
American Institute of Aeronautics and Astronautics
AIAA-90-0853-CP

- ◆ Reconfigurable on board connectivity for INTELSAT
P.V. de SANTIS Intelsat Washington D.C
- ◆ First European conference on satellite communications on satellite communications (EC SC-1)
Munche - 28-39 1989 - Elsevier - Amsterdam
- 5 ◆ TRADE OFF PROPULSION (bilan système)
Doc CA/IS/P 459 AEROSPATIALE
(proposition Intelsat VII)
- 6 ◆ Iridium filing before the federal communications commission
FCC/MELLON Dec 03 1990
- ◆ LOOPUS MOBILES D a new Mobile communication satellite system (or L.NANCKANDALL)
AIAA-90-0871-CP
- ◆ Land Mobile Communications in Ku Band
Nov. 1989 - résultats d'essais sur le terrain travaux de EUTELSAT
- ◆ Never Beyond Reach
Edite by Brandon GALLAGHER
The world of mobile satellite communications by INMARSAT
- 7 ◆ Spectral Efficiency Comparison of LEO and GSO Satellite Systems
INMARSAT Document JIWP92/52
- 8 ◆ Satellites et Fibres optiques
Politique d'Information d'informatique et de communications
OCDE 1988
- 9 ◆ The competitiveness of the European Space
Estec contract N°8876/90NL/DG
- ◆ ESPACE MONDIAL 1989 EUROCONSULT
- ◆ WORLD SPACE INDUSTRY SURVEY
10 year outlook
1989/1990/Edition EUROCONSULT
71 Bd Richard Lenoir 75011 PARIS

- 10 ♦ PACE 90
 Perspective fore advanced communication in EUROPE
 Travaux de la commission de Bruxelles
- ♦ The next generation communications satellite system
 Jan. 1989 - Future systems international corporation
- ♦ Revue des télécommunications
 Volume 64 N°1 1990
 Introduction du RNIS
- 11 ♦ Military Space Technology Advances Aviation week & Space Technology
 April 8 1991
- 12 ♦ Rapport N°752/378 Assemblée national/Sénat
 sur la télévision haute définition par MM. Forni et Pelchat
- ♦ L'avenir de la télédiffusion par satellite
 Synthèse de G.EYMER Y président de COGECOM
 Novembre 1990
- 13 ♦ OMNITRACS
 Mobile communications terminal
 Technical definition for the Euteltracs system
 Dec. 1990
- ♦ APPLICATION of LORAL CELLULAR SYSTEMS corp before the Federal communi-
cations commission Washington DC
 June 3 1991
- 14 ♦ Livre vert
 sur une approche commune dans le domaine des communications par satellites dans la
 Communauté Européenne
 COM (90) 490
 Bruxelles 20 Novembre 1990
- ♦ Rapport du CCIR Bases Techniques et d'exploitation pour la conférence administrative
mondiale des radiocommunications de 1992 (CAMR-92)
 UIT/CCIR Genève 1991
- ♦ Journal officiel de la république française
 du 30 décembre 1990 Article L 33 et L 34

- ◆ DRG Direction de la Réglementation Générale
Autorisation de réseaux VSAT Indépendantes présentation du 30 mai 1991
Ministère des postes et télécommunications

15 ◆ ESA Industrial Policy Committee

List of intended invitations to tender 1990

- ◆ CNES Recherches & Technologie Systèmes orbitaux
Plan à moyen terme 1990-1992
Mise à jour Mai 1991
- ◆ OVERVIEW of EUROPEAN Developments of on board processing
H. H. FROMM ESA
- ◆ Satellite systems integrated with the terrestrial cellular network for mobile communications
E. del RE ESA

GLOSSAIRE

- ACTS :** Advance Communications Technology Satellite : projet de la NASA très ambitieux pour faire progresser la technologie des satellites.
- Amplificateur faible bruit :** Amplificateur apportant une faible quantité de bruit de type thermique aux signaux qu'il amplifie.
- Amplificateur paramétrique :** ou Ampli Para ont remplacé les MASER : Diode paramétrique fonctionnant comme une capacité, laquelle est excitée par une pompe hyperfréquence engendrant une résistance négative capable d'amplifier.
- AMRT :** Accès Multiple par Répartition dans le Temps.
- Antenne Active :** Antenne comprenant des éléments actifs incorporés à sa structure, les éléments actifs étant des amplificateurs faible bruit (Antenne active de réception) ou des amplificateur de puissance (Antenne active d'Émission).
- Antenne Passive :** Antenne ne comportant pas d'élément actif.
- Antenne réseau :** Formé de nombreuses sources rayonnantes, ces sources étant soit dans un plan (réseau plan) soit épousant la forme d'un protecteur (avion missile satellite). Toutes ces sources possédant un élément actif suivi ou précédé de déphaseurs et de pondérateurs de niveau.
- ARCHIMEDES :** Projet de l'ESA pour un système de communication utilisant des orbites HIEO.
- ARTEMIS :** Programme expérimental de l'ESA préparant DRS.
- ARIANESPACE :** Groupement Industriel des principaux constructeurs aéronautiques Européennes pour produire des lanceurs de satellites et de navettes.
- ARIES :** Projet de constellation de satellites basses orbites par DCI/MICROSAT/CCI (USA)

ASIC :	Application Spécifique des Circuits Intégrés
Bande C :	Bande de 4 à 7 GHz en télécommunications par satellite.
Bande Ka :	Bande de 20 à 44 GHz pour communications par satellites
Bande Ku :	Bande de 11 à 14 GHz pour communications par satellites
BISDN :	Broad Band Integrated Digital Network RNIS à bande large.
BSB :	British Satellite Broadcasting Opérateur privé de satellite de radiodiffusion de télévision. A fusionné avec SKY télévision en 1990.
Charge utile :	Correspond à tous les équipements d'un satellite autre que ceux servant à maintenir le satellite dans sa position sur l'orbite et à fournir l'énergie. Tous les équipements de télécommunications d'un satellite de télécommunications font partie de la charge utile.
CDMA :	Code Division Multiple Accès Système de partage d'une même bande de fréquence par utilisations de codes différents pour chaque utilisateur.
COMSAT :	Société privée créée par acte du Congrès USA pour les communications internationales au travers d'INTELSAT.
DBS :	Direct Broadcasting Satellite Radiodiffusion directe de télévision.
DCM :	Digital Circuit Multiplication équipement : multiplexage digital de voix associé à un certain niveau de compression.
Défilant :	Satellite défilant, tourne autour de la Terre sur orbite autre que l'orbite géostationnaire.
DFS-KOPERNIKUS :	Satellite national Allemand
Démultiplexeur :	Fait l'opération inverse du multiplexeur, c'est à dire, sépare en différentes sous-bandes le signal d'entrée.

Doppler :	L'Effet Doppler amène sur toutes ondes incidentes sur un mobile un changement de sa fréquence proportionnel à la vitesse radiale du mobile.
DRS :	Data Relais Satellite. Programme de l'ESA en relation avec l'infrastructure orbitale permettant les communications inter-orbitales.
ELITE :	ELectric Insertion Transfer Expriment
ESA :	European Space Agency
EUROPESAT :	Projet de satellite de radiodiffusion directe de télévision promu par EUTELSAT.
EUROSTAR :	Plates-formes Satellite de MATRA/BAE
EUTELSAT :	Organisation Européenne chargée de commander et opérateur des satellites européens de télécommunications. Eutelsat est mandaté par les PTT européens.
EUTELTRAC :	Système dérivé du système OMNITRAC Américain pour l'Europe.
FCC :	Federal Communication Commission Bureau de la réglementation des télécommunications aux USA.
Fondeur :	Ce sont, à partir du dessin des constructeurs, les réalisateurs des MMIC.
Fréquence Intermédiaire :	Fréquences translatées des fréquences de réception, à 70 MHz pour les signaux de bandes inférieures à 70 MHz.
Géostationnaire :	Satellite géostationnaire tournant à la vitesse de la rotation de la Terre dans le plan de l'équateur à 36.000 km au dessus de l'équateur sur l'Orbite Géostationnaire.
GEOSTAR :	Société de radio localisation et messagerie aux USA
GLOBALSTAR :	projet d'une constellation de satellites basses orbites pour offrir des services de télécommunications permettant le service aux mobiles et téléphones portatifs (PCN) proné par LORAL USA.
GLONASS :	Système similaire à G.P.S. de l'URSS

G.P.S. :	Global Positioning System Système d'origine militaire avec satellite défilant pouvant donner des précisions de navigation extrêmement grande. Système U.S.
Green Paper :	Document de la commission des Communautés Européennes pour une approche commune dans le domaine des communications par satellites dans la Communauté Européenne.
G.S. :	Générateur Solaire du satellite.
GTO :	Geostationary Transfer Orbit - orbite de transfert vers l'orbite géostationnaire.
HARMFUL :	Terme consacré pour les torts commerciaux que pourrait faire un compétiteur à INTELSAT. INTELSAT peut demander l'interdiction de ces services. Ces torts peuvent être au niveau des interférences radio, aussi bien que commerciaux. Ce qualificatif s'applique aux torts d'un système radio vers un autre système radio dans la réglementation FCC.
HDTV :	Télévision Haute Télévision.
HEM :	High Electron Mobility transistor Se dit des transistors à effet de champ AS GA dont les électrons ont une mobilité élevée donnant de bonnes performances de bruit et de rendement.
HIEO :	Highly Inclined Elliptical Orbit. Se dit des orbites elliptiques pour les communications dans les parties nordiques du globe.
IDR :	Intermediate Data Rate : Norme INTELSAT de transmission de données de 2 à 45 Mbits.
IFRB :	Bureau de la réglementation des fréquences radio au niveau mondial.
INMARSAT :	Association créée à l'origine pour offrir les services voix et données aux bateaux.

INTELSAT :	Réunion d'une centaine de pays pour exploiter un système de télécommunications par satellites. L'URSS vient de rentrer dans INTELSAT. Ce système a une vocation mondiale.
IRIDIUM :	Projet d'une constellation de satellites basses orbites pour offrir des services de télécommunications aux mobiles ainsi que permettant le service des téléphones portatifs (PCN), proné par MOTOROLA USA.
ISDN :	Voir la signification à RNIS
ITALSAT :	Satellite national Italien.
IUT :	Union International des Télécommunications localisé à Genève.
KEPLER :	Physicien Allemand inventeur des lois (1609) des planètes autour du soleil, loi s'appliquant aux planètes de la Terre (satellites) : trajectoire elliptique, lois des aires, périodes P et grand axe $b(P^2 = b^3 \times Cte)$
LAN :	Local Area Network. Réseau local numérisé type ETHERNET ou TOKEN RING.
Localisation :	Le service de radio localisation permet à un opérateur d'identifier la position de l'abonné.
LOCSTAR :	Société de radio localisation et messagerie par satellite dédié en EUROPE.
LOOPUS :	Projet de MBB pour un système de radio localisation et messagerie utilisant des orbites HIEO de 12 heures
MASER :	Amplificateur, utilisant des niveaux quantiques excités par une pompe, capable de servir l'amplificateur faible bruit. Fonctionne à des températures voisines du zéro degré KELVIN.
MAN :	Metropolitan Area Network. Réseau à haut débit reliant les centraux entre eux dans une ville. Réseau en fibres de verre.
MICRO :	Se dit des satellites de masse voisine de 50 kg.
MINI :	Se dit des satellites de masse voisine de 900 kg.

MMIC :	Microwave Monolithic Integrated Circuit Circuit intégré construit directement sur le substrat, silicium ou AS GA, par les fondeurs sur dessin des industriels fabriquant les équipements
MOLNYIA :	Système soviétique de communications utilisant des orbites HIEO de 12 heures
Multiplexeur :	Combine plusieurs signaux de fréquences différentes sur une même sortie.
Navigation :	Le service de radio navigation permet à l'abonné de connaître sa position absolue (Son point)
NEWS GATHERING :	Préparation du Journal Télévisé par reportages sur sites.
ODYSSEY :	Projet de constellation de satellites basses orbites par TRW USA
OMNITRAC :	Système de radio localisation et de messagerie utilisant des satellites du système fixe FSS aux USA.
PAGING :	Système de radio messagerie pouvant être réduit à l'appel de l'abonné, complété par un service de messagerie téléphonique du réseau commuté.
PAY PERVIEW :	Service "à la carte" de programmes de télévision.
PRE-EUROPESAT :	Pré-Europesat est un projet limité à la France, l'Allemagne, l'Italie pour la diffusion direct de télévision sur ces trois pays, promu par EUTELSAT.
RACE :	Research for advance communication in EUROPE. Travaux entrepris par la Communauté Européenne pour faire progresser les télécommunications en Europe
RBOC :	Regional Bell Operation Company.
RNIS :	Réseau numérique à intégration de service
SARSAT :	Système Franco-Canadien-Américain-Soviétique offrant un système d'appel de détresse et de localisation à l'aide de satellites défilants.
SCPS :	Single Channel Per Carrier : une 1/2 voie par porteuse.

SES :	Société Européenne des Satellites Promoteur des satellites ASTRA. Construits par GE ASTRO pour Astra 1A et 1B et par HUGHES pour ASTRA 1C et 1D
SPACEBUS :	Plate-formes Satellite de l'Aérospatiales et MBB.
SSPA :	Solid State Amplifier. Amplificateur à transistors.
SYCOMORES :	Projet CNES de communications utilisant des orbites HIEO.
S80 T :	Projet en étude au CNES pour réaliser un service de messagerie à l'aide de satellites basses orbites.
TAT :	Câbles transatlantiques de télécommunications téléphoniques et de données. TAT 8 a été en 1988 le premier à utiliser les fibres optiques. TAT 9 aura une capacité de l'ordre du Gigabit.
TOUNDRA :	Système soviétique de communications utilisant des orbites HIEO de 24 heures
TRANSIT :	Système de navigation basé sur la mesure de l'effet Doppler.
Translateur de Fréquence :	Déplace le spectre des signaux dans la gamme des fréquences sans en modifier la distribution.
TRUNK :	Se dit d'un canal de transmission à voies multiplexées.
Tube à Ondes progressives (TOP) :	Amplificateur de type tube électronique où une onde ralentie interfère avec un pinceau d'électrons.
T₁ :	Standard USA de transmission de données à 1.5 Mbit/s.
USAT :	Génération suivante des VSAT.
VLSI :	Very Large Scale Integration Intégration sur des substrats pouvant atteindre le pouce.
VSAT :	Very Small Operture Terminal Se dit des stations terriennes dont les ouvertures ne dépasse pas l'ordre du mètre.

WAN :

Wide Area Network.

Réseau de dimension supérieure à une ville pour petite région.

WARC :

World Administrative Radio communication Conference.

Conférence mondiale des opérateurs de télécommunications sous l'égide de UIT (Union Internationale des Télécommunications) et IFRB. Bureau d'enregistrement des fréquences radio au niveau mondial.

OFFICE PARLEMENTAIRE
D'EVALUATION DES CHOIX
SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES

EXPERTISE n°5

VOLS HABITES ET MICROGRAVITE

(Contribution au rapport présenté par Paul LORIDANT, Sénateur de l'Essonne,
sur les ORIENTATIONS DE LA POLITIQUE SPATIALE FRANCAISE ET EUROPEENNE)

Jean-Jacques DORDAIN

Jean-Jacques DORDAIN

Activités présentes

Chef du département "Microgravité et Utilisation de Columbus" à l'Agence Spatiale Européenne (depuis mai 1986).

Maître de Conférences à l'Ecole Polytechnique.

Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure des Techniques Avancées.

Président du Comité "Station Spatiale" de la Fédération Internationale d'Astronautique.

Activités passées

Responsable des activités spatiales (1978 - 1986) et Directeur adjoint de la Direction de la Physique Générale (1982 - 1986) à l'Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales (ONERA). Chef de division et ingénieur de recherche à l'ONERA (1970 - 1978).

Conseiller du Directeur Technique Général d'Arianespace (1985 - 1988).

Consultant à l'Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie (1981-1983).

Président du comité de rédaction du rapport à l'ONU sur le bilan des technologies spatiales : "Review and Projection of Space Technology" (1981).

Sélectionné comme candidat astronaute français (1977) dans le cadre du programme SPACELAB.

Distinctions

Membre de l'Académie Internationale d'Astronautique.

Membre associé de l'Académie Nationale de l'Air et de l'Espace.

Membre du Comité des Applications de l'Académie des Sciences.

Table des matières

Introduction	1
1. Les moyens nécessaires.....	4
2. L'infrastructure orbitale.....	8
2.1 Les Stations Spatiales du passé : Saliout et Skylab	9
2.2 La Station Spatiale du présent : Mir.....	11
2.3 Les Stations Spatiales du futur : Freedom et Mir 2	12
3. Utilisation de l'infrastructure orbitale.....	14
4. Utilisation de la microgravité	19
5. Le Programme Européen d'Infrastructure Orbitale	23
5.1 Le scénario européen	23
5.2 Les éléments de Columbus	26
5.3 Les coûts de développement et d'exploitation	29
6. Conclusion	33
7. Recommandations	37
Remerciements	39

L'homme dans l'espace
par Jean-Jacques DORDAIN

Introduction

Faire vivre et travailler un homme dans l'espace est un objectif en soi, comme l'a été autrefois la conquête de nouveaux territoires; c'est de plus un moteur pour les activités spatiales, ainsi qu'un drapeau, un symbole, pour la technologie d'un pays. Enfin, ce n'est plus une question pour l'avenir, c'est une réalité du présent.

Historiquement, l'homme dans l'espace a toujours été un élément important des activités spatiales: ainsi, l'envoi du premier homme dans l'espace n'a suivi que de quatre ans l'envoi du premier satellite (Y. Gagarine et le Spoutnik), et l'homme dans l'espace est rapidement devenu l'enjeu essentiel entre les deux premières puissances spatiales: nombre d'orbites, nombre d'astronautes à bord d'un même véhicule, nombre de véhicules simultanément en orbite, première sortie extravéhiculaire et surtout premier homme sur la Lune. Cette course ne fut suivie dans le monde entier que parce qu'elle concernait des engins habités: qui se souvient encore que l'URSS a effectivement envoyé sur la Lune des engins automatiques...? Enfin, il faut souligner qu'en dépit des coups durs et des controverses - déjà nombreuses à l'époque d'Apollo -, l'homme dans l'espace n'a jamais été sérieusement remis en question. Il est d'ailleurs symptomatique de constater que les arguments des scientifiques qui contestaient le programme Apollo sont sensiblement les mêmes que ceux des scientifiques qui aujourd'hui contestent les programmes européens sur l'espace habité: à savoir que l'utilité de tels programmes est discutable, et que l'argent dépensé dans le cadre de ces programmes se trouve de facto ôté de programmes scientifiquement plus "sérieux" et "utiles", ce qui revient à prêter aux budgets une fluidité, et aux programmes une capacité de vases communicants, rarement observées...

Les programmes futurs actuellement en cours de développement aux USA et en URSS incluent un renforcement des programmes liés à la vie de l'homme dans l'espace, dans la perspective d'une occupation permanente de l'orbite terrestre par l'homme et d'explorations lointaines par l'homme (Lune, Mars): la première étape de ces programmes est basée sur le développement et l'exploitation de Stations Spatiales habitées en orbite terrestre, Freedom pour les USA (en cours de développement, pour être opérationnelle en 2000) et Mir pour l'URSS (existante et visitée régulièrement par des équipages internationaux). Le rapprochement Est-Ouest inclut l'homme dans l'espace, puisqu'en 1993, un cosmonaute soviétique s'envolera dans le Shuttle américain et un astronaute américain passera 3 mois à bord de Mir. Le rapport Augustine souvent cité comme étant la base des programmes futurs américains conserve une place de choix aux programmes habités: la décision de ne pas construire un cinquième exemplaire de l'Orbiter, interprétée à tort comme le signe de la fin des vols habités aux USA, traduit au contraire la volonté de développer un nouveau moyen de lancement pour l'homme au lieu de dupliquer un véhicule conçu au début des années 70 pour des opérations après l'an 2000. Le nouveau lanceur de la NASA (NLS pour New Launch System) recommandé par le rapport Augustine est conçu pour lancer des hommes dans l'espace après 2002.

L'Europe n'est pas absente des vols habités dans l'espace. L'année 1992 sera même riche en Européens dans l'espace: des astronautes allemand, belge, italien, suisse voleront à bord du Shuttle américain et des cosmonautes allemand et français voleront à bord du Mir soviétique. L'Europe pourrait continuer à faire vivre et travailler ses citoyens à bord de véhicules américains et soviétiques, mais ce serait reconnaître le futur de l'homme dans l'espace sans vouloir se doter des capacités industrielles correspondantes et sans vouloir devenir un partenaire majeur dans les programmes habités futurs.

En effet, comme l'illustre le programme de Station Freedom (projet coopératif entre Américains, Européens, Japonais et Canadiens), comme le démontre l'ouverture vers les pays de l'Est, l'heure n'est plus à la compétition, ni à la propagande, mais à la coopération; les activités spatiales, déjà une réussite de la coopération européenne, iront vers une internationalisation croissante, à l'échelle mondiale cette fois. Paradoxalement, ce développement de la coopération renforce le besoin pour l'Europe de développer sa propre filière d'accès à l'espace pour l'homme. En effet, la création de moyens européens, indépendants des filières américaines et soviétiques, est un élément clé de coopération: d'abord, parce que cette filière européenne, une fois qualifiée, offre une alternative d'accès à l'espace et permet ainsi d'éviter les conséquences catastrophiques, pour tous, de l'arrêt des opérations d'un moyen d'accès unique. Ensuite, parce que cette filière européenne, pourvu qu'elle soit techniquement compatible avec les éléments des filières américaines et soviétiques, permet de renforcer la sécurité des équipages en orbite. Enfin, parce que la démonstration par l'Europe de sa maîtrise technologique et opérationnelle, comparable à celle des autres, lui permettra de coopérer, en tant que partenaire à part entière, aux futurs programmes internationaux de vols habités, et non pas en tant que sous-contractant ou fournisseur.

Ainsi, si l'Europe souhaite ce statut de partenaire à part entière dans une coopération avec d'autres qui, comme nous l'avons vu, consolident leurs activités destinées à faire vivre et travailler hommes et femmes dans l'espace, elle doit non seulement poursuivre ses activités dans le vol habité, mais aussi développer des moyens autonomes correspondants.

1. Les moyens nécessaires

Le développement par l'Europe des moyens autonomes lui permettant le vol spatial habité doit se traduire par la démonstration des capacités européennes à mettre en orbite des astronautes, les y faire vivre et travailler, en liaison constante avec des équipes au sol, puis à les ramener sur Terre. Cette démonstration est faite en orbite basse.

Les moyens nécessaires sont donc de trois ordres :

- un moyen de transport des hommes à travers l'atmosphère pour rejoindre l'orbite basse (400 km d'altitude).
- une infrastructure en orbite basse (ou Station Spatiale) où les astronautes vivent et travaillent, les équipes d'astronautes se relayant par périodes de 3 à 6 mois, de manière à assurer une permanence en orbite.
- une infrastructure au sol, assurant la préparation, le contrôle et les opérations des missions orbitales.

Cette filière n'est complètement autonome que si des satellites de relais d'informations en orbite géostationnaire permettent d'assurer des liaisons permanentes entre la Station en orbite et l'infrastructure au sol en Europe (Satellite de Relais).

Il est important de remarquer que la filière d'accès à l'orbite n'existe que si tous les éléments de cette filière existent et sont qualifiés ensemble. Cette filière doit donc être optimisée sur l'ensemble des éléments et non sur chaque élément séparé, non seulement du point de vue du concept, mais aussi du point de vue opérationnel. La gestion du développement de chaque élément doit elle aussi prendre en compte cette vision d'ensemble, ce qui n'est pas facile quand chaque élément est développé par des groupements industriels différents et sur des périodes de l'ordre

de dix ans. Cette capacité de gérer un complexe de programmes au niveau européen sera l'une des expériences profitables du développement d'une filière européenne d'accès à l'espace.

Il est utile de rappeler que l'on pourrait utiliser le moyen de transport pour maintenir l'homme en orbite, comme c'est le cas par exemple du Shuttle américain. Cependant, ce concept ne permet pas d'assurer une permanence de l'homme en orbite et surtout il oblige à transporter à chaque fois à travers l'atmosphère l'ensemble des systèmes qui permet à l'homme de vivre en orbite (zone pressurisée, unités de puissance électrique, support vie): il est beaucoup plus intéressant de laisser en orbite ce qu'il n'est pas nécessaire de ramener sur Terre, on économise du transport et on peut faire grandir la partie qui reste en orbite en ajoutant des modules supplémentaires. C'est la raison pour laquelle moyens de transport et infrastructure orbitale sont distincts.

Le moyen de transport comporte une partie "lanceur" et une partie "cellule pressurisée" pour l'équipage à transporter: le lanceur fournit la propulsion nécessaire pour mettre la cellule pressurisée en orbite et c'est la cellule pressurisée qui ramène l'équipage sur Terre. Lanceur et cellule pressurisée peuvent être intégrés en un seul véhicule, comme c'est le cas pour le Shuttle américain. Ils peuvent être découplés, la cellule pressurisée étant dans ce cas la "charge utile" du lanceur: c'était le cas de la capsule Apollo américaine lancée par la fusée Saturn, c'est le cas de la capsule Soyouz soviétique lancée par la fusée A-2, ce sera le cas du planeur Hermes lancé par la fusée Ariane 5. Ce choix de découpler la fonction lanceur de la fonction cellule de transport permet de développer le lanceur indépendamment de la cellule de transport et éventuellement d'utiliser un lanceur existant, déjà éprouvé avec des lancements de satellites automatiques, pour lancer la cellule habitée: ainsi Ariane 5 est d'abord développée pour diminuer le coût de lancement de satellites automatiques et servira plus tard à lancer Hermes.

Ce n'est pas une première, puisque les capsules Mercury et Gemini américaines ont été lancées respectivement par les lanceurs Atlas et Titan, initialement développés comme missiles stratégiques. Il est utile de noter qu'il n'y a pas de différence de concept entre un lanceur de satellites automatiques et un lanceur de véhicules habités : ce n'est pas parce qu'il n'y a pas d'astronaute à bord qu'on ne cherche pas à développer un lanceur aussi fiable que possible. C'est la démonstration de cette fiabilité et la sécurité de l'équipage qui font la distinction : la démonstration de la fiabilité est assurée par des essais, et, dans le cas d'Ariane 5, les essais en vol lors des lancements de satellites automatiques en sont la meilleure démonstration; la sécurité de l'équipage est assurée au niveau du véhicule habité, par des moyens d'éjection de l'équipage.

Comme on vient de le voir, la cellule de transport des hommes peut être ou une capsule (Apollo, Soyouz) ou un planeur (Hermes) : les fonctions sont les mêmes mais les solutions technologiques sont différentes. Le véhicule Hermes est réutilisable, c'est à dire qu'après son retour sur Terre, une simple maintenance lui permet de repartir pour l'espace. Cet objectif implique un retour sur Terre sans dégradation, en un point donné du globe : c'est la raison pour laquelle Hermes doit avoir des capacités aérodynamiques, lors de la rentrée atmosphérique, bien supérieures à celles d'une capsule. Ajoutons enfin qu'Hermes, lancé de Kourou, c'est à dire presque sur l'Equateur, doit pouvoir rejoindre une Station en orbite dont l'inclinaison par rapport à l'Equateur est liée à la latitude de Cap Canaveral en Floride et doit ensuite pouvoir atterrir en Europe : cette capacité de changer de latitude impose également des capacités aérodynamiques difficilement compatibles avec une capsule sans aile. C'est la raison pour laquelle Hermes, technologie de l'an 2000, est un planeur réutilisable et non une capsule consommable qui représente la technologie des années 60/70. Enfin, les progrès technologiques réalisés au cours du développement d'Hermes bénéficieront aux projets futurs d'Avion à Grande

Vitesse, comme il est indiqué dans la conclusion de ce chapitre. La description des moyens de transport est faite dans le chapitre 1, consacré à l'accès à l'espace.

La description de l'infrastructure en orbite fait l'objet du paragraphe suivant de ce chapitre consacré à l'homme dans l'espace.

L'infrastructure sol, élément important de la réussite des opérations en orbite, comprend 3 types de centres :

- les centres de support ingénierie des véhicules en orbite, Station et cellule de transport. Ces centres qui disposent de maquettes "haute fidélité" des véhicules en orbite sont destinés à surveiller l'état actuel de ces véhicules et à simuler toute panne intervenant en orbite et la réparation correspondante avant de l'appliquer en orbite. Ces centres sont un élément essentiel de sécurité et reposent sur l'expertise technique acquise lors du développement du véhicule considéré.
- les centres d'opérations des véhicules en orbite, noeuds des communications entre le sol et l'orbite, où le directeur de la mission contrôle, gère et décide les activités en orbite.
- les centres d'entraînement, entraînement des astronautes et du personnel au sol, où les missions se préparent et sont répétées de nombreuses fois avant d'être réalisées en orbite. Cette préparation est la clé de la réussite d'une mission.

Le développement de tels moyens suppose également, en parallèle, l'acquisition par l'Europe de nouvelles techniques, spécifiques ou non au vol habité, comme par exemple le rendez-vous en orbite et l'accostage, les activités intra et extravéhiculaires, et la maîtrise de la rentrée atmosphérique. Ces technologies sont

abordées dans le chapitre 7 consacré à la recherche et technologie.

2. L'infrastructure orbitale

L'infrastructure orbitale est donc, par définition, l'ensemble des systèmes qui restent en orbite terrestre et qui permettent à un équipage de vivre et de travailler dans l'espace. Par rapport à un satellite, l'infrastructure orbitale, appelée par la suite Station Spatiale, se distingue par:

- son orbite basse (entre 250 et 450 kilomètres d'altitude), qui est le meilleur compromis entre le coût de son maintien en orbite - notamment en carburant pour compenser la traînée atmosphérique - et le coût de sa desserte par le véhicule de transport, dont les performances en charge utile sont d'autant plus grandes que l'orbite de la Station est plus basse.
- sa taille et le niveau des ressources disponibles, c'est à dire plusieurs dizaine de tonnes, plusieurs kilowatts de puissance électrique et plus de 100 mètres cubes de zone pressurisée où l'équipage peut vivre sans scaphandre.
- l'ensemble des sous-systèmes appelés "support-vie" qui lui permet d'être habitable ou habitée en permanence.
- son caractère permanent, que cette permanence soit assurée par la même Station ou par des Stations successives.

2.1 Les Stations Spatiales du passé: SALIOUT et SKYLAB

Les Stations Spatiales habitées ont été l'enjeu de la compétition entre les deux puissances américaine et soviétique au début des années 70. Cette "course" vers l'occupation prolongée de l'orbite terrestre par l'homme dans une Station est moins connue que la course vers la Lune de la fin des années 60, mais elle a été tout aussi acharnée, comme le montrent les quelques dates clés suivantes.

Après son échec dans la course vers la Lune, le programme soviétique a été entièrement redirigé vers le programme de Station Spatiale. C'est ainsi que la première Station Spatiale habitée a été soviétique: Saliout 1, première Station expérimentale, lancée le 19 Avril 71 et desservie peu après par une capsule Soyouz, permettant à un équipage de 3 hommes de séjourner pendant 26 jours, un record à l'époque, dans l'espace. Cette première Station, rentrée dans l'atmosphère 6 mois après, devait être le point de départ d'une série de Stations, civiles et militaires, assurant une présence quasi permanente de Soviétiques en orbite terrestre.

Malheureusement, une série d'échecs, dont certains au moins sont à mettre au compte de la "pression" exercée par la compétition avec les Américains, devait ralentir très sérieusement la mise en service opérationnelle des Stations soviétiques: en particulier, les échecs au lancement de Saliout 2 le 3 Avril 73 et de Cosmos 557 (considérée comme étant la première Station civile) le 11 Mai 73 ont permis aux Américains d'être les premiers à mettre en service le 14 Mai 73, une Station Spatiale opérationnelle: le Skylab, qui sera occupé pendant 171 jours par 3 équipages successifs dont le dernier restera en orbite pendant près de 3 mois (84 jours): cette Station, desservie par la capsule Apollo, lancée par une fusée Saturn, a constitué la première filière complète d'accès à l'espace comprenant une infrastructure orbitale et un véhicule de desserte. Cet ensemble a ouvert l'ère

des séjours de longue durée de l'homme en orbite et celle des laboratoires de recherche en orbite, ravitaillés régulièrement à partir du sol. Malheureusement, après 3 visites, le programme américain a été abandonné à cause d'autres priorités et jamais repris jusqu'au lancement du programme de la Station internationale Freedom.

Après la série d'échecs malheureux mentionnés plus haut, les Soviétiques ont, au contraire des Américains, poursuivi dans la voie des Stations Spatiales et de la présence permanente de l'homme dans l'espace. Depuis le lancement de la Station militaire Saliout 3, le 25 Juin 74, les Soviétiques ont maintenu successivement 5 Stations en orbite, assurant une permanence qui dure maintenant depuis plus de 17 ans. Ces Stations ont vu successivement augmenter leur durée de vie, leur taille et les ressources disponibles, le nombre et le type de dessertes, la durée du séjour d'un même équipage, suivant ainsi une progression systématique et une stratégie d'apprentissage qui font aujourd'hui des Soviétiques les maîtres incontestés des vols habités de longue durée et de la desserte d'une Station Spatiale avec 2 différentes cellules de transport: Soyouz pour les hommes et Progress pour le fret.

On peut distinguer 3 générations successives de Stations Spatiales Soviétiques:

- la première génération (Saliout 3, 4 et 5) de 1974 à 1977, chaque Station ayant une durée de vie de l'ordre de 1 an, comprenant un seul module de 20 tonnes, fournissant une puissance électrique de 4kW, possédant un seul port d'amarrage, ayant fait l'objet chacune de 1 à 2 dessertes par un Soyouz habité, et ayant permis d'atteindre une durée de séjour de l'ordre de 2 mois pour un même équipage.
- la deuxième génération (Saliout 6 et 7) de 1977 à 1986, chaque Station ayant une durée de vie de l'ordre de 4 ans,

comprenant deux modules de 20 tonnes chacun, fournissant une puissance électrique de 8 kW, possédant deux ports d'amarrage (ce qui permettait, fait très important pour les séjours de longue durée, de ravitailler la Station par le véhicule Progress, pendant que l'équipage était à bord), ayant fait l'objet d'une dizaine de dessertes par an (par le Soyouz habité et par le Progress cargo), et ayant permis d'atteindre une durée de séjour de l'ordre de 8 mois pour un même équipage.

- la troisième génération (Mir) depuis Février 86, cette Station étant encore en service aujourd'hui puisqu'elle est conçue pour une durée de vie de l'ordre de 10 ans.

2.2 La Station Spatiale du présent: MIR

Grâce à sa conception modulaire, la Station Mir peut comprendre jusqu'à 5 modules de l'ordre de 20 tonnes chacun, sa puissance électrique est de l'ordre de 10 kW, pouvant être augmentée grâce à l'adjonction de nouveaux panneaux solaires (ce type de croissance ayant déjà été réalisé sur Saliout 7). Cette Station fait aussi l'objet d'une dizaine de dessertes par an et son utilisation scientifique est beaucoup plus systématique que pour les générations précédentes, chaque module supplémentaire étant spécialisé pour une discipline scientifique, le module initial de Mir étant réservé comme zone d'habitation. Enfin, la durée de séjour pour un même équipage est passée à 12 mois.

Depuis 20 ans, le programme spatial soviétique est donc centré sur l'exploitation continue d'une Station Spatiale en orbite basse, avec 3 objectifs principaux:

- apprendre à faire vivre un homme dans l'espace pendant un an, cet apprentissage couvrant de nombreux aspects: physiologiques, opérationnels, technologiques.

- servir la politique internationale de l'URSS, ce programme ayant été une vitrine technologique pendant 20 ans et ayant permis de faire voler une quinzaine de cosmonautes non soviétiques.
- utiliser l'orbite basse à des fins scientifiques, que ce soit dans le domaine de l'observation ou dans le domaine de l'utilisation de la microgravité. Il faut noter que les seuls vols internationaux, de courte durée, ont donné lieu à 60 expériences d'astrophysique, des milliers de photographies de la Terre et 200 expériences dans le domaine des sciences des matériaux.

2.3 Les Stations Spatiales du futur: FREEDOM et MIR 2

Côté soviétique, le remplacement de la Station Mir présente par une 4e génération de Station Spatiale devrait commencer au milieu de cette décennie, si l'on se fie à la durée de vie annoncée de la Station actuelle. Les bouleversements politiques et économiques d'aujourd'hui rendent difficile toute prévision, il semble pourtant difficile d'imaginer qu'un tel investissement et une telle connaissance dans les opérations de Station Spatiale habitée n'aient pas de suite, au moins dans le cadre d'une coopération internationale. Pour l'instant, on peut imaginer que Mir 2 prendra la succession de Mir et que la conception modulaire sera encore la base du concept de Mir 2.

Côté américain, un programme de Station Spatiale est de nouveau à l'ordre du jour, après l'abandon du programme Skylab en 1974. Ce programme constitue même l'épine dorsale des programmes de développement de la NASA et le fer de lance de la politique spatiale poussée par deux présidents successifs, ce qui est exceptionnel aux Etats-Unis depuis la paire Kennedy-Johnson.

La "Station Spatiale Freedom" a deux caractéristiques essentielles :

- son caractère international, puisque cette Station sera construite conjointement par les Etats-Unis, l'Europe, le Japon et le Canada. Cette coopération fait l'objet non seulement d'accords inter-agences (Agence Spatiale Européenne pour l'Europe), mais aussi d'accords inter-gouvernementaux, indiquant clairement l'aspect politique du programme.
- sa taille et le niveau des ressources disponibles: cette Station représente 400 tonnes en orbite, fournit une puissance électrique de 75 kW et permet à un équipage de 8 hommes ou femmes de vivre et travailler dans 3 laboratoires remplis chacun de dizaines d'instruments scientifiques. L'assemblage de ce complexe orbital, prévu de 1996 à 2000, réclame une vingtaine de vols du Shuttle américain.

La desserte de Freedom sera assurée par 5 à 7 vols par an du Shuttle américain, emportant à chaque fois un équipage de 5 à 7 astronautes et 20 tonnes de fret.

Les coûts de développement de cette Station sont à la hauteur de sa taille puisqu'ils sont de l'ordre de 25 milliards de dollars. La volonté de maîtriser ces coûts a conduit à plusieurs exercices de "restructuration" de la Station Freedom: chaque exercice a confirmé le concept de base de cette Station, par contre la séquence d'assemblage a été profondément remaniée pour d'une part, limiter les pointes budgétaires au début du développement et pour d'autre part, commencer aussi tôt que possible l'utilisation des laboratoires. C'est pourquoi le rang de lancement des laboratoires a été avancé dans la séquence d'assemblage, le laboratoire américain étant lancé dès 96. C'est aussi pourquoi les laboratoires seront lancés avec des instruments scientifiques déjà pré-intégrés au sol. Ce dernier

choix qui, bien entendu, permet d'utiliser le laboratoire dès qu'il est assemblé en orbite au lieu de le laisser vide pendant quelques mois en attendant l'arrivée des instruments scientifiques à bord des vols suivants du Shuttle, a conduit à réduire la longueur des laboratoires. En effet, la taille des modules qui constituent une Station Spatiale est définie par les capacités d'emport du lanceur utilisé: c'est ce qui a fixé la taille des modules de Saliout et de Mir (de l'ordre de 20 tonnes depuis 20 ans, car c'est toujours le même lanceur, Proton, qui est utilisé), c'est ce qui fixe la taille des laboratoires de Freedom, c'est ce qui fixera la taille du Laboratoire Autonome Columbus (MTFF), lancé par Ariane 5.

Comme conséquence de la priorité calendaire accordée aux laboratoires de Freedom, le module d'habitation et plus généralement tous les systèmes qui permettent à un équipage de vivre en permanence en orbite ont été retardés dans la séquence d'assemblage, si bien que cette capacité de Freedom d'être habitée en permanence n'existera qu'en l'an 2000! Jusqu'à cette date, les laboratoires fonctionneront de façon automatique et ne seront visités par un équipage que lors des vols de desserte du Shuttle américain.

3. L'utilisation de l'infrastructure orbitale

A priori, l'objectif de base d'une Station Spatiale est de faire vivre et travailler des hommes dans l'espace. C'était même le seul objectif des premières Stations, mais progressivement l'utilisation des Stations à des fins scientifiques est devenue aussi un objectif majeur et que ce soit à bord de Mir ou à bord de Freedom, les instruments scientifiques se compteront par dizaines voire par centaines.

Quelles sont, en dehors de sa capacité à faire vivre les astronautes en orbite, les utilisations possibles d'une Station Spatiale permanente ?

Elles sont a priori de 3 types :

- l'utilisation en tant que "station service", c'est à dire comme atelier pour l'entretien et la réparation en orbite des satellites. Cette fonction implique que ces satellites soient des plate-formes "co-orbitantes" de la Station, placées dans sa zone de contrôle ou que ces satellites soient dotés de capacités de manoeuvre leur permettant de venir au rendez-vous de la Station, ou encore que la Station dispose d'un "remorqueur" capable de ramener les satellites à la Station.
- l'utilisation en tant que "relais", permettant l'assemblage de grands vaisseaux pour des missions plus lointaines ou permettant le recueil de vaisseaux revenant de missions planétaires (avec par exemple, des échantillons pouvant être analysés à la Station).
- l'utilisation en tant que "laboratoire scientifique".

Ce dernier type d'utilisation, que l'Europe prévoit de privilégier, présuppose que l'infrastructure orbitale, à l'instar d'un laboratoire terrestre, fournira à ses utilisateurs les ressources nécessaires pour leurs expériences (puissance électrique, moyens de calcul, débit de données montant et descendant...) et leur permettra en outre de bénéficier de l'environnement privilégié et unique qu'est l'environnement spatial. Ce dernier se caractérise en effet par le fait d'être en altitude, ce qui facilite l'observation, soit vers la Terre, soit vers les étoiles; par l'accès à un vide de capacité infinie; et par l'état de microgravité, c'est à dire de quasi-absence de pesanteur. Ces trois caractéristiques très diverses aident à comprendre que l'utilisation d'une infrastructure orbitale est, par nature, multidisciplinaire, certaines disciplines tirant profit de l'altitude (observation de la Terre, science spatiale) et d'autres de la microgravité (physique des fluides, biologie, etc.): il convient donc de développer une infrastructure qui soit

suffisamment flexible pour pouvoir répondre aux besoins de ces disciplines, et pour s'adapter à l'évolution scientifique pendant sa durée de vie - à titre d'exemple, la Station Freedom a une durée de vie prévue de trente ans.

S'il est difficile de dire aujourd'hui quelles seront les expériences scientifiques faites à bord de la Station en 2020, on peut d'ores et déjà mesurer l'intérêt des scientifiques européens pour utiliser une infrastructure orbitale, grâce aux réponses envoyées suite à un "appel à expériences" sur Spacelab et Eureca, 2 laboratoires orbitaux qui préfigurent la partie laboratoire de la Station Spatiale. Plus de 500 propositions d'expériences ont été reçues en Mai 91, impliquant une communauté de plus de 1000 scientifiques. Ce résultat indique clairement qu'il existe un noyau d'utilisateurs intéressés par l'environnement offert par la Station Spatiale, et les vols de Spacelab et d'Eureca qui auront lieu entre 92 et 98 conduiront à un accroissement de cette communauté scientifique.

L'analyse de ces propositions montre que cette communauté est européenne et multidisciplinaire. Européenne parce que tous les Etats Membres de l'Agence Spatiale Européenne sont représentés dans cette communauté et aussi parce que plus de 30% des propositions sont le résultat d'une coopération entre différents laboratoires de différents pays. Multidisciplinaire parce que ces propositions représentent un large éventail de disciplines scientifiques: les unes utilisant spécialement l'état de microgravité (300 propositions) comme la biologie, la physique des fluides, la cristallisation, etc., d'autres utilisant spécialement l'altitude (60 propositions) comme la physique solaire, l'étude de l'environnement atmosphérique, etc., d'autres enfin tirant parti de l'environnement spatial en général, essentiellement pour des expériences à caractère technologique (140 propositions) préparant les techniques du futur.

Cette analyse donne un aperçu des différentes disciplines scientifiques et technologiques qui pourront tirer parti de l'environnement offert par la Station Spatiale. Il est certain que la plupart de ces disciplines, voire toutes, peuvent chacune se passer de la Station Spatiale: certaines, relatives à l'observation de la Terre ou aux sciences spatiales (astronomie, astrophysique), ont déjà une panoplie de moyens bien établis, à base de satellites automatiques. D'autres, relatives à l'utilisation de la microgravité, ne disposent pas encore de moyens établis et ont pour l'instant recours à des occasions de vol spatial rares et sans assurance de continuité, ou encore à des moyens offrant la microgravité pendant des durées très courtes. On pourrait envisager de développer d'autres moyens que la Station Spatiale afin d'assurer un accès systématique à l'état de microgravité pour les expériences intéressées par cet environnement: plate-forme automatique (de type Eureka), capsule automatique, etc., mais d'une part ces moyens n'existent pas complètement en Europe (la plate-forme Eureka est lancée par le Shuttle américain) et d'autre part, la Station Spatiale offre un certain nombre d'avantages par rapport aux moyens classiques, en particulier par rapport aux satellites:

- elle évite de transporter à chaque fois, à travers l'atmosphère, l'ensemble des ressources nécessaires pour faire une expérience spatiale, et elle permet de limiter ce transport aux seuls instruments. Par exemple, la plate-forme Eureka qui est transportée à chacune de ses missions par le Shuttle américain a une masse de 4 tonnes pour 1 tonne d'instruments scientifiques; de même, le laboratoire Spacelab, lui aussi transporté par le Shuttle, a une masse de 13 tonnes pour 3 tonnes d'instruments scientifiques. Une fois la Station Spatiale en orbite, seuls le matériel nécessaire à sa maintenance et les instruments scientifiques auront à être transportés à travers l'atmosphère, ce qui constitue une économie importante, quand on sait que la moitié des coûts des activités spatiales sont dûs au transport à travers l'atmosphère.

- elle possède des ressources d'au moins un ordre de grandeur supérieur à celles d'un satellite classique: plusieurs centaines de mètres-cubes de volume pressurisé, plusieurs dizaines de mètres-carrés de surface disponible pour des instruments externes, plusieurs dizaines de kilowatts disponibles pour les instruments scientifiques, ce qui permet de grouper des instruments de nature complémentaire et d'utiliser des instruments volumineux et/ou gourmands en puissance électrique.
- elle est disponible en permanence, avec un temps d'accès limité à quelques mois: tous les 2 mois, le Shuttle américain desservira la Station Freedom; tous les 6 mois, Hermes desservira le Laboratoire autonome Columbus. Ainsi, de nouveaux instruments, de nouvelles technologies, des pièces de rechange, pourront être installés en orbite pratiquement dès qu'ils seront disponibles sur Terre.
- elle est habitée, ce qui peut être un avantage, même si ce n'est pas nécessaire. L'équipage offre des capacités de mise au point et de réparation qui peuvent être très utiles surtout quand il s'agit de mettre en oeuvre un nouvel instrument ou une nouvelle technologie.

C'est pourquoi, même si la Station n'est pas un "must" pour chaque expérience individuelle, elle sera un complément très utile aux moyens existants d'Observation de la Terre et des Sciences Spatiales et elle constituera l'épine dorsale de l'accès continu à la microgravité.

On n'envoie pas l'homme dans l'espace pour faire des expériences de microgravité, mais envoyer l'homme dans l'espace donne accès à un environnement de microgravité, utile à certaines expériences scientifiques.

4. L'utilisation de la microgravité

L'état de microgravité est l'une des caractéristiques originales offertes dans un véhicule spatial en orbite autour de la Terre quand ses moteurs sont inactifs. Cet état est lié au fait que la force d'attraction du véhicule par la Terre (pratiquement aussi grande en orbite qu'au sol) est presque exactement compensée par une autre force, centrifuge, créée par la vitesse du véhicule autour de la Terre. Sans effet perturbateur, cette compensation serait parfaite et conduirait à un état de "non-gravité", mais le freinage dû à l'atmosphère résiduelle à l'altitude de vol du véhicule, le gradient de gravité entre deux points éloignés du véhicule, les mouvements du véhicule induisent une faible gravité résiduelle nommée "microgravité". Ce nom de baptême veut indiquer que la gravité résiduelle est de l'ordre du millionième de la gravité que nous connaissons à la surface de la Terre.

L'utilisation de la microgravité est encore très récente puisque seuls les véhicules spatiaux permettent d'obtenir cet état pendant une durée supérieure à quelques minutes. En effet, l'état de microgravité ne peut être reproduit sur Terre que par l'intermédiaire de la chute libre, ce qui limite sa durée à quelques secondes dans un bâtiment, à quelques dizaines de secondes dans un avion et à quelques minutes dans une capsule lancée par une fusée-sonde. Comme l'utilisation de la microgravité n'a pas été le premier objectif des activités spatiales, les résultats acquis à ce jour sont encore limités, dispersés et même quelquefois décevants.

Et pourtant! l'état de microgravité a un potentiel d'utilisation dont les limites sont encore inconnues, certains n'hésitant pas à le qualifier de quatrième environnement après la Terre, l'Air et l'Eau. Sans céder à l'enthousiasme, on peut rappeler que l'être humain, sa morphologie, son équilibre, son mouvement, sa vie de tous les jours, sont directement liés à l'état de gravité dans

lequel il évolue sur Terre: sa position debout, l'irrigation de son corps par des fluides, mais aussi la direction verticale des flammes qu'il utilise, la stratification des liquides de densité différente (ce qui fait par exemple rester le pétrole sur la mer), la taille des gouttes et de multiples autres phénomènes, comme le fait que l'homme ou l'objet tombent en l'absence de support, sont dus à cette force d'attraction qu'exerce la Terre. C'est pourquoi l'état de microgravité est un état encore bien méconnu: l'inventaire et la description des processus physiques qui s'y passent sont loin d'avoir été faits. Bon nombre de ces processus sont, sur Terre, cachés par la force de gravité parce que leurs effets sont négligeables par rapport à ceux de la gravité.

Les premières recherches concernant ce nouvel univers ont eu pour but d'adapter l'homme à l'état de microgravité puisque cette adaptation est une des conditions essentielles de la découverte de l'espace par l'homme et du maintien de celui-ci dans l'espace: des progrès très sensibles ont été faits dans ce domaine et on sait maintenant faire vivre un homme en état de microgravité pendant un an grâce au programme soviétique de Station Spatiale décrit plus haut. On connaît les modifications physiologiques entraînées par cet état, on sait contrer leurs effets par des exercices et des médicaments, et on sait réadapter l'homme à la gravité en quelques semaines.

En ce qui concerne les processus physiques de base qui pilotent le comportement des gaz, des liquides et des solides en microgravité, leur étude est encore dans une phase très préliminaire, parce que les occasions de vol orbital sont encore exceptionnelles, non répétitives, et parce que les débuts de l'exploration scientifique d'un nouvel environnement sont toujours difficiles: ou bien ce type de recherches est "protégé" et alors il risque d'être coupé du monde scientifique établi et de ses meilleurs chercheurs, ou bien les propositions de recherches de ce type sont soumises au même processus de

sélection que les propositions plus traditionnelles, sur des phénomènes ou environnements déjà connus, et alors elles souffrent de leur nouveauté, de leur incertitude, de leur coût, et de la durée nécessaire pour les entreprendre, encore incompatible avec le temps d'une thèse.

Et pourtant, malgré ces difficultés, les débuts sont encourageants et quelques résultats probants sont à relever. Ainsi 20% des cristaux de protéine faits dans l'espace (une centaine à ce jour) sont plus gros et plus purs que ceux faits sur Terre. Or il est nécessaire, afin de connaître la structure fine de la protéine en vue d'une synthèse ultérieure, d'obtenir des cristaux les plus gros et les plus purs possibles. Et le potentiel de recherches est si grand qu'on peut faire confiance au monde scientifique: il saura tirer parti de cet environnement nouveau, où les flammes sont sphériques parce que pilotées par les seuls phénomènes de diffusion, où les gouttes de liquide sont des sphères de plusieurs centimètres de diamètre parce que la tension de surface est la force prépondérante, où les mélanges de fluides de densité différente sont parfaitement homogènes en l'absence de force d'Archimède, pour améliorer les connaissances scientifiques dans les domaines de la physique des fluides, des changements de phase, de la combustion.

L'utilisation de la microgravité commence d'abord par un programme de recherche fondamentale ayant pour but de définir et de maîtriser les caractéristiques de cet environnement, et de connaître les processus de base qui y gouvernent les phénomènes physiques à l'échelle macroscopique. Un tel programme a besoin de continuité, c'est à dire d'un accès facile et régulier aux vols spatiaux, et de temps, c'est à dire une dizaine d'années de recherches continues.

Suite à ce programme de recherche fondamentale, sous quelle forme, dans quel domaine, doit-on envisager les applications? En ce qui concerne la forme, les applications n'impliquent pas

forcément une production de masse dans l'espace. L'amélioration des connaissances dans la description de processus physiques de base est utile à la description théorique de phénomènes complexes et à l'amélioration de la fabrication de produits terrestres. La fabrication dans l'espace d'échantillons témoins, ou de germes destinés à une production terrestre, constitue une étape intéressante car elle n'implique pas de transfert important de masse entre la Terre et l'espace. Enfin, la production de masse dans l'espace ne pourra être envisagée que dans l'hypothèse d'une réduction importante des coûts de transport Terre-espace-Terre. En ce qui concerne le domaine d'applications, l'extrapolation simple de ce que l'on connaît aujourd'hui de l'utilisation de la microgravité est hasardeuse car il y aurait risque de passer à coté d'une application intéressante. Cependant, les produits pharmaceutiques, les composants électroniques, les verres et les matériaux nouveaux sont des domaines qui sont susceptibles de tirer bénéfice du fait de pouvoir faire dans l'espace des produits de taille plus importante et/ou contenant moins d'impuretés.

L'utilisation de l'état de microgravité en est donc à ses débuts, la recherche fondamentale doit être privilégiée, ses applications sont encore mal définies mais son potentiel est si grand qu'il devrait être un grand stimulant non seulement de la recherche dans l'espace mais aussi de la recherche terrestre associée.

La Station Spatiale offrira enfin la continuité de services nécessaire aux recherches pouvant bénéficier de l'environnement en microgravité. Elle donne dès aujourd'hui, une perspective à long terme aux chercheurs qui ont besoin de cet environnement.

5. Le Programme Européen d'Infrastructure Orbitale

5.1 Le scénario européen

Lors des réunions du Conseil de l'Agence Spatiale Européenne au niveau ministériel, tenues successivement à Rome en 1985 et à La Haye en 1987, les Etats Membres ont clairement décidé de faire de "l'homme dans l'espace" un des objectifs prioritaires des activités spatiales de la prochaine décennie. Pour concrétiser cette volonté, ces Etats Membres ont pris la décision de faire développer par l'industrie européenne un lanceur: Ariane 5, un véhicule de transport habité: Hermes, une Infrastructure en Orbite: Columbus et un satellite de relais de données: DRS, c'est à dire tous les éléments d'une filière complète d'accès à l'orbite basse pour l'homme.

Cette décision, amorcée en 85 et confirmée en 87, était assortie d'un phasage des programmes Hermes et Columbus. Etant donné le manque de maturité technique et d'assise industrielle de ces deux programmes à l'époque des décisions (1987), les Etats Membres avaient décidé de financer une première phase de développement de ces deux programmes, cette première phase devant durer 3 ans. En fait la première phase aura duré 4 ans et le passage en phase 2 de ces deux programmes est attendu au mois de Novembre 91.

Au cours de ces quatre années, les programmes Hermes et Columbus ont atteint cette maturité technique et cette assise industrielle dont ils avaient besoin. Leur faisabilité technique est confirmée et leurs capacités opérationnelles sont bien définies. D'autre part, les leçons de l'actualité, et notamment les conséquences de l'accident de Challenger, sur l'utilisation de l'orbite basse, ont été prises en compte dans la programmation des développements européens. La stratégie européenne en matière d'infrastructure orbitale habitée, telle qu'elle sera proposée pour le passage en phase 2 des programmes Hermes et Columbus, repose sur deux grands principes:

- disposer de deux filières d'accès à l'orbite basse pour l'homme, indépendantes d'un point de vue technique et opérationnel: ceci permet d'avoir un accès continu dans le temps, même si une des filières d'accès est momentanément indisponible.
- rendre les éléments de ces deux filières compatibles entre eux, ce qui permet, si besoin, de dépanner ou de compléter une des filières avec un ou plusieurs éléments de la deuxième. Ceci renforce aussi, bien entendu, la sécurité de l'ensemble.

Pour les raisons citées dans l'introduction de ce document, une des filières d'accès doit être composée entièrement d'éléments développés et opérés par l'Europe: c'est la filière constituée par Ariane 5, Hermes, le Laboratoire Autonome Columbus (MTFF) et le satellite relais DRS.

La deuxième filière d'accès pour l'Europe est assurée par une participation européenne à la filière américaine constituée par le Shuttle (à la fois lanceur et véhicule de transport des hommes et du fret), la Station Freedom et le satellite de relais de données TDRS. Cette participation européenne est concrétisée par le Laboratoire Attaché Columbus (APM), partie intégrante de la Station Freedom. La fourniture par l'Europe de l'APM lui permettra de disposer de 12,8% de l'ensemble des ressources offertes par la Station Freedom, y compris du volume de charge utile emporté à chaque fois par le Shuttle de desserte.

La compatibilité entre les éléments de ces deux filières conduit à rendre faisable la desserte du Laboratoire Autonome Columbus par le Shuttle américain et symétriquement à rendre faisable la desserte et le ravitaillement de la Station Freedom par Ariane 5 et Hermes. Ce ravitaillement de Freedom par Ariane 5 permettrait en plus à l'Europe de payer sa contribution aux coûts d'exploitation de Freedom en fournitures européennes au lieu de le faire en dollars.

Le choix de l'orbite basse par l'Europe est lié au fait que cette orbite:

- représente le premier pas naturel pour le développement d'une filière européenne d'accès à l'espace.
- est la seule compatible avec les capacités du lanceur Ariane 5.
- est celle des programmes habités actuels américains et soviétiques.

La programmation dans le temps de cette stratégie dépend:

- du calendrier de la séquence d'assemblage de la Station Freedom pour la filière américaine.
- du calendrier de développement de l'avion spatial Hermes qui est l'élément le plus difficile technologiquement de la filière européenne.

Pour ce qui est de la filière américaine, l'assemblage de la station s'étalera de 1996 à 2000, le laboratoire américain étant lancé en 96, les laboratoires japonais et européen (Laboratoire Attaché Columbus) en 98 et le module d'habitation en 99: en l'an 2000, la Station Freedom sera complète et pourra être habitée en permanence par un équipage de 4 puis de 8 hommes et femmes.

Pour ce qui est de la filière européenne, le calendrier de développement de l'avion Hermes a été défini à la fois en mettant d'abord l'accent sur les technologies critiques du projet (protection thermique, aérothermodynamique, pile à combustible, logiciel) et en respectant les contraintes budgétaires annuelles définies par les Etats Membres de l'Agence Spatiale Européenne: ce scénario de développement limite les risques techniques et financiers du programme. La mise en place de ce développement

conduit à disposer d'une filière européenne complète en 2004, ce qui correspond à un premier vol de l'avion Hermes en 2001/2002.

L'ensemble de ce scénario est complet, et aussi équilibré, progressif et flexible. Equilibré, parce qu'il met en place des moyens en coopération et des moyens autonomes et parce qu'il étale le développement de ces moyens en commençant l'exploitation de la filière américaine en parallèle avec le développement de la filière européenne. Progressif, parce que le développement de l'avion Hermes est progressif (comme indiqué plus haut), et que sa qualification opérationnelle est conduite par étapes, parce que l'utilisation par l'Europe de la filière américaine entre 1998 et 2004 lui permettra de consolider son expérience des vols habités avant d'opérer sa propre filière et parce que les ressources offertes en orbite aux utilisateurs scientifiques augmenteront par étapes pour atteindre leur pleine capacité en 2004 quand les deux Laboratoires Columbus seront opérationnels. Flexible, parce que grâce à la compatibilité citée plus haut, un retard de développement de l'un des éléments d'une filière ne met pas en péril l'ensemble du scénario et parce que d'autres coopérations peuvent être renforcées plus tard dans le scénario, notamment avec les Soviétiques.

Ce scénario comprend non seulement le développement des véhicules spatiaux mais aussi la mise en place de l'infrastructure sol, d'autant plus importante qu'elle constituera la "partie visible" de l'ensemble quand tous les éléments seront en exploitation.

5.2 Les éléments de Columbus

En plus des 2 laboratoires pressurisés décrits ci-dessous, le programme Columbus comprend, pour des raisons historiques, une plate-forme polaire dont l'objectif essentiel est l'observation de la Terre, traitée au chapitre 3.

Ces 2 laboratoires pressurisés sont respectivement :

- le Laboratoire Attaché (APM), objet de la participation européenne à la filière américaine
- le Laboratoire Autonome (MTFF), la partie "infrastructure en orbite" de la filière européenne.

Le Laboratoire Attaché Columbus est un module pressurisé, c'est-à-dire que les astronautes pourront y travailler "en bras de chemise". Il sera lancé par le Shuttle américain en Septembre 98 (selon la définition actuelle de la séquence d'assemblage de la Station Freedom) et desservi ensuite régulièrement, à la Station, par ce même Shuttle tous les deux à trois mois. Sa durée de vie est de 30 ans. Le Mémoire d'Accord entre l'ESA et la NASA prévoit que la NASA pourra utiliser la moitié de ce Laboratoire, l'autre moitié étant réservée à l'utilisation européenne.

Le Laboratoire Attaché Columbus sera composé de plusieurs segments, dont la longueur totale est de 11.8 mètres pour un diamètre de 4.46 mètres, sa masse à vide est de 13 tonnes. Il pourra abriter jusqu'à 10 tonnes de charge utile. Il est prévu de le lancer avec 4 tonnes de charge utile, déterminée par les capacités de lancement du Shuttle américain, ce qui correspond pratiquement à la totalité de la charge utile européenne; les charges utiles additionnelles, essentiellement américaines, seront lancées et installées lors de vols d'assemblage ultérieurs. Les ressources du Laboratoire Attaché lui seront fournies par la Station Freedom : il pourra disposer de 20 kW de puissance électrique, dont 13.5 kW pour ses charges utiles, et d'un débit de données descendant de 50 Mbits/s. Les charges utiles seront installées dans des racks standards, et 20 doubles racks seront disponibles au total pour des expériences scientifiques. Ces racks pourront être maintenus, réparés et échangés en orbite, ce qui permettra de faire évoluer la charge

utile en fonction des besoins des utilisateurs. Enfin, il est prévu de doter ce Laboratoire Attaché d'une plate-forme externe permettant l'installation d'instruments externes destinés à l'Observation de la Terre, à la Science Spatiale et à la technologie. Les instruments internes seront issus des disciplines des Sciences des Matériaux, de la Physique des Fluides, des Sciences de la Vie et de la Technologie.

Le Laboratoire Autonome Columbus est également un laboratoire pressurisé, mais à la différence du Laboratoire Attaché, il n'est pas prévu pour être habité en permanence, il est visitable, c'est-à-dire qu'il fonctionnera en mode automatique pendant des périodes de 6 mois. Il sera desservi deux fois par an par l'équipage de la navette Hermes pour l'entretien et la reconfiguration de ses charges utiles. La durée de la desserte de ce Laboratoire par Hermes sera de l'ordre d'une semaine, elle pourra être étendue à quelques semaines après quelques années d'opérations. La condition de compatibilité entre les deux filières d'accès impose à ce Laboratoire d'être sur une orbite "coorbitante" de la Station Freedom, c'est-à-dire une orbite circulaire inclinée à 28.5 degrés à une altitude d'environ 500 km, pour pouvoir être desservi si besoin par le Shuttle américain. Sa durée de vie prévue est de 10 ans, et il est prévu que ce Laboratoire soit lancé en 2003 par Ariane 5.

Le Laboratoire Autonome Columbus sera composé d'un module pressurisé de 6.2 mètres de long, et de même diamètre que le Laboratoire Attaché, pour l'installation d'expériences scientifiques, et d'un module de ressources lui fournissant une puissance électrique totale de 10 kW, dont 4 kW pour les charges utiles, et un débit de données descendant de 10 Mbits/s. Sa masse à vide est de 16 tonnes, il pourra abriter jusqu'à 6 tonnes de charge utile. Il est prévu de le lancer avec pratiquement toute sa charge utile afin de réserver les vols de desserte d'Hermes à la maintenance et à l'entretien de ces charges utiles. Les charges utiles seront installées dans des racks semblables à ceux

du Laboratoire Attaché, disponibles pour des expériences scientifiques dans les disciplines utilisant la microgravité, et souhaitant bénéficier d'un bon niveau de microgravité pendant des périodes de longue durée. En effet, le niveau de microgravité offert par le Laboratoire Autonome sera d'un ordre de grandeur meilleur que celui offert à bord de la Station Freedom, parce qu'il vole à une altitude plus élevée et qu'il n'est pas habité en permanence. Enfin, des instruments externes pourront être installés pour des expériences de Science Spatiale (physique solaire) et de technologie.

Il est intéressant de remarquer que ce Laboratoire Autonome Columbus est pratiquement de la taille des premières Stations soviétiques Saliout (cette taille étant liée à la capacité du lanceur utilisé), mais qu'il est à la fois un module d'activités habitées (quand Hermes y est docké), et un laboratoire automatique (quand Hermes n'y est pas docké), ce qui fait son originalité.

5.3 Coûts de développement et d'exploitation

La participation de l'Europe au développement de la filière américaine est de l'ordre de 1 Milliard d'unités de compte et le développement de la filière européenne, hors Ariane 5, est de l'ordre de 10 Milliards d'unités de compte.

Le développement d'Ariane 5 n'est pas compté dans le coût global de la filière européenne puisqu'il doit être entrepris même si le développement de l'infrastructure orbitale habitée était arrêté, l'objectif essentiel d'Ariane 5 étant de diminuer le coût de lancement des satellites automatiques. C'est l'avantage financier de contraindre cette infrastructure orbitale, et notamment Hermes, d'utiliser Ariane 5 comme lanceur.

Ces coûts de développement sont sensibles à plusieurs paramètres, techniques bien sûr, mais aussi décisionnels: l'ordre de grandeur indiqué ci-dessus pour la filière européenne suppose qu'une décision définitive de développer l'ensemble est prise en Novembre 91: tout retard de décision ou un nouveau phasage du développement entraînerait une démobilisation des équipes industrielles, un nouveau découpage des activités et une phase de transition qui se traduiraient par des coûts additionnels. De même, un étalement supplémentaire du développement reculant la date de lancement des éléments de l'infrastructure, et en particulier d'Hermès, impliquerait un maintien prolongé des équipes industrielles et là encore des coûts de développement additionnels, en dehors de toute notion d'aléas technique.

Après le développement de ces éléments, l'exploitation de l'ensemble (à partir de 2005) sera de l'ordre de 1 Milliard d'unités de compte par an, dans l'hypothèse où l'avion Hermès visite deux fois par an le Laboratoire Autonome Columbus. La valeur relative de ce coût d'exploitation annuel par rapport au coût de développement (environ 10%) est cohérente avec l'expérience de l'exploitation de grands moyens d'essais (souffleries) et de grandes infrastructures (centres de retraitement) sur Terre. Sur le total de ce coût d'exploitation, 20 % correspondent à la participation européenne dans l'exploitation de la filière américaine. Sur les 80% correspondant à l'exploitation de la filière européenne, la moitié est relative à la production de matériel (2 lanceurs Ariane 5, pièces de rechange d'Hermès et de Columbus) par l'industrie européenne, et l'autre moitié au fonctionnement des centres de l'infrastructure au sol.

Etant donné que le coût de dix ans d'exploitation est du même ordre de grandeur que le coût de développement, le concept d'ensemble des éléments de la filière européenne doit être optimisé d'un point de vue coût sur l'ensemble développement plus exploitation. Il n'est pas certain que le minimum de coût de

développement correspondre au minimum des coûts de développement et d'exploitation. C'est pourquoi le concept de la filière Ariane 5, Hermes, Columbus, DRS, doit prendre en compte l'aspect opérationnel.

Le financement des coûts de développement est assuré par les Etats Membres de l'Agence Spatiale Européenne. La participation de chaque Etat Membre au financement du développement est différente d'un élément à l'autre, les motivations et les capacités industrielles de chaque Etat étant différentes. Ainsi, le programme Columbus (APM et MTFP) est financé en grande partie par l'Allemagne (38%) et l'Italie (25%), la France n'étant que le troisième contributeur (13,8%). Le programme Hermes est, lui, financé en grande partie par la France (43%), et par l'Allemagne (25%). Il est à noter que la Belgique et l'Espagne contribuent de façon significative (5 à 7%) au développement de ces deux programmes. Enfin, le programme de satellite relais DRS est financé en grande partie par l'Italie.

Etant donné la règle du "juste retour", les responsabilités industrielles dans le développement de ces éléments sont liées au pourcentage de financement des Etats Membres. L'allemand DASA et l'italien Alenia sont les maîtres d'oeuvre du programme Columbus, le français Aerospatiale, associé avec Dassault, le maître d'oeuvre du programme Hermes, et l'italien Alenia le maître d'oeuvre du programme DRS. Il faut noter que la répartition des activités industrielles sera facilitée par la création de groupements industriels comme EuroHermespace et EuroColumbus, puisque dans le cadre de ces nouvelles sociétés, c'est l'industrie elle-même qui négocie les compromis nécessaires sur l'ensemble d'un programme.

Le financement des coûts d'exploitation n'est pas encore figé, mais il est nécessaire d'assurer les mécanismes de financement de cette exploitation au moment de la décision relative au développement: si l'Europe développe une infrastructure orbitale,

elle doit s'engager à assurer sa maintenance et un niveau minimum d'utilisation. Il est clair que seuls les Etats Membres de l'Agence Spatiale Européenne sont susceptibles de prendre un tel engagement, et plus précisément, parmi ces Etats Membres, ceux qui ont pris la décision de financer le développement. La participation financière de ces Etats Membres dans le programme d'exploitation doit refléter à la fois la part prise dans la décision du développement et le retour en activités industrielles et opérationnelles dans le cadre de cette exploitation. Le retour en activités industrielles, essentiellement lié à la production de matériel, est en première approximation proportionnel à la participation dans le développement. Le retour en activités opérationnelles est lié à l'implantation géographique de l'infrastructure sol. Ainsi, la France devrait financer entre 25 et 30% des coûts d'exploitation et obtenir en retour, d'une part sa part de fabrication des lanceurs Ariane 5 et des rechanges d'Hermes, et d'autre part le fonctionnement des centres de Kourou et de Toulouse pour ce qui est de leur implication dans les opérations d'Ariane 5/Hermes.

Cet engagement de financer un niveau minimum du programme d'exploitation par les Etats Membres sera accompagné d'actions visant d'une part à diminuer les coûts d'exploitation et d'autre part à financer une partie de ces coûts par des utilisateurs sur une base commerciale. Ces utilisateurs ne seront certainement pas les plus nombreux au début de la phase d'exploitation de l'infrastructure, mais les premiers résultats aidant, ils pourraient représenter à terme une part non négligeable de l'utilisation de la Station, en particulier dans le domaine de l'utilisation de la microgravité.

6. Conclusion

L'homme dans l'espace est une réalité qui ne fera que s'amplifier au rythme des progrès techniques et de l'évolution économique. Le monde n'est pas limité à la surface de la Terre, comme il n'était pas limité à l'Est de l'Océan Atlantique en 1492. En outre, dans l'esprit du public, l'aspect humain des activités spatiales prend toujours le pas sur le succès purement technique ou scientifique: la nomination d'un astronaute pour un vol spatial fait la une des journaux en Europe. Enfin, l'homme dans l'espace est, parmi les activités pacifiques, celle qui illustre le mieux la capacité technique et scientifique d'un Etat ou d'un groupe d'Etats.

Les questions sont donc liées au calendrier et aux moyens.

En ce qui concerne le calendrier, l'"homme dans l'espace" se résume à une question de priorité par rapport aux autres activités spatiales dans le cadre de contraintes budgétaires sur l'ensemble de ces activités. Etablir des priorités revient souvent à privilégier le court terme et la continuation des activités traditionnelles au détriment du long terme et des activités nouvelles: le risque est ainsi de perpétuer les déséquilibres. En outre, la notion de priorité est subjective quand il s'agit de comparer des activités aussi différentes que les études d'environnement, les télécommunications spatiales et les moyens de faire vivre un homme dans l'espace. C'est pourquoi le choix raisonnable est d'essayer de trouver un compromis qui permette d'assurer l'ensemble des activités et de programmer les activités nouvelles de telle façon que les activités traditionnelles n'en souffrent pas. C'est le choix qui est à la base de la proposition de l'Exécutif de l'Agence Spatiale Européenne aux Etats Membres: renforcer les activités liées à l'environnement et développer les moyens de faire vivre un homme dans l'espace à un rythme qui soit compatible avec une augmentation budgétaire de l'ordre de 10% par an pendant 4 ans.

En 1996, les activités liées aux vols habités représenteront 20% du budget total des activités spatiales en Europe, alors qu'elles représentent aujourd'hui 35% du budget de la NASA (données Euroconsult).

Cet équilibre entre les différentes activités spatiales européennes avait déjà été défini par les Etats Membres en 1985 et confirmé en 1987. C'est à dire que s'il y avait un changement de stratégie en 1991, il s'agirait de rompre cet équilibre en décidant d'arrêter les activités liées à l'homme dans l'espace. Il faut donc analyser les conséquences possibles d'une telle réorientation, d'abord au plan européen, ensuite au plan français.

Au plan européen, les conséquences seraient les suivantes:

- rompre les accords internationaux relatifs au programme de la Station Freedom dont l'objectif est clairement lié à l'homme dans l'espace
- perdre l'investissement des cinq dernières années dans ce domaine, qui non seulement se chiffre à un montant d'activités de l'ordre de 1 Milliard d'unités de compte, mais aussi à des efforts non chiffrés pour bâtir des groupements industriels qui disparaîtraient en l'absence de programme. Perdre cet investissement n'est rien si on s'est trompé, c'est beaucoup plus grave si on décide de reprendre ces activités quelques années plus tard, car tout est à refaire. C'est pourquoi un tel arrêt reporte l'échéance suivante à au moins 10 ans.
- risquer de rater le prochain wagon de l'exploitation habitée internationale.

- risquer de ne pas donner la chance qu'elles méritent aux activités liées à l'utilisation de la microgravité. Ces activités ne sont pas encore suffisamment établies pour justifier des investissements spécifiques assurant une continuité de service. Elles sont apparues en Europe grâce à l'investissement du laboratoire Spacelab dans les années 80, elles bénéficieront largement des investissements faits pour faire vivre un homme dans l'espace.

- ne pas changer de vitesse pour ce qui est du niveau global des activités spatiales. Le retard européen par rapport au niveau des activités spatiales américaines et soviétiques (même diminuées de 40% pour ces dernières) ne sera en partie comblé que par des motivations nouvelles telles que "l'homme dans l'espace". Le risque pourrait même être une remise en question de l'ensemble des activités spatiales au niveau européen : le ciment européen, concrétisé par les succès passés et présents de l'Agence Spatiale Européenne, a toujours été solidifié par les grands programmes de développement. Limiter les activités spatiales aux applications (Observation, Télécommunications) risque de lézarder le ciment européen.

Au plan français, les conséquences seraient les suivantes :

- perdre une expertise industrielle, notamment à l'Aérospatiale et chez Dassault, dont les retombées dans le domaine du transport aérien pourraient être très précieuses, en particulier pour le programme d'Avion à Grande Vitesse. Ces retombées technologiques sont essentiellement liées à la mise au point de la rentrée planante dans l'atmosphère de l'avion Hermes : matériaux développés pour la protection thermique, architecture des logiciels de bord, résultats d'essais aérothermodynamiques. D'une façon plus générale, le programme Hermes permet de recréer une dynamique dans les

organismes de recherche et dans l'industrie vers l'étude des véhicules atmosphériques à grande vitesse, en développant des équipes, des moyens d'essais et des codes de calcul.

- perdre un leadership en Europe: l'homme dans l'espace est français en 91, il pourrait réapparaître allemand en 95, les Allemands n'étant pas fondamentalement contre l'homme dans l'espace puisqu'ils ne remettent jamais en question leur participation prépondérante dans le programme Columbus.

En ce qui concerne les moyens, le choix de l'orbite basse est le seul aujourd'hui possible pour l'Europe, d'abord parce que, pour une filière européenne, le lanceur Ariane 5 n'est pas compatible avec des missions habitées plus lointaines et que l'orbite basse est la première étape naturelle pour la démonstration des capacités européennes en matière de vols habités; ensuite, parce que, dans le cadre d'une coopération internationale, l'Europe serait aujourd'hui exclue du nombre des partenaires, n'ayant pas fait ses preuves industrielles et opérationnelles. C'est pourquoi l'orbite basse doit être la première étape, suivie par des missions plus lointaines, dans le cadre d'une coopération internationale.

La filière européenne, telle qu'elle est proposée aujourd'hui, est à la fois raisonnable et ambitieuse: raisonnable parce qu'elle vise une première démonstration en orbite basse, objectif déjà atteint par Soviétiques et Américains il y a 20 ans, et parce qu'elle tirera bénéfice de la coopération actuelle avec Etats-Unis et URSS, surtout d'un point de vue opérationnel; ambitieuse, parce qu'elle mettra en oeuvre les technologies de l'an 2000 et qu'elle fera une place privilégiée à l'utilisation scientifique de l'infrastructure qui reste en orbite.

7. Recommandations

1. Prendre une décision claire et définitive sur l'ensemble des programmes liés aux vols habités (c'est-à-dire les programmes Hermes, Columbus et Satellite de Relais de Données DRS) en Novembre 91. Les dossiers ont atteint une maturité technique et une assise industrielle suffisantes pour que les décisions soient prises en connaissance de cause. Dans 3 ans, il y aura pas plus d'arguments pour ou contre les moyens du vol habité. La France doit être le moteur de cette décision, pour garder le leadership dans la gestion et dans l'organisation industrielle du programme Hermes.
2. Ne pas étaler les programmes de développement sur plus de 10 ans, ce qui nuirait à la fois à la motivation des équipes et au contrôle du projet, et surtout ce qui serait un non-sens du point de vue technologique.
3. Renforcer dans les années à venir la coopération avec les Etats-Unis et l'URSS, ce qui passe, d'un point de vue stratégique, par l'existence d'un programme européen déjà solidement décidé et, d'un point de vue technique, par la compatibilité technique et opérationnelle des différents éléments d'accès à l'espace.
4. Entreprendre tous les efforts visant à diminuer les coûts d'exploitation de l'ensemble de l'infrastructure orbitale. La particularité des programmes d'exploitation est leur "durée indéfinie". Les programmes de développement peuvent se succéder parce qu'ils ont une fin, les programmes d'exploitation ne peuvent que se superposer, c'est pourquoi un effort important doit être fait pour diminuer les coûts d'exploitation. Les voies sont à la fois techniques, aujourd'hui par l'optimisation de Hermes et Columbus d'un

point de vue opérationnel, pour le futur par le développement de moyens de transport à travers l'atmosphère plus économiques, et organisationnelles (rôle des agences et de l'industrie, commercialisation).

5. Préparer l'utilisation scientifique de l'infrastructure orbitale, en particulier en assurant une continuité des activités scientifiques correspondantes dans toutes les disciplines concernées. Cette continuité implique à la fois des occasions de vol entre 92 et 98, date de disponibilité du Laboratoire Attaché Columbus, et un financement régulier des activités, en particulier dans le domaine de l'utilisation de la microgravité.

6. Préparer, en y associant une composante scientifique, une vision européenne de l'après Mir, Freedom et Columbus : base lunaire? visite de Mars?, afin de participer avec Américains et Soviétiques à la définition des programmes spatiaux internationaux à long terme.

L'Europe sera ainsi prête, d'un point de vue technique, opérationnel, industriel et stratégique, à être le troisième partenaire des activités spatiales du futur.

Remerciements

Ce document est une synthèse personnelle de discussions pratiquement quotidiennes avec des acteurs du monde spatial, au CNES, à l'ESA et dans l'industrie.

Ces acteurs sont trop nombreux pour être cités, une mention particulière est faite pour Géraldine NAJA qui a non seulement contribué à ces discussions, mais aussi assuré le polissage final du texte.

OFFICE PARLEMENTAIRE
D'EVALUATION DES CHOIX
SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES

EXPERTISE n°6

L'ESPACE MILITAIRE

(Contribution au rapport présenté par Paul LORIDANT, Sénateur de l'Essonne,
sur les ORIENTATIONS DE LA POLITIQUE SPATIALE FRANCAISE ET EUROPEENNE)

Pierre LATRON

Pierre LATRON

Diplômé de l'Ecole nationale supérieure de l'aéronautique, Master of Sciences du Massachusetts Institute of Technology (Boston, EUA) en 1969, l'ingénieur en chef LATRON a passé la première partie de sa carrière au sein de la direction du programme nucléaire S.S.B.S. de la direction des Missiles et de l'Espace de la Délégation générale pour l'armement.

De 1980 à 1987, il a ensuite participé au développement des moyens d'essais et de simulations hybrides du Centre d'Electronique de l'Armement, à Rennes. revenu à la Direction des missiles et de l'Espace en 1987 comme directeur du programme de satellite militaire HELIOS, il assure depuis 1990 la responsabilité du groupe Espace Satellites, qui a en charge la préparation et le développement de tous les programmes spatiaux militaires français (hors télécommunications).

R E S U M E

Les grands axes du programme spatial militaire français

Le Ministère de la Défense élabore régulièrement un Plan pluriannuel Spatial Militaire. La dernière actualisation de ces travaux est en cours (en préparation de la loi de programmation militaire) et porte sur la période 1992-2007. Un tel horizon est indispensable, compte tenu du délai de réalisation et de mise en oeuvre des programmes et en particulier du délai de mise au point de certaines technologies. Si sont prises aujourd'hui des décisions, c'est vers l'an 2000 que seront mises en orbite des composantes majeures d'un programme spatial militaire ambitieux.

Sont envisagés :

1.- le renforcement de la capacité du renseignement :

L'augmentation du nombre de satellites, le développement d'une capacité d'observation infrarouge, la mise en oeuvre de satellites radar et de satellites d'écoute électronique permettraient de disposer d'un système d'observation capable de fournir des images à fréquence plus élevée, quelles que soient les conditions météorologiques, et de mesurer des indices d'activité des forces.

2.- le développement d'une capacité de surveillance de l'espace, depuis le sol, est nécessaire pour assurer la protection des forces françaises vis-à-vis des dispositifs spatiaux adverses et pour identifier les menaces susceptibles de peser sur nos satellites. Cette capacité est indispensable pour permettre à la France de participer activement à l'élaboration et à la mise en oeuvre du code de bonne conduite dans le domaine spatial proposé par le Président Mitterand.

3.- le renforcement des capacités spatiales de télécommunications, d'abord avec le système SYRACUSE II, dont le segment spatial est partagé avec France Télécom, ensuite avec EUMILSATCOM, système à vocation militaire et qui serait réalisé en coopération avec la Grande-Bretagne. L'Allemagne et d'autres pays européens pourraient y participer.

4.- un programme de recherches et développement technologiques, nécessaire dans le prolongement des recherches menées par le CNES pour répondre aux spécificités des besoins de la Défense.

Dans les domaines de l'océanographie, de la météorologie et de la navigation, les ambitions sont plus limitées.

A ce jour, et à l'horizon des réflexions précédemment décrites, les besoins de la Défense ne justifient aucune participation aux programmes de vol habité.

Alors que les dépenses spatiales militaires on représenté en 1991 **3,3 GF**, compte tenu des hypothèses de coopération, elles devraient s'élever à **5 GF** d'ici la fin du siècle et à **8 GF** par an au début du siècle prochain (rappelons que le Department of Defense américain a dépensé en 1991 environ **20 G\$**, et que depuis 1980 les dépenses spatiales militaires aux Etats-Unis sont supérieures aux dépenses de la NASA.

Il est enfin nécessaire de poursuivre et de renforcer encore la coopération entre le Ministère de la Défense et le CNES. Le CNES joue déjà un rôle important dans la mise en oeuvre du programme spatial militaire : il assure ainsi la maîtrise d'ouvrage délégué de la composante spatiale du programme HELIOS. Au moment où devraient s'accélérer les efforts dans le domaine spatial militaire, il a été jugé nécessaire d'accroître les liens entre la Défense et le CNES par le biais d'un protocole visant à renforcer la complémentarité des recherches et études technologiques financées par ces deux organismes.

S O M M A I R E

1.- Les différentes utilisations de l'Espace.....	2
2.- Apport des moyens spatiaux.....	6
3.- Applications militaires et applications civiles.....	7
4.- Bilan et perspectives des programmes militaires spatiaux français et européens.....	9
5.- Les efforts technologiques.....	14
6.- Les coopérations.....	15
7.- Conclusions.....	16

1.- Les différentes utilisations militaires de l'Espace

Les utilisations militaires de l'espace envisageables sont très variées : on peut dire que l'espace apporte un facteur multiplicatif ou une dimension nouvelle dans de très nombreux domaines qui peuvent concerner les besoins militaires.

On citera les domaines suivants :

1.1.- le recueil du renseignement :

Celui-ci peut être réalisé par l'intermédiaire de différents types de capteurs, apportant chacun des informations (ou "renseignements") différentes et bien souvent complémentaires :

- * l'observation optique :
 - capteurs optique visible
 - capteurs infrarouge
 (ces capteurs fournissent des "images" visible ou infrarouge)

- * l'observation radar
 - capteur radar à ouverture synthétique (SAR, pour synthetic aperture radar)
 (ce capteur fournit des "images" radar, de nature et de texture différentes de celles des images visibles)

- * la détection radar :
 - surveillance des flottes à la mer
 - surveillance des mouvement aériens

- * l'écoute électronique :
 - analyse technique des signaux interceptés, issus de systèmes de télécommunications ou de radars
 - interception des communications et analyse de contenu des messages.

1.2.- les télécommunications :

L'espace apporte aux télécommunications une dimension majeure, permettant d'assurer des communications à très longues distances, sans infrastructure rigide et avec des architectures de réseaux souples s'adaptant aisément aux besoins militaires :

- satellites de télécommunications : ils peuvent être géostationnaires (c'est-à-dire apparemment fixe au-dessus d'un point donné du globe, à une altitude de 36.000 km), et dans ce cas les communications sont assurées dans sa zone de couverture radioélectrique ; ils peuvent aussi être défilants, à une altitude inférieure à 1.000 km, et dans ce cas les communications sont assurées de façon discontinue (le satellite reçoit les messages d'un point donné et les retransmet ultérieurement lors du survol d'un autre point).

- satellites relais de télécommunications : ces satellites, géostationnaires, permettent d'assurer les transmissions entre un satellite défilant en orbite basse (par exemple un satellite d'observation radar) et un point du globe où se situe le centre de réception des données radar. Trois satellites relais géostationnaires autour du globe terrestre permettent ainsi d'obtenir une liaison permanente entre le satellite d'observation et la station sol de réception.

1.3.- la navigation :

Il s'agit essentiellement de systèmes spatiaux tels que NAVSTAR (ou GLONASS en Union Soviétique) qui permettent à des mobiles sur terre, sur mer ou dans l'air d'obtenir par le biais d'un récepteur spécialisé leur position dans l'espace avec une très bonne précision (100 m), ou une excellente précision (10 m) pour les utilisateurs militaires.

Le système NAVSTAR (ou GPS, pour Global Positioning System) mettra en oeuvre, à terme, 24 satellites défilants à 1.200 km d'altitude.

1.4.- la météorologie :

La météo est une donnée importante pour les armées en temps de paix, particulièrement vitale en temps de crise ou de guerre. La météo militaire peut recevoir les données nécessaires soit de systèmes civils (type METEOSAT), soit de systèmes militaires (type Defense Meteorological Satellite Programm US). Il s'agit là encore de satellites spécifiques de ces applications.

1.5.- l'océanographie :

L'océanographie militaire, qui analyse la bathythermie des océans, a en particulier pour objet de rechercher les zones océaniques dans lesquelles les conditions de propagation acoustique sont variables (recherche de discrétion acoustique sous-marine).

Les données d'altimétrie des océans, obtenues par des satellites utilisant des altimètres de haute précision (exemples : TOPEX-POSEIDON franco-américain ou ERS-1 européen), sont les éléments majeurs à partir desquels les analyses citées précédemment sont menées.

1.6.- la surveillance de l'espace :

On se place ici, au niveau du sol. Il s'agit de surveiller l'espace depuis le sol pour détecter, analyser et identifier les "objets" en orbite autour de la terre, afin d'être capable d'appréhender les menaces susceptibles de peser sur nos satellites ainsi que les réelles capacités spatiales de renseignement de nos adversaires potentiels.

C'est une des missions dévolues au NORAD américain, qui gère en permanence un catalogue de 7.000 objets, par l'intermédiaire de son réseau mondial de surveillance du ciel.

1.7.- les satellites d'alerte - la défense anti-missile balistique :

Rentrent dans cette catégorie :

- les satellites de détection d'explosions nucléaires (contrôle de prolifération des armes nucléaires) ;
- les satellites d'alerte et de détection de départ de missiles : de tels satellites peuvent devenir une des composantes d'une défense anti-missile balistique.

1.8.- la vérification et le contrôle du désarmement :

On estime qu'un système d'observation par satellite ne peut être que l'une des composantes d'un système de vérification des accords de désarmement : il ne peut voir que ce qui est visible et il est sensible à tout leurrage ou camouflage. Il sera donc nécessaire dans tous les cas d'effectuer les inspections "in situ" prévues par les accords pour vérifier la présence d'ELT (les besoins dans ce domaine sont en fait des éléments limités par Traité) largement couvert pour des satellites de "renseignement" (cf. § 1.1).

2.- Apport des moyens spatiaux :

Le passage par l'espace permet de s'affranchir des frontières terrestres et aériennes, puisque l'on se situe à des altitudes supérieures à 100 km.

Les différents moyens spatiaux, principalement en matière de recueil du renseignement et de télécommunications, offrent ainsi l'avantage inestimable d'accéder, en temps de paix, à des zones inaccessibles par des moyens classiques.

Les satellites d'observation défilant en orbite basse (entre 300 km et 800 km d'altitude) permettent un balayage systématique et répétitif des différentes zones du globe terrestre. En contrepartie, ces satellites n'étant pas manoeuvrant (même si dans certains cas ils ont une capacité à modifier leurs orbites), sont parfaitement prédictibles dans leurs mouvements autour de la terre. Il est donc ainsi possible pour un adversaire de se cacher ou se camoufler au moment où le satellite passe au-dessus de lui.

De même, il faut signaler les difficultés techniques liées à certaines actions effectuées depuis l'espace (telles que l'écoute électronique) par rapport aux mêmes actions effectuées à partir de moyens aériens ou terrestres.

La conclusion est bien que les moyens spatiaux ne peuvent pas remplacer tous les moyens classiques, et qu'il est nécessaire d'avoir une conception d'ensemble des moyens à développer en matière de recueil du renseignement.

Ces systèmes permettent ainsi d'effectuer une fusion entre les informations issues des différents capteurs, permettant d'accroître leur efficacité en tirant le meilleur parti des phénomènes physiques différents mis à jour (optique visible, infrarouge, radar).

Dans le domaine des télécommunications, le passage par l'espace permet d'obtenir une grande souplesse dans les modes d'établissement des réseaux et des communications militaires, en les adaptant au mieux aux configurations de la zone de crise ou de guerre (actions proches ou lointaines du territoire national).

3.- Applications militaires et applications civiles :

3.1.- Caractères communs :

Les applications militaires et les applications civiles correspondantes ont de nombreux caractères communs ou voisins :

- l'environnement spatial est le même,
- les technologies de base sont identiques : matériaux, revêtements, composants électroniques (dans une certaine limite - voir ci-dessous), générateurs solaires,...
- les méthodologies de développement sont identiques.
- les modes d'utilisation sont souvent très voisins (centres de contrôle de satellite et réseaux de télécommande/télémessure au fonctionnement permanent ; très forte disponibilité des installations sol).

3.2.- Spécificités des applications militaires :

Les applications militaires ont cependant des spécificités marquées, liées à plusieurs aspects :

- des performances très différentes des applications civiles ; exemple : un satellite d'observation militaire doit avoir une résolution au sol très supérieure à celle d'un satellite civil type SPOT ou LANDSAT, puisque l'on va chercher des informations beaucoup plus précises. Ceci conduit souvent à des problèmes techniques et technologiques très complexes à résoudre.
- des applications très spécifiques ; exemple : l'écoute électronique, qui fait appel à des techniques et des technologies inconnues du secteur civil.
- des menaces d'agression diverses : agression laser, arme micro-ondes, brouillage radioélectrique, agression nucléaire. Ces menaces appellent des mesures de protection très particulières qui peuvent mettre en oeuvre des technologies spécialisées (exemple : durcissement aux agressions nucléaires).

- des conditions d'utilisation contraignantes : en particulier pour les terminaux de télécommunications d'un réseau utilisant des satellites qui peuvent être soumis à des conditions très sévères d'environnement climatique.

3.3.- Impact sur les technologies :

Les systèmes spatiaux militaires s'appuient donc sur les technologies disponibles ou en développement dans le cadre des applications spatiales civiles, mais génèrent, à partir de ces éléments de base, des évolutions technologiques qui peuvent être, soit très spécifiques (cas de technologies de protection contre les agressions multiples), soit en avance par rapport aux besoins actuels du secteur civil.

4.- Bilan et perspectives des programmes militaires spatiaux français et européens :

4.1.- Rappel de l'historique des programmes spatiaux militaires français :

La Délégation Ministérielle pour l'Armement (DMA) a commencé en 1964 à mener les premières études de concept de systèmes de satellites susceptibles de présenter un intérêt militaire. Très fortement ralenties en 1970, ces études n'ont réellement reprises qu'en 1977 avec les études d'un système de télécommunications militaires par satellite.

4.1.1 - Le programme TELECOM 1 (premier programme français de satellite de télécommunication civil) a été décidé en 1978 et le programme SYRACUSE I (charge utile militaire embarquée en passager sur TELECOM 1) en 1979.

Le premier satellite TELECOM 1 a été lancé en août 1984 et sert aujourd'hui de secours ; le satellite TELECOM 1B est inutilisable depuis janvier 1988, et le satellite TELECOM 1C, lancé en mars 1988, est toujours en fonctionnement.

Un nouveau programme, SYRACUSE II, a été lancé en 1988, pour améliorer le service assuré pour SYRACUSE I et remplacer les satellites arrivant en fin de vie vers 1992. Selon le même schéma suivi pour SYRACUSE I, SYRACUSE II est une charge utile de télécommunications militaires embarquée sur le satellite civil TELECOM 2. Le lancement du premier satellite TELECOM 2 est prévu début décembre 1991, et le second en mi 92.

4.1.2 - Les premières études de satellite d'observation optique ont démarré en 1977 avec les études SAMRO (satellite militaire de reconnaissance optique), en parallèle avec le démarrage du programme civil SPOT.

La Défense, intéressée à l'utilisation du satellite SPOT 1, a assuré un financement de l'ordre de 500 MF (en MF 77), soit environ 30 % du coût de SPOT 1. Ce financement a ainsi permis aux Armées d'obtenir, après le lancement de SPOT 1 en 1986, un accès privilégié à ce satellite, dans l'attente de l'arrivée d'un programme militaire répondant mieux à ses besoins.

Les études d'un système d'observation militaire se sont poursuivies jusqu'en 1985, et le programme Hélios a été lancé en février 1986. En 1987, l'Italie a décidé de participer à ce programme à hauteur de 14,1 % ; en 1988 l'Espagne entra dans le programme avec un taux de 7 %.

Le lancement du premier satellite Hélios est prévu en 1994

4.2.- Les perspectives des programmes militaires spatiaux français :

Les perspectives à moyen et long terme dans le domaine spatial sont établies au sein du Ministère de la défense par le Groupe d'Etudes Spatiales (GES), présidé par le Major général des armées, et rassemblées dans un document classifié intitulé "Plan Pluriannuel Spatial Militaire" (PPSM).

Ce plan, dont la première édition remonte à 1984, est remis à jour tous les deux ans. La dernière actualisation de ce plan est encore en cours, en préparation de la loi de programmation militaire, et porte sur la période 1992-2007.

L'essentiel des réflexions de ces derniers travaux est présenté ci-dessous ; il s'agit de scénarios de travail, non approuvés encore par le Ministre de la défense.

4.2.1 - Domaine du recueil du renseignement :

Dans un premier temps (à l'horizon 1996), on envisage de réduire les délais d'acquisition des informations du système Hélios, conférant ainsi à ce système un aspect plus tactique.

Dans un deuxième temps (à l'horizon 2000), on propose de s'acheminer vers un système plus complet de renseignement spatial, mettant en oeuvre des capteurs d'information différents, travaillant dans plusieurs bandes de fréquence (optique visible, infrarouge, radar), et embarqués sur des satellites spécialisés.

Ces satellites auront une très grande accessibilité à toutes les zones du globe terrestre et transmettront les informations acquises, dans des délais très rapides, soit à un centre national, soit directement sur des théâtres d'opérations extérieures.

Ces systèmes s'intégreront à l'ensemble des Systèmes d'Information et de Commandement (SIC) des armées de façon à permettre une diffusion rapide des renseignements aux autorités gouvernementales et militaires et aux utilisateurs militaires locaux si nécessaire.

A l'horizon plus lointain (2010/2015) les systèmes évoqués précédemment devront être renouvelés pour atteindre un niveau d'information plus fin avec des délais d'acquisition très rapides.

4.2.2 - Domaine des télécommunications spatiales :

Le système SYRACUSE II devrait être maintenu jusque vers 2005.

A cette date, on envisage la mise en place d'un système de satellites de télécommunications dénommé EUMILSATCOM, système à vocation militaire développé en coopération de façon privilégiée avec la Grande-Bretagne.

D'autres partenaires européens (Allemagne, Italie, Espagne) pourraient s'y intéresser.

4.2.3 - Domaine de la surveillance de l'espace :

Le développement d'une capacité de surveillance de l'espace depuis le sol est nécessaire pour assurer la protection des forces françaises vis-à-vis des dispositifs spatiaux adverses et pour identifier les menaces susceptibles de peser sur nos satellites.

Cette capacité devient indispensable pour permettre à la France de participer activement à l'élaboration et à la mise en oeuvre du code de bonne conduite dans le domaine spatial proposé par le Président Mitterand.

On envisage de développer cette capacité par étape, à partir d'installations expérimentales actuelles et en les complétant de nouveaux moyens de détection (optique et/ou radar) et d'identification.

4.2.4 - Autres domaines :

a) - domaine spécifique : en tant que contribution au domaine scientifique, la DGA a décidé en avril 1991 un programme de microsatellite de caractérisation radioélectrique de l'environnement en orbite basse (CERISE). Ce microsatellite sera lancé en 1994.

b) - dans les domaines de la météorologie et de la navigation, aucune action particulière n'est envisagée, en dehors de la recherche de l'abonnement aux systèmes américains actuellement déployés (cf. § 1) tels que NAVSTAR ou DMSP.

c) - dans le domaine de l'océanographie, il n'est pas non plus envisagé de réaliser de systèmes spécifiques militaires, mais seulement de tirer bénéfice de systèmes civils existants, comme ERS 1 ou TOPEX-POSEIDON.*

d) - aucune participation au programme HERMES et COLUMBUS n'est retenue, aucun besoin militaire n'ayant été cerné, même à l'horizon du plan spatial militaire.

e) - aucune étude, même au niveau du concept, n'est entreprise actuellement dans le domaine de la défense antimissile balistique, dans l'attente d'une décision gouvernementale sur le sujet.

4.2.5 - Les implantations en personnel :

Les perspectives de développement tracées dans les paragraphes précédents impliquent qu'un effort important soit fait par les armées en matière de personnel, tant en qualité (nécessité de personnel de haute technicité) qu'en quantité (à l'horizon, on estime que l'ensemble de ces systèmes mettra en oeuvre plus de 1.000 personnes).

* Le Ministère de la Défense participe à hauteur de 125 MF au développement en France de l'altimètre POSEIDON, monté sur le satellite américain TOPEX qui sera lancé en 1992.

4.3.- Les programmes militaires européens :

En dehors de la France, la principale puissance spatiale militaire en Europe est la Grande-Bretagne.

Celle-ci a développé un vaste réseau militaire de télécommunications utilisant des satellites (SKYNET IV en service) et envisage à terme, vers 2005, de le remplacer.

L'Espagne de son côté a prévu de placer un passager militaire de télécommunications sur le satellite civil HISPASAT qui sera lancé fin 1992.

L'Italie n'a, quant à elle, effectué que des études sur un système gouvernemental de télécommunication, appelé SICRAL.

5.- Les efforts technologiques :

Les perspectives envisagées pour le développement de systèmes spatiaux militaires impliquent qu'un effort technologique important soit fait, de façon complémentaire aux développements technologiques entrepris dans l'espace civil (cf. § 3 ci-dessus).

Sans chercher à être exhaustif, on peut citer les domaines suivants dans lesquels des efforts de recherche et développement doivent être désormais consentis :

- domaine des détecteurs visibles (matrices CCD) et infrarouge, et systèmes associés (cryogénérateurs dans le cas de l'infrarouge),
- domaine des matériaux composites de structures de satellites,
- domaine des liaisons hertziennes à très haut débit de donnée (supérieures à 500 Mbits/s),
- domaine du stockage des informations à bord des satellites,
- domaine des microprocesseurs de traitement bord de très grande puissance,
- domaine des techniques d'analyse d'imagerie et d'automatisation de l'exploitation.

Certains de ces domaines feront également l'objet de recherche dans le cas du programme européen "EUCLID" de recherche militaire, signé en novembre 1990 entre les pays du Groupe Européen Indépendant de Programme (GEIP).

Une concertation sur ces programmes de recherche est déjà établie entre le CNES et la DGA. Elle sera renforcée et formalisée dans la cadre du protocole CNES-DGA signé début septembre 1991. La complémentarité des recherches et études technologiques entre ces deux organismes sera donc ainsi assurée.

6.- Les coopérations :

Pour la plupart des systèmes envisagés, il est prévu de rechercher une coopération européenne bi ou multilatérale, ces systèmes devenant pour la France des moyens privilégiés de l'effort de création d'une défense européenne.

L'ouverture du système Hélios à l'Italie et à l'Espagne a déjà montré tout l'intérêt que des pays méditerranéens, ayant des zones d'intérêt très proches, peuvent avoir à se regrouper pour développer de tels systèmes.

De la même façon, la démarche entreprise pour la génération post-SYRACUSE II marque la volonté française de rechercher un consensus européen sur un futur système militaire de télécommunications spatiales.

Le centre satellitaire de l'UEO est aussi une étape visible de cette construction européenne. Ce centre, créé en juin 1991, sous l'impulsion de la France, sera amené à traiter à des fins de contrôle du désarmement non seulement des images issues des satellites SPOT, LANDSAT et ERS, mais aussi des images acquises par le satellite HELIOS et mises à disposition de l'UEO par la France, l'Italie et l'Espagne.

On peut citer également la mise en place, au sein de l'UEO, d'une structure d'étude chargée d'analyser les différents concepts possibles de système d'observation (optique et radar) dont pourrait se doter, à moyen terme, cet organisme.

7.- Conclusions :

Si des décisions sont prises aujourd'hui, c'est vers l'an 2000 que seront mises en orbite les différentes composantes d'un programme spatial militaire ambitieux répondant aux besoins d'indépendance de la France.

En tenant compte des coopérations européennes projetées, l'effort financier à consentir pour réaliser cet objectif ferait passer les dépenses spatiales militaires de 3,3 GF en 1991 à 5 GF à la fin du siècle et à 8 GF au début du siècle prochain.

OFFICE PARLEMENTAIRE
D'EVALUATION DES CHOIX
SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES

EXPERTISE n°7

RECHERCHE ET TECHNOLOGIE

(Contribution au rapport présenté par Paul LORIDANT, Sénateur de l'Essonne,
sur les ORIENTATIONS DE LA POLITIQUE SPATIALE FRANCAISE ET EUROPEENNE)

René PELLAT

René PELLAT

ETUDES

Ecole Polytechnique (promotion 1956)

Ingénieur du Corps des Ponts et Chaussées (E.N.P.C. 1961)

CARRIERE

Début sa carrière en position de détachement au C.E.A. en 1962 au service théorique des gaz ionisés du département de la physique des plasmas et de la fusion contrôlée de Fontenay-aux roses.

Mis à la disposition du CNRS en 1972

Maître des recherches (section Astronomie et Géophysique)

Directeur de recherches (1975)

Conseiller scientifique du directeur général du CNES en 1982

Conseiller en Science et Technologie depuis 1986

Membre du CSRT de 1983 à 1987

Elu à la présidence de la section "Astronomie et Environnement planétaire" du Comité National et du Conseil de Département "Terre, Océan, Atmosphère, Espace du CNRS (1983- 1987)

Nommé **Président du Conseil d'Administration du CNRS** le 22 novembre 1989 en remplacement de M.Claude Fréjacques.

Résumé du rapport de monsieur PELLAT sur la Recherche et Technologie.

Le programme R et T du CNES est analysé dans ses objectifs et son financement. Les objectifs de la R et T découlent des principales missions confiées au CNES:

- Promotion de l'utilisation de l'espace
- Gestion technique et financière des programmes
- Promotion de l'industrie spatiale nationale
- Représentation de la France à l'Agence Spatiale Européenne.
- Les objectifs de la R et T résultant de ces missions ont également été détaillés:
 - Préparation des programmes futurs
 - Création et entretien de compétence de technologie de base
 - Promotion de l'industrie, amélioration de la compétitivité

Le besoin de R et T et le niveau de financement nécessaire sont ensuite justifiés par une analyse du passé, des conséquences d'une insuffisance d'investissements amont et de la situation actuelle.

pour situer l'effort du CNES dans un contexte international, des éléments de comparaison avec d'autres organismes sont donnés.

De ce fait, il est également important de mentionner que l'effort du CNES en R et T , insuffisant aujourd'hui, doit être accru.

Enfin, dans le souci d'une cohérence entre les activités de R et T et la politique industrielle suivie dans le cadre des projets, les conséquences des grands programmes en coopération européenne sur notre industrie (notamment pour les équipementiers) sont illustrées.

SOMMAIRE

I - Les objectifs de la Recherche et Technologie :p 1

II - Programme de Recherche et Technologie - Niveau de financement :p 4

III - Recherche et Technologie - Politique industrielle - Cohérence d'ensemble
:p 7

Conclusion :p 9

RECHERCHE ET TECHNOLOGIE

La politique spatiale menée avec continuité depuis 1962, date de la création du CNES a permis de placer la France dans le club des grandes puissances spatiales. En Europe, par ses effectifs et par son chiffre d'affaires, l'industrie spatiale française est au premier rang et représente un tiers environ de la capacité industrielle européenne.

Pour maintenir cette position, ne pas remettre en cause les investissements déjà consentis, il est nécessaire de préserver et d'amplifier les efforts de Recherche et Technologie garants de l'avenir. Le programme spatial, son élaboration, sa mise en oeuvre, dépendent en effet fortement des compétences acquises à travers les activités de Recherche et Technologie.

I - Les objectifs de la Recherche et Technologie

Les activités R et T comprennent les études et développement techniques pouvant aller de la recherche fondamentale jusqu'à des travaux d'industrialisation, non financés dans le cadre de projets individualisés.

Ces actions recouvrent divers objectifs qui découlent des missions qui ont été confiées au CNES dès sa création par la loi du 19 Décembre 1961.

Le rôle du CNES, Agence nationale chargée du développement des activités spatiales françaises, peut se résumer comme suit :

- Promotion de l'utilisation de l'espace dans le cadre de programmes nationaux, bilatéraux ou européens.

Le CNES est chargé de proposer et d'évaluer de nouvelles missions. Il soumet au Gouvernement des propositions d'actions et de moyens à mettre en oeuvre permettant à la France et à l'Europe de participer au développement des activités spatiales dans le monde.

Le CNES élabore ses propositions en étroite concertation avec de nombreux organismes nationaux dépendant de divers ministères ou administrations. A ce titre, il est l'interlocuteur des administrations utilisatrices des moyens spatiaux en tant qu'Agence du Gouvernement.

Le CNES met en oeuvre le programme scientifique spatial français, en association avec la communauté scientifique qui reçoit du CNES les moyens financiers et l'assistance technique nécessaires au développement et à la mise en oeuvre d'expériences spatiales.

- Gestion technique et financière des programmes, mission de garantie technique sur les programmes

En application des décisions de politique spatiale arrêtées par le Gouvernement, le CNES assure la conduite des grands programmes de développement des activités nationales et de certaines activités de l'Agence Spatiale Européenne qui lui sont déléguées (ARIANE, avion spatial HERMES...).

Dans le domaine des opérations des systèmes spatiaux, le CNES a un rôle majeur de prestataire de service pour le lancement, la mise à poste, le contrôle en vol et l'exploitation des satellites.

Enfin, le CNES assure les expertises techniques pour ses propres besoins et à la demande du Gouvernement ou d'opérateurs.

- Promotion de l'industrie spatiale nationale

Le CNES veille à développer la compétence et la crédibilité des industriels français à l'exportation. Il participe au financement d'un programme de Recherche et Développement dans l'industrie, dont les résultats techniques seront à la base des réalisations futures.

- Enfin, en liaison avec le Ministère des Affaires Etrangères, le CNES représente la France au sein des instances de l'Agence Spatiale Européenne.

De l'ensemble de ces missions, se déduisent les grands objectifs d'un programme de Recherche et Développement :

- Préparation des programmes futurs :

- analyses de missions à caractère thématique,
- études système permettant d'identifier les techniques "critiques" nécessaires,
- études exploratoires sur ces techniques constituant des points de passage obligés dont elles doivent démontrer la faisabilité, les développements étant ensuite normalement assurés dans le cadre des projets.

Des financements relativement importants pour des analyses de mission à caractère thématique sont toujours aussi nécessaires, même si d'importantes décisions sont prises, engageant des grands programmes pour les dix ans à venir. Trois raisons justifient un niveau d'effort accru :

- Les temps de gestation de nouveaux programmes sont devenus importants, l'unité de temps devenant proche de 10 ans.
- Le champ des utilisations de l'espace n'a cessé de croître, d'où la nécessité de sélectivité croissante. Ces exercices de priorité nécessitent, pour être conduits valablement, des études préalables de plus en plus fines.
- Le CNES, représentant la France à l'ASE, est régulièrement confronté à des propositions des autres pays membres, qu'il convient d'analyser et de juger. Là encore, la disponibilité des résultats d'étude sur des domaines étendus est indispensable.

Pour des raisons analogues, en ce qui concerne les études systèmes et les études exploratoires couvertes par la R et T, il est nécessaire d'avoir un champ d'activités très vaste ; toute technique prometteuse doit faire l'objet d'un examen même limité, la poursuite ou l'arrêt provisoire ou définitif des travaux dépendant des premiers résultats et de l'évolution du contexte général (mise en place de coopération, concurrence...)

- Création et entretien de compétences et technologies de base nécessaires pour maintenir en France une capacité de maîtrise d'ouvrage et de maîtrise d'oeuvre de grands programmes nationaux ou européens.

Ces compétences concernent notamment l'optimisation de systèmes, les méthodes de dimensionnement, de modélisation et de simulation nécessaires pour concevoir des systèmes compétitifs.

Cela implique, de plus, la connaissance et la participation à l'entretien d'un fort potentiel de recherche fondamentale (Université, CNRS...) national, indispensable en support du CNES et de l'Industrie et garantissant des capacités de réactions rapides et efficaces en cas de difficultés sur les projets.

L'existence et la maîtrise d'un tel "tissu" scientifique et technologique est essentiel pour assurer la crédibilité du CNES et de l'industrie nationale, même en cas de responsabilités sous-traitées à des industriels étrangers. A titre d'exemple, citons les problèmes rencontrés sur les systèmes propulsifs des satellites TCI et TDF1, développés en RFA, pour lesquels le CNES a dû effectuer une expertise technique et proposer des actions correctives.

- Promotion de l'industrie, amélioration de la compétitivité

Les objectifs évoqués précédemment contribuent à la promotion de l'industrie spatiale nationale d'une manière indirecte et souvent à long terme. Il est nécessaire de prendre également en compte des objectifs de promotion d'équipements industriels, à plus court terme, visant un marché identifié ou une amélioration de la compétitivité sur des produits existants dans le contexte très concurrentiel des activités spatiales.

Le programme R et T doit permettre de traiter des points de faisabilité et d'assurer des développements pouvant aller jusqu'à une phase de qualification. Le plus souvent, la finalité commerciale de telles actions implique une participation sur fonds propres des industriels. Les actions d'industrialisation ou d'amélioration de la compétitivité sont ensuite normalement de la responsabilité des industriels. Cependant, les conditions de marché et de compétition internationale ont conduit à mettre en place une procédure d'aides étatiques sous forme d'avances remboursables (CPI).

L'ensemble des activités de recherche et développement se décompose suivant l'objectif visé et/ou la source de financement :

- Programme Recherche et Technologie du CNES - axé sur la préparation des programmes futurs (analyse de missions et technologies) et sur les compétences et technologies de base.
- Contribution française au programme technologique de l'Agence Spatiale européenne.
 - * programme "basic TRP" (Basic Technological Research Programme), programme obligatoire auquel les états membres contribuent proportionnellement à leur PNB, soit environ 30 MF/an pour la France. Ce programme couvre l'ensemble des technologies spatiales nécessaires aux missions futures.
 - * "Preparatory and Support Technology Programme" ("S.T.P."). Il s'agit de programmes facultatifs de soutien technologique spécifiques à certaines disciplines. On peut citer par exemple le programme E.O.P.P. pour l'observation de la Terre, le programme MGR-ST pour la microgravité et surtout le programme ASTP (Advanced (Telecom.) System and Technology Programme). La contribution de la France au programme ASTP conduit à environ 20 MF de contrats industriels par an.

Une harmonisation est recherchée entre l'ASE et le CNES avec, jusqu'à présent, des résultats limités. Dans quelques domaines financés par le TRP, une certaine harmonisation a été possible, bien qu'il convienne de rappeler que la politique volontariste de l'ASE, visant à aider en priorité les "petits pays" s'est traduite par une dégradation du retour français.

Par contre, on peut dire qu'à l'inverse, la multiplication des programmes facultatifs de soutien technologique, répondant en partie à l'impossibilité pour l'ASE d'obtenir de ses membres une croissance satisfaisante du programme R et T de base (TRP), a conduit à une quasi-impossibilité d'harmonisation et à une anti-politique de spécialisation en raison des règles de fonctionnement spécifiques de ces programmes.

- Crédits de politique industrielle

Aides étatiques gérées par la DGE (et la DGI), destinées à financer des développements et des améliorations d'équipements industriels visant un marché identifié.

II - Programme de Recherche et Technologie - Niveau de financement

Le succès spatial de la France au sein de l'Europe, ou sur une base internationale, n'est contesté par personne et ce, pour des investissements sans commune mesure avec ceux des USA et de l'URSS. Ce succès résulte en grande partie de l'utilisation, par les responsables civils du potentiel scientifique et industriel créé et soutenu par le Ministère de la Défense (notamment dans le cadre de la Force Nucléaire Stratégique). En Europe, seule la Grande-Bretagne aurait pu disposer d'atouts comparables, mais l'avantage de la continuité politique a permis à la France de prendre naturellement la première place aux plans "programmatiques" et "compétition industrielle". Nos partenaires européens ont pris conscience, avec un certain retard, de l'importance géopolitique et technologique des activités spatiales : l'Espace est devenu un enjeu de puissance. Même si il est admis par tous que cet enjeu ne peut être valablement satisfait qu'à l'échelle de l'Europe, on assiste actuellement à une croissance apparemment paradoxale des volontés nationales pour prendre la "meilleure" place au sein de cette Europe Spatiale. Dans cette situation, peut-être transitoire, où chacun cherche à se placer, le maintien de la compétitivité dans un créneau industriel "convoité" est plus difficile que dans le passé et nécessite des investissements plus importants. Enfin, on assiste à un rééquilibrage entre civils et militaires en ce qui concerne l'entretien du "substrat scientifique et technique". Le décalage entre utilisations militaires et civiles de certaines techniques de pointe s'est estompé, sinon parfois inversé, d'où l'obligation pour les budgets civils de prendre en charge une part plus importante des recherches fondamentales dans les disciplines de base. Ainsi, dans le domaine de la propulsion, après avoir largement utilisé pour le programme ARIANE les acquis des études financées par le Ministère de la Défense, il est apparu indispensable de relancer tout un "fond" d'études fondamentales dans les domaines aussi divers que les mécanismes de combustion, les équilibres diphasiques, la vibroacoustique, la mécanique des fluides, ...

Si les besoins de R et T correspondants ne sont contestés par personne, il est par contre plus difficile de "démontrer" le niveau minimum de financement nécessaire. En effet, on ne peut mesurer les résultats d'action de R et T que de nombreuses années (souvent supérieures à 10) après les décisions et le plus souvent, ce sont les difficultés rencontrées suite à l'insuffisance d'investissements amont qui pourront être identifiées. D'autre part, nous avons vu que ce résultat dépendait considérablement du "substrat" technologique accumulé antérieurement et souvent financé par d'autres. Il semble intéressant de commencer par une analyse du passé. Pour simplifier, on peut considérer trois phases successives :

- 1963-1974** Les acquis antérieurs et la concurrence européenne "douce" ont permis à la France de prendre une place de choix (DIAMANT, FR1, EOLE, SYMPHONIE, OTS, METEOSAT) avec des investissements de recherche qui ont atteint 4,5 % des budgets annuels du CNES.
- 1975-1983** Les contraintes budgétaires résultant de l'arrivée des grands programmes d'application (ECS, TC1, TVSAT/TDF1, SPOT, ARIANE) ont eu pour conséquence une forte diminution des investissements à long terme, l'effort R et T retombant à 3 %, puis à environ 2 % pendant près de 5 ans. Cette diminution s'est

principalement exercée au détriment des investissements en techniques de base, les développements d'équipements dans l'industrie étant, au premier degré, préservés et compensés en partie par les efforts propres de cette industrie.

L'absence de relais civil aux investissements en recherche fondamentale d'origine "Défense" a été mise en évidence sur le programme ARIANE lors des incidents de propulsion, montrant une compréhension insuffisante des mécanismes de combustion puis des problèmes d'allumage des moteurs cryogéniques, et conduisant à des retards importants, donc à des coûts supplémentaires et à un risque de perte de crédibilité au niveau des utilisateurs. La nécessité d'un programme de "consolidation" a traduit en partie cette carence. Le montant de ce programme (200 MUC) a été supérieur à 10 % de la totalité des coûts de développements (en francs courants) AR1, 2, 3, 4.

En ce qui concerne les développements de satellites, on peut penser que l'insuffisance d'investissements de recherche en "amont" est responsable en grande partie de l'allongement des programmes SPOT, TC1, TVSAT/TDF1 (plus de trois ans pour certains d'entre-eux). Rappelons, pour mémoire, les difficultés rencontrées sur le logiciel, le bloc de détection et les problèmes de modélisation thermo-élastique de SPOT, les tubes à ondes progressives de TVSAT/TDF1, les micropropulseurs sur TC1 et TDF1 ... Or le coût de retards sur des grands programmes est généralement sans commune mesure avec le coût des recherches amont, qui auraient permis de les éviter.

1983-1989 Au cours de deux programmes pluriannuels successifs, le CNES a proposé une remise à niveau de l'effort R et T, au profit prioritaire des investissements en techniques de base, conduisant à un effort de R et T "CNES" voisin de 3 % de son budget sur une période de 6 ans. Cette démarche s'est accompagnée d'une volonté d'ouverture sur l'extérieur, à travers l'action de comités d'évaluation de la recherche, visant à optimiser l'utilisation du substrat technique et technologique créé par l'ensemble des acteurs nationaux (Défense, France TELECOM, CNRS, Universités, ...).

Malgré l'effort entrepris depuis 1983, de nombreux arguments concourent à montrer que le niveau d'effort R et T reste encore aujourd'hui très insuffisant :

- l'élargissement du champ des utilisations de l'espace qu'il convient d'explorer,
- le rééquilibrage nécessaire entre support civil et militaire, renforcé par les conséquences d'une situation budgétaire du Ministère de la Défense plus "tendue" qu'il y a une dizaine d'années,
- l'efficacité des actions d'ouverture sur l'extérieur à travers les comités d'évaluation de la recherche, qui met progressivement en évidence les domaines de compétences techniques de base dans lesquels l'insuffisance d'investissements "amont" de la période 75-83 a créé des lacunes qui n'ont pas encore pu être comblées.
- le durcissement de la concurrence intra-européenne, dans un secteur reconnu technologiquement très porteur.

A ce stade, il paraît utile d'insister à nouveau sur l'importance d'un réel effort de R et T, les conditions de son efficacité, les conséquences d'une insuffisance d'investissement dans ce domaine.

On a noté plus haut les problèmes rencontrés sur les tubes à ondes progressives de TVSAT/TDF1, sur les micropropulseurs de TC1 et TDF1, les problèmes d'allumage et de combustion des moteurs ARIANE (vol V18) et leurs conséquences en terme de délais et de coût.

Plus récemment, les études de fond entreprises au CNES dans les domaines de la dynamique et de la stabilisation des satellites ont permis de trouver des solutions rapides à des difficultés survenues au cours du développement du programme SPOT 4/HELIOS économisant ainsi des délais supplémentaires et un surcoût important et démontrant à cette occasion, la réelle synergie entre civil et militaire dans le domaine de l'observation et l'intérêt technique et économique d'une approche commune.

Au niveau des activités de préparation de programmes futurs, l'absence, par exemple, de travaux sur l'infrarouge thermique et le radar... pourrait à terme faire perdre à la France son leadership en Europe en observation de la Terre et les bénéfices d'investissements importants consentis depuis plus de dix ans.

Il a été parfois avancé la thèse qu'il n'y avait pas de fort besoin de R et T du fait de l'existence de grands programmes de développement tels qu'ARIANE.

En fait, il est primordial d'assurer un effort de R et T indépendamment des grands programmes, pour ne pas supporter les contraintes inhérentes à un projet individualisé : contraintes budgétaires, calendaires, d'organisation, de retour industriel dans le cas de programmes européens. Dans le déroulement d'un projet, les activités de recherche sur les techniques et technologies de base résistent très mal aux pressions calendaires et budgétaires. Ces activités sont cependant essentielles pour créer un environnement technique solide et durable garant d'une gestion technique et financière efficace et des réactions rapides en cas de difficultés sur les projets.

La continuité de l'effort de R et T est une nécessité pour son efficacité.

A titre d'exemple d'une nécessaire continuité, on citera les travaux relatifs à la combustion dans les moteurs fusée. De tels travaux ne se conçoivent que sur le long terme, trois phases peuvent être identifiées, chacune s'étalant sur plusieurs années :

- études théoriques de base
- simulation numérique (grands codes de calcul)
- expérimentation : banc d'essai

Si des contraintes budgétaires interdisaient de financer la troisième phase d'expérimentation, phase la plus coûteuse, ce serait cinq ou six ans d'efforts en partie perdus, des équipes de recherche longues à mettre en place qui pourraient disparaître.

Au-delà, il sera sans doute nécessaire de poursuivre par la mise en place d'une politique de "démonstrateurs technologiques". Cette pratique, courante dans l'industrie des moteurs aéronautiques, vise à réaliser des sous-ensembles de moteurs sur lesquels de nouveaux composants, de nouvelles technologies peuvent être validés avant introduction dans un système opérationnel. En particulier, il devient possible, avec ce concept, pendant toute la durée de vie d'un lanceur, d'introduire après validation au sol des améliorations visant à diminuer les coûts, à augmenter la fiabilité et les performances. Là encore, il s'agit d'investissements importants.

L'expérience montre que souvent si la conviction existe chez les décideurs cette conviction résiste mal aux difficultés lors des arbitrages budgétaires annuels. D'où une solution proposée d'affecter une part fixe du budget du CNES au programme R et T.

Enfin, le nombre de disciplines à couvrir s'accroît. Un programme tel qu'Hermès implique la création de nouvelles compétences : hypersonique théorique et expérimental, matériaux... ainsi que toutes les activités liées à l'homme dans l'espace. Même si ces activités sont menées dans un cadre européen, il peut être nécessaire au CNES (et à l'industrie française) d'investir dans ces domaines pour remplir son rôle de maître d'oeuvre mais également pour préserver des positions dans des secteurs stratégiques et pouvoir en fonction des évolutions futures revenir sur toutes technologies majeures. C'est ainsi que face aux initiatives prises dans le domaine de l'hypersonique à l'étranger,

notamment aux Etats-Unis et en Allemagne (Projet Sänger) et face aux enjeux civils et militaires du domaine hypersonique, la France a jugé nécessaire de démarrer un programme de recherche et de technologie sur la Propulsion Hypersonique Avancée (PREPHA).

Un examen détaillé du budget de la NASA, en s'efforçant d'identifier toutes les activités répondant à notre définition de la R et T, conduit à une estimation de l'effort correspondant voisin de 7,5 % du budget (hors aéronautique). Cet effort est d'autant plus considérable qu'il ne faut pas oublier le programme spatial militaire, conduit par le DOD qui dispose d'un budget deux fois supérieur à celui de la NASA.

Au niveau des industries de pointe (électronique, aéronautique, groupes pharmaceutiques, ...), il est fréquent d'atteindre et même de dépasser 10 % du chiffre d'affaires consacrés à la R et D. En France, des sociétés comme THOMSON, MATRA, AEROSPATIALE, BULL ... ont dépassé 10 % en 1988. En R.F.A., SIEMENS, ANT ont atteint respectivement 12 et 13 % en 1987.

Enfin, signalons que l'ASE affiche un objectif de 8 % (TRP + STP's), voire 10 % si on ajoute le programme de démonstration en orbite (T.D.P.). Dans ces conditions, il semble raisonnable de consacrer à la R et T un budget supérieur ou égal à 10 % du volume d'activité industrielle généré. Sur ce montant, un objectif de 3,5 % à la charge des industriels semble une limite, compte tenu des marges faibles dégagées sur les activités spatiales.

Le volume d'activités industrielles découlant des programmes du CNES et de l'ASE, auxquels il faut ajouter les travaux commandés par d'autres utilisateurs, (FR.TC, INMARSAT, INTELSAT, Exportations,), hors Défense et production ARIANESPACE, est supérieur à 10 Milliards de francs par an.

Dans ces conditions, il a été proposé (Programme pluriannuel de R et T 1990-1992 - Conseil d'Administration du CNES du 5 avril 1990) et généralement admis comme un minimum raisonnable de consacrer 6 % du budget spatial à la Recherche et Technologie (programme R et T du CNES plus la part française du financement du programme R et T de l'ASE). A ce jour, cet objectif est loin d'être atteint, l'effort R et T se situant autour de 4 %, dont un peu plus de 3 % pour le programme R et T CNES.

III - Recherche et Technologie - Politique industrielle - Cohérence d'ensemble

Ce rapport n'a pas pour objectif de traiter de la politique industrielle. Cependant, les activités de Recherche et Technologie ne sont pas une fin en soi et il est nécessaire de veiller à la cohérence entre ces activités et la politique industrielle suivie dans le cadre des projets. Les investissements dans un domaine technique doivent s'accompagner de la volonté de placer les équipements correspondants dans les projets et de favoriser les exportations.

Dans ce sens, quelques remarques doivent être faites.

- La part souvent prépondérante accordée à la maîtrise d'oeuvre dans le cadre des projets européens va à l'encontre des intérêts des équipementiers. Les règles de juste retour se traduisent par un déséquilibre de la part dévolue aux équipements français en faveur de leurs concurrents européens. Le risque est grand de voir les technologies de demain développées hors de nos frontières, conduisant à la disparition du tissu industriel des équipements générateur d'emploi et le plus susceptible d'irriguer par les compétences acquises d'autres secteurs économiques. Il faut veiller à préserver un minimum de retour sur les technologies même éventuellement au détriment d'activités de management, de maîtrise d'oeuvre.

- Les décisions sur les trois grands programmes ARIANE V, COLUMBUS, HERMES causeront une modification profonde des capacités de l'industrie spatiale française.

On en mesure déjà les effets dans le cadre du programme ARIANE V. Les parts françaises, allemandes et italiennes sont respectivement de 48,15 et 22 % par rapport à 67,15 et 4 % sur ARIANE IV. Il a donc été nécessaire de procéder à une redistribution des tâches conduisant à abandonner à l'Italie un certain nombre d'activités.

Ceci ne peut se faire sans transferts de technologie et ARIANE V marque, entre autres, l'accession de l'Italie (certes pour le compte de l'Europe) à la technologie des grands propulseurs à poudre qui n'étaient disponibles qu'aux Etats-Unis jusqu'alors.

Cependant, les développements Mq 2 et H 10 (lanceurs dérivés d'ARIANE) et une politique de R et T volontariste (modélisation des équilibres diphasiques, etc.) préservent (dans une certaine mesure) le maintien de la compétence nationale (et européenne) dans le domaine de la maîtrise de la propulsion liquide.

Les conséquences du partage d'activités avec l'Italie sont beaucoup plus délicates en termes de volume d'activité industrielle. Le nouveau cadre de réalisation et la spécificité d'ARIANE V entraînera une baisse de plan de charge importante pour la SEP qui, pour un lanceur, ne fournira qu'un seul moteur Vulcain contre sept Viking et un HM7 actuellement. La part propre de la SEP ne dépassera pas 30 % de ce qu'elle est sur chaque lanceur aujourd'hui. Quant à la SNPE, son activité de production sur ARIANE V sera quasi nulle.

Pour HERMES, la France participe à ce programme à un niveau élevé (43,5 %). En conséquence, la part des industriels français, pour assurer la bonne conduite du projet, s'exerce en priorité sur la maîtrise d'oeuvre, avec Aérospatiale et Dassault Aviation.

On peut constater, en outre, que la part sous-systèmes ou équipements est souvent captée par les sociétés maîtres d'oeuvre et que certaines autres seront attribuées à des sociétés américaines, de telle manière que les équipementiers traditionnels de l'espace, ou ceux qui voudraient en faire partie, n'ont que fort peu accès aux activités HERMES.

En ce qui concerne les nouvelles technologies qui seront développées, il faut bien convenir que, relativement aux investissements, elles sont faibles et concernent essentiellement :

- l'hypersonique,
- les matériaux,
- l'avionique,
- les logiciels.

De plus, ces technologies risquent de n'être utiles que dans le cadre de programmes du type HERMES et n'avoir que très peu de retombées.

Pour COLUMBUS, la technologie est traditionnelle et n'opère pas de modifications de l'état de l'industrie française. Cependant, la participation française de 13,8 % est très concentrée chez un seul industriel qui assure la maîtrise d'oeuvre d'un sous-système, ce qui laisse peu de place aux équipementiers.

Sans détailler toutes les conséquences industrielles de ces programmes, on insistera sur des pertes de technologies d'excellence induites.

Les compétences traditionnelles de la France sont véritablement menacées par la diminution des activités qui en font usage, certes au profit de compétences nouvelles. Il est clair que les trois grands programmes prennent la place d'activités plus traditionnelles (lanceurs conventionnels et satellites). On assiste à une évolution des techniques et des technologies (perte de nos positions

sur les télécommunications, gains sur l'aérodynamique hypersonique et les capacités système par exemple).

Nous cherchons cependant à rester présents à peu près partout. Cette politique nous conduit à partager les ressources restantes entre de nombreux programmes. Nous atteignons à l'heure actuelle le minimum en deçà duquel l'activité va disparaître. Les activités de plusieurs équipementiers sont menacées.

Ce phénomène commence à se faire sentir. Des sociétés débauchent cependant que, simultanément, d'autres embauchent (dans d'autres domaines).

Il reste à savoir si les activités nouvelles sont, d'un point de vue commercial, prometteuses comparées au niveau d'investissement qui leur est ou a été consenti. Il est légitime d'en douter. Il existe un marché ouvert de l'espace utile, il n'en existe pas pour les vols habités.

Conclusion

La nécessité d'un fort programme de Recherche et Technologie est généralement admise.

Cependant, les contraintes budgétaires n'ont pas permis d'atteindre l'objectif raisonnable de consacrer à la R et T une part fixe de 6 % minimum du budget spatial.

Pour le maintien des positions acquises par la France dans un contexte très concurrentiel, pour la survie de son industrie, en particulier des équipementiers, sa capacité à exporter, il est indispensable d'accroître l'effort national en Recherche et Technologie.

OFFICE PARLEMENTAIRE
D'EVALUATION DES CHOIX
SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES

EXPERTISE n°8

ENJEUX ECONOMIQUES ET INDUSTRIELS

(Contribution au rapport présenté par Paul LORIDANT, Sénateur de l'Essonne,
sur les ORIENTATIONS DE LA POLITIQUE SPATIALE FRANCAISE ET EUROPEENNE)

Marc GIGET

Marc GIGET

Marc GIGET est spécialiste des problèmes de concurrence internationale dans les industries de hautes technologies et conseiller auprès de grands groupes industriels. Il a successivement créé le SEST, groupe de recherche sur les problèmes Sociologiques, Economiques et stratégiques liés aux techniques nouvelles, puis Euroconsult, société de recherche, d'études et de conseil sur les industries de hautes technologies.

La branche Ecospace d'Euroconsult est spécialisée au niveau international dans tous les aspects économiques liés au développement spatial, avec une centaine de clients (entreprise, agences spatiales, opérateurs, organismes de tutelle) dans 23 pays.

Dans ce cadre Marc GIGET a réalisé de nombreux travaux d'expertise et d'évaluation économiques sur le secteur spatial, pour les entreprises concernées et des organismes publics, dont l'Office d'Evaluation Technologique du Congrès américain (sur la coopération internationale dans l'espace et la Space Station), l'ESA (sur la réduction du coût des satellites la compétitivité de l'industrie spatiale européenne), la Commission des Communautés Européennes (sur le développement des applications d'observation de la terre) et l'OCDE (sur la concurrence entre les satellites et des fibres optiques).

Partie 1 - Le contexte politique et budgétaire

Dans la première partie, le rapport analyse l'évolution du contexte politique international dans le domaine spatial. Le débat est en effet largement ouvert au niveau international sur le problème des finalités politiques des grands programmes spatiaux civils, des objectifs globaux réellement poursuivis, de la place du spatial par rapport aux autres priorités publiques, et des limites budgétaires dans lesquelles doit s'inscrire le développement des nouveaux programmes. L'activité spatiale est en effet encore financée pour l'essentiel par les budgets publics, civils et militaires, et les facteurs politiques sont déterminants dans ses perspectives de développement.

1.1 Justifications politiques au financement de l'espace et impact budgétaire

Quatre justifications politiques principales sont généralement données au financement public de l'espace :

- Le prestige national lié à la conquête de l'espace, qui, par son aspect de démonstration publique, visible de tous, constitue un lieu particulièrement favorable à l'affrontement technologique pacifique entre nations et à la démonstration politique d'un certain niveau de développement sur la scène internationale
- Le soutien à la science et à la technologie, qui relève du rôle traditionnel des Etats dans le support au développement des connaissances scientifiques
- Le développement d'applications civiles, et les enjeux industriels et commerciaux importants qui y sont liés, essentiellement les télécommunications et l'observation de la Terre.
- Les applications militaires, en croissance extrêmement rapide en raison du rôle déterminant pris par la technologie spatiale dans les problèmes de défense.

1.2 Le contexte international : évolution des finalités et des moyens affectés à l'espace dans les grands pays concernés

Une analyse comparée de la répartition internationale des budgets spatiaux fait ressortir l'importance de cinq grands pôles au niveau international : Etats-Unis, Union Soviétique, Europe, Japon et Chine.

Les niveaux d'efforts absolus et relatifs sont toutefois très différents, ainsi que la répartition entre les activités civiles et militaires. De même, les objectifs poursuivis et les tendances d'évolution varient fortement, traduisant des politiques spatiales extrêmement contrastées qu'il convient de mieux cerner pour mieux appréhender la position particulière de la France dans son environnement international.

Etats - Unis

L'évolution de la politique spatiale américaine est analysée de façon approfondie. Les Etats-Unis sont en effet beaucoup plus fortement impliqués dans l'espace que l'Europe et depuis plus longtemps. Les réussites et les échecs américains dans ce domaine ont de fait un impact déterminant sur le développement de l'espace dans les autres pays, dont la politique spatiale est en grande partie influencée par celle des Etats-Unis, et en est même parfois étroitement dépendante.

L'analyse met en évidence à la fois le rôle dominant des Etats-Unis et la grave crise affectant leur programme spatial civil. La fuite en avant de la Présidence, qui a multiplié les initiatives spatiales, est mise en relation avec l'attitude de plus en plus critique du Congrès dans un contexte de grave crise budgétaire et de désintérêt croissant du public américain pour la conquête spatiale.

Les principales raisons de cette crise financière et de confiance concernent essentiellement la priorité donnée aux programmes de prestige par rapport à l'espace utile et à la science, et les limites budgétaires par rapport aux autres priorités. Les perspectives d'avenir restent marquées

par l'incertitude, les recommandations pour l'établissement d'un nouveau consensus proposées par le comité Augustin, nommé par la Présidence, n'ayant été que très partiellement suivies.

Contrastant avec les incertitudes sur les grands programmes civils, l'espace militaire a connu ces dernières années une croissance exceptionnelle. L'avance prise par les Etats-Unis dans l'espace militaire est considérable. L'intégration des applications spatiales dans l'ensemble du système de défense est maintenant très avancée, et la guerre du Golfe en a prouvé le caractère opérationnel. Il s'agit du seul segment du marché militaire en croissance réelle, et les programmes militaires représentent l'essentiel de l'activité et de la base technologique de l'industrie spatiale américaine.

Union Soviétique

L'Union Soviétique constitue l'autre "modèle" de référence dans le domaine des programmes spatiaux. De fait, l'espace a joué au cours des trente dernières années un rôle fondamental dans la politique scientifique, technologique et internationale de l'Union Soviétique. En rapport à son budget national, ce pays a été le plus impliqué dans ce secteur, dans le cadre d'une compétition technologique avec les Etats-Unis. Encore plus qu'aux Etats-Unis, l'espace a été constamment promu comme lieu privilégié d'une affirmation scientifique et technologique internationale, l'effort budgétaire soviétique dans l'espace étant en valeur relative le plus élevé du monde.

Depuis l'arrivée de Gorbatchev au pouvoir, l'espace n'est plus le secteur intouchable qu'il était depuis 30 ans. Il est régulièrement amalgamé au domaine militaire dans les discours sur le désarmement et le redéploiement des crédits publics vers des objectifs civils et de développement et il subit de plein fouet la gravissime crise budgétaire. Le nouveau plan quinquennal prévoit une très forte diminution des budgets affectés à l'espace, qui devrait ramener le poids du budget spatial dans le PNB soviétique au niveau de ce qui est observé aux Etats-Unis. Toutes les voies possibles de commercialisation et d'ouverture à l'extérieur sont recherchées pour trouver des financements alternatifs.

Japon

L'effort relatif du Japon dans l'espace reste nettement inférieur à celui de l'Europe. Les objectifs japonais sont actuellement limités à la maîtrise nationale des technologies clefs de l'espace après une longue période de coopération, ressentie maintenant comme une dépendance, avec les Etats-Unis. S'y ajoute la volonté à moyen terme d'aborder les vols habités par la coopération internationale en étant reconnu comme partenaire à part entière des grands programmes internationaux.

Par contre, la concurrence industrielle japonaise s'accroît très rapidement sur l'ensemble des marchés d'applications spatiales. Les compétences industrielles progressent rapidement au niveau des équipements embarqués de satellites, et devraient déboucher dans quelques années sur la fourniture de satellites complets, compte tenu des ambitieux programmes en cours de satellites expérimentaux. Les Etats-Unis s'opposent régulièrement au développement de satellites de télécommunications sur fonds publics au Japon pour protéger leur leadership de maîtrise d'œuvre dans ce secteur.

Europe

En Europe, les dépenses publiques pour l'espace n'ont jusqu'à présent jamais eu l'importance quantitative ni l'enjeu politique qu'elles ont eu aux Etats-Unis et en Union Soviétique. L'effort budgétaire relatif dans le domaine spatial civil s'est régulièrement accru depuis 10 ans. Par rapport au PBN, il est aujourd'hui soit 2,5 fois moindre en Europe qu'aux Etats-Unis, mais deux fois plus important qu'au Japon.

En rapport avec les budgets qui y ont été affectés, le bilan de l'espace européen est jusqu'à présent ressenti comme largement positif, et il n'y a pas eu le phénomène de désenchantement constaté aux Etats-Unis. Considérées comme plus modestes et plus réalistes que celles des

Etats-Unis et de l'Union Soviétique, les ambitions spatiales de l'Europe ont politiquement joué un rôle important dans son émergence technologique sur la scène internationale.

Un nouveau saut quantitatif est souhaité par la communauté spatiale en Europe, lié au développement de l'ensemble des composantes nécessaires à une autonomie européenne pour les vols habités et le travail en orbite (navette Hermes, lanceur Ariane 5-Mk 2, Station spatiale Columbus, satellite relais, et coûts de maintenance, d'adaptation et d'exploitation de l'ensemble). Ces programmes permettant des vols habités autonomes, s'ajoutant au maintien des autres programmes (lanceurs classiques, programmes scientifiques, développement d'applications), nécessiteraient de porter en une dizaine d'années l'effort relatif européen dans l'espace civil à un niveau double du niveau actuel.

L'enjeu budgétaire est donc considérable, compte tenu des risques de dérive des coûts des grands projets, et de la nécessité de maintenir un effort soutenu sur les domaines d'applications.

Il est donc important de bien appréhender le cadre budgétaire dans lequel peut se développer un programme spatial européen élargi aux projets relatifs à une autonomie européenne dans les vols habités.

Une Europe de la défense mal préparée à l'irruption de l'espace militaire

Les dépenses spatiales militaires sont restées marginales en Europe jusqu'au milieu des années 80, et elles sont encore très limitées. Seules la France et la Grande-Bretagne sont engagées dans des programmes spatiaux militaires significatifs. Le coût considérable des programmes spatiaux militaires et leur dimension politique posent le problème du cadre coopératif dans lequel ils pourraient être poursuivis en Europe.

L'Europe de la défense n'est pas encore arrivée à un niveau de maturité suffisant pour apporter une réponse collective unique et cohérente au défi de l'irruption de l'espace militaire, qui met en évidence ses divergences sur un problème sensible, ceci d'autant que le passage à la technologie spatiale militaire a un aspect "global". En effet, les différentes composantes (observation dans différentes gammes de fréquences, communication, localisation, alerte avancée, écoute électronique...) doivent être fortement inter-reliées, et qui plus est en temps réel, pour être efficaces. Et les systèmes spatiaux militaires ont de plus par nature une couverture d'emblée mondiale.

L'émergence inéluctable des applications opérationnelles de l'espace militaire constitue un défi fondamental pour l'Europe qui y est mal préparée. Les solutions qui seront adoptées, et qui sont encore loin d'être formalisées, auront des conséquences politiques, technologiques et industrielles très importantes, y compris sur le développement de l'espace civil (dans une ampleur moindre).

Des politiques nationales très contrastées

L'évolution globale de l'espace européen ne traduit pas une évolution homogène des différents pays concernés. Les situations demeurent très contrastées, en ce qui concerne l'importance politique donnée à ce secteur, et donc celle des budgets publics consacrés à l'espace, le taux de croissance de ces budgets, et leur répartition entre les programmes de l'ESA et les programmes nationaux. De plus, la tendance au cours de la décennie écoulée n'a pas été à une réduction de ces divergences, au contraire.

Il est évident qu'il est difficile, voire impossible, de normaliser les ambitions politiques de chacun des différents pays européens dans le domaine spatial. Les organismes coopératifs créés dans ce secteur (ELDO, ESRO puis ESA) l'ont très vite compris et ont trouvé des formules permettant de faire la synthèse entre la nécessité de la coopération européenne et les motivations des différents pays participants. Jusqu'à présent, les programmes spatiaux européens ont pu se développer malgré ces problèmes.

Le rôle leader et moteur de la France dans l'espace européen

Le programme spatial français est actuellement le plus complet en Europe, dans pratiquement toutes ses composantes. La France a en effet à la fois la première contribution nationale à l'ESA et le plus important programme spatial civil national et de coopération bilatérale. Ceci se traduit par un effort budgétaire relatif, dans l'espace civil, double de la moyenne des autres pays européens. Par ailleurs, la France possède le plus important programme spatial militaire en Europe.

Il est clair que l'espace a été géré jusqu'à présent par la France comme un lieu privilégié d'affirmation internationale de sa capacité scientifique, technologique et industrielle. Ceci s'est traduit par une priorité politique plus grande que celle qui lui a été donnée en Allemagne et a fortiori en Grande-Bretagne. En liaison avec cette place privilégiée, le soutien politique et du grand public à l'espace est exceptionnel en France comparé aux autres pays. Mais ce soutien va de pair avec des espoirs très importants en ce qui concerne le rôle de l'espace pour le développement technologique, industriel et de l'emploi pour le futur.

1-3 Evolution de l'impact budgétaire des programmes spatiaux civils

L'impact budgétaire des programmes spatiaux civils n'a cessé de croître en France en valeur absolue et en valeur relative au cours des dix dernières années. Il a dépassé 10% de "l'enveloppe civile de recherche" au milieu des années 80, et il a progressé depuis, pour atteindre 16,8% dans le budget 1992. L'engagement de l'ensemble des programmes relatifs à l'autonomie européenne dans les vols habités, selon les plus récentes propositions de l'ESA (septembre 1991), supposerait une poursuite de la progression du poids relatif de l'espace vers une fourchette de 21 à 23 % de l'enveloppe civile de recherche, c'est-à-dire comparable au niveau relatif atteint actuellement aux Etats-Unis .

Il est évident qu'en comparaison avec l'ensemble des autres secteurs économiques, les niveaux de financement public de l'espace civil déjà atteints, et bien plus encore ceux qui sont proposés dans le cadre du passage à l'autonomie dans les vols habités, correspondent à un effort très important, sans équivalent dans les autres pays européens. Celui-ci doit être mis en relation avec les enjeux réels qui y sont associés.

Partie 2 - Evaluation de l'impact économique en rapport avec les moyens affectés

La seconde partie du rapport analyse l'impact économique du développement spatial et chiffre son importance pour l'industrie française.

2.1 L'impact économique des programmes spatiaux

L'impact économique des budgets publics affectés à l'espace est analysé à plusieurs niveaux:

- impact direct des contrats d'Agences
- effet d'entraînement sur les marchés d'applications
- effet induit sur les industries en aval, en amont et en périphérie
- impact économique et social des services fournis.

Il apparaît qu'au-delà de leur impact direct, les budgets spatiaux ont un effet d'entraînement important sur les marchés d'applications, qui représentent pour l'industrie un marché d'une taille comparable à celui des agences, avec des perspectives de croissance très favorables. Mais la concurrence est extrêmement dure, et les conditions de succès ne se limitent pas au seul financement public de programmes expérimentaux.

Au-delà de l'activité spatiale stricto-sensu liée aux programmes d'Agences et aux applications civiles et militaires, le développement des programmes spatiaux a également un effet

d'entraînement sur des activités économiques en aval, en amont et en périphérie. L'essentiel de cet effet d'entraînement porte sur l'aval, principalement au niveau des équipements au sol nécessaires aux utilisateurs des systèmes d'applications spatiales, et dont la valeur économique est potentiellement très supérieure à celle des équipements spatiaux proprement dits. Toutefois, si cette activité industrielle est née des possibilités de la technologie spatiale, elle se développe essentiellement de façon autonome. Les secteurs industriels concernés ne sont généralement pas les mêmes que ceux travaillant sur les satellites et les conditions techniques, industrielles et commerciales de l'efficacité concurrentielle y sont différentes de celles du segment spatial.

Les consommations intermédiaires du secteur spatial ont également un effet d'entraînement sur les industries qui le fournissent, que ce soit en amont, au niveau des composants et matières de base utilisés par le secteur, ou en périphérie, au niveau de systèmes et équipements fournis par des industries spécialisées.

Globalement, l'industrie spatiale européenne est en position de force sur les lanceurs. La situation est plus difficile au niveau des satellites, sur tous les marchés ouverts à la concurrence internationale. Sur les importants marchés situés en aval, et sur la fourniture de composants en amont et équipements en périphérie, les positions sont très fragiles. Sur tous ces marchés, l'industrie européenne affronte la concurrence très dure de l'industrie américaine, qui bénéficie d'un support considérable de crédits de R&D militaire et de synergies entre production civile et militaire, et de l'industrie japonaise qui s'étend dans ce domaine à partir de positions dominantes dans l'électronique, les matériaux, les composants et les télécommunications.

2.2 Evaluation de l'importance de l'espace pour l'industrie française

L'industrie spatiale française est incontestablement la première d'Europe, avec un leadership incontesté dans les lanceurs, les satellites de télécommunications, et les satellites d'observation de la Terre, trois secteurs qui débouchent sur un important marché civil et militaire d'applications. Elle est également leader en Europe pour les stations sol. Parmi les 6 principales entreprises maîtres d'œuvre de systèmes spatiaux en Europe, 5 sont françaises ou à majorité française, avec chacune des positions de leader dans leur domaine d'activité principale

Globalement, le chiffre d'affaires de l'industrie spatiale proprement dite a décuplé en 10 ans, pour atteindre en valeur consolidée près de 10 milliards de F en 1990, la part des exportations étant de l'ordre de 30 %. Au-delà de la production spatiale proprement dite, il est nécessaire d'ajouter la fourniture de produits et services en aval directement liée aux systèmes spatiaux (4 milliards de F) et l'activité générée par les contrats CNES et ESA en dehors du secteur spatial (2,5 milliards de F), soit un total "filiale spatiale" de 16,5 milliards de F pour 1990.

Concernant les emplois, il convient d'ajouter aux 9 000 emplois de l'industrie spatiale stricto-sensu les 5000 emplois industriels et de services en aval, les 4 500 des activités liées aux contrats CNES et ESA hors espace, et les 4 000 emplois des agences, CNES et ESA et des laboratoires. En supposant que quelques activités périphériques de services n'ont pas été prises en compte, l'ensemble des emplois de la filière spatiale peut être actuellement estimé en France à près de 25 000 personnes.

L'impact économique et social des services fournis

Au-delà de cette activité industrielle, économique et commerciale, il est rappelé que les services fournis par les systèmes d'applications spatiales ont un impact important sur la société. C'est le cas, par exemple, des liaisons téléphoniques et de la transmission de télévision au-delà des océans, des prévisions météorologiques plus précises et à plus long terme, de la télédétection des ressources naturelles, d'un meilleur contrôle de la pollution etc.

Cet impact socio-économique des services fournis est in fine le plus important puisqu'il constitue la finalité même de la mise en place de systèmes d'applications spatiales. Il intervient progressivement et à long terme et est d'autant plus rapide et important qu'il y a une bonne

intégration et appropriation de la technologie spatiale par les acteurs économiques, en interaction avec les technologies pré-existantes.

La nécessité de dépasser l'argument des "retombées"

Au-delà de ces importants enjeux économiques, industriels et commerciaux, le rapport met en garde contre l'argument des "retombées" économiques et technologiques des programmes spatiaux, utilisé parfois dans les actions de lobbying des agences. Il est rappelé que cet argument s'est en grande partie retourné contre la NASA.

En voulant apporter un argument complémentaire au développement des programmes spatiaux, qui n'en ont pas besoin pour se justifier, compte tenu de leurs implications propres, l'argumentation en termes de "retombées" détourne l'analyse de leurs véritables justifications, technologique, industrielle et commerciale. Elle contribue in fine à les affaiblir en situant très mal le rôle du secteur spatial, qui est à la fois moins universel et plus fondamental. L'espace, du fait de ses contraintes extrêmement spécifiques, n'est pas générateur de beaucoup de transferts technologiques vers d'autres secteurs, et là n'est pas son rôle. Le flux des échanges technologiques se fait très majoritairement des autres secteurs vers l'espace et non l'inverse. Ceci confirme d'ailleurs l'apriori politique du caractère démonstratif et prestigieux des programmes spatiaux, comme étant la synthèse de ce qu'un pays peut faire de mieux.

Le secteur spatial a donc besoin d'une solide base technologique et industrielle en amont, en périphérie et en aval pour se développer harmonieusement et participer au mieux à un échange technologique réciproque avec les autres secteurs de haute technologie. Ce serait trop attendre de l'espace qu'il entraîne technologiquement l'ensemble du reste de l'industrie, et d'une façon plus générale, il ne saurait y avoir durablement d'industrie spatiale florissante dans le contexte d'autres secteurs industriels qui seraient sinistrés.

Partie 3 - Evaluation de l'adéquation des objectifs et des moyens aux enjeux

Dans la troisième partie, le rapport tente de répondre aux questions posées par l'Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Technologiques sur l'évaluation des enjeux économiques et industriels liés à l'espace et sur l'adéquation des moyens affectés. Il est précisé que l'évaluation ne porte que sur les enjeux économiques, et que d'autres facteurs, politiques, scientifiques, militaires etc, traités dans les autres expertises, doivent être pris en compte pour une évaluation globale.

3.1 Les grands enjeux économiques et industriels du développement des programmes spatiaux

Il est difficile de hiérarchiser les enjeux, certains d'entre eux apparaissant comme d'égale importance. C'est le cas de quatre enjeux majeurs pour le développement économique du secteur spatial, qui sont en grande partie inter-reliés.

Le principal enjeu, pour la décennie à venir concerne **l'espace militaire**.

L'expansion extrêmement rapide des Etats-Unis dans l'espace militaire a pratiquement laissé sur place l'Europe. Ainsi, alors que le rapport entre les budgets de défense américain et européen est de l'ordre de 2 à 1, celui des budgets spatiaux militaires est au minimum de l'ordre de 16 à 1. Le retard est donc considérable. Or, par ses implications fondamentales, l'espace militaire interpelle l'Europe au cœur de son problème de défense et lui pose un défi extrêmement difficile à relever.

Au-delà des aspects liés à la défense, l'enjeu est très important. L'essentiel des applications spatiales militaires (observation, télécommunications fixes et mobiles, localisation, navigation, météo...) recourent en effet fortement les applications civiles. Compte tenu du poids

considérable du marché spatial militaire américain, qui pèse actuellement cinq fois plus que la totalité du marché spatial commercial mondial, il s'agit là d'un avantage considérable pour l'industrie américaine.

Si l'Europe s'avérait incapable de s'engager rapidement dans les applications spatiales militaires, ce qui serait très grave à moyen terme concernant sa capacité autonome de défense, il serait pratiquement impossible à son industrie spatiale de pouvoir maintenir une base technologique et industrielle compétitive face à l'industrie spatiale américaine.

Le second enjeu déterminant concerne **les télécommunications spatiales.**

Premier domaine d'application commerciale de l'espace, les télécommunications spatiales représentent de loin le principal marché de l'espace non financé par les budgets publics. Il s'agit d'un secteur qui est bien loin d'avoir trouvé les limites de son développement et dont le potentiel de croissance reste très important.

Les positions européennes restent fragiles sur les télécommunications spatiales et très en deçà de ce que doivent être ses ambitions. Le marché mondial des télécommunications spatiales alimente surtout le carnet de lancements d'Ariane (plus de 3/4 des satellites lancés). Les producteurs de satellites, par contre, ont du mal à être compétitifs sur leur marché intérieur et à percer à l'exportation. C'est en raison des enjeux importants du marché des télécommunications spatiales et de la dureté de la concurrence que les industriels français concernés se sont engagés dans des stratégies de rapprochement et de participation dans des entreprises étrangères, y compris aux Etats-Unis.

Si le secteur spatial européen n'arrivait pas à maintenir ses positions et à se renforcer sur le marché des satellites de télécommunications et qu'il doive se replier sur les marchés d'agences, il perdrait sa dimension industrielle et l'essentiel de son impact économique.

Le troisième grand enjeu économique concerne **l'observation de la Terre.**

Il s'agit là d'un secteur actuellement moins mûr que celui des télécommunications, mais aux perspectives de développement au moins aussi importantes. L'observation de la Terre est par nature extrêmement polyvalente. Elle se trouve au carrefour de nombreux champs : domaine scientifique et applications, météorologie et télédétection, besoins civils et militaires, services publics et marchés commerciaux, connaissance de l'environnement et gestion des ressources terrestres etc. Elle est notamment porteuse de solutions extrêmement efficaces et globales à des interrogations clefs relatives à une meilleure connaissance des grands équilibres de la planète et de son évolution, ainsi que du contrôle de la pollution, pour lesquels existe une très importante demande sociale.

Les investissements restant à réaliser sont toutefois considérables, tant au niveau des systèmes spatiaux eux-mêmes qu'à celui de toute la filière de stockage, distribution, traitement et interprétation des données.

La NASA effectue maintenant un retour spectaculaire dans ce domaine qu'elle avait quelque peu délaissé. Par ailleurs, l'industrie américaine bénéficie là encore de très importants programmes militaires qui lui fournissent une base technologique sans commune mesure avec ce qui existe actuellement en Europe.

Le quatrième enjeu majeur, transversal aux trois précédents, concerne **les systèmes de lancement.**

Une maîtrise autonome de cet élément clef indispensable pour l'accès à l'espace est impérative, compte tenu des enjeux militaires, politiques, industriels et commerciaux qui y sont liés. Les systèmes de lancement doivent, de plus, être les moins coûteux possibles pour favoriser le développement de tous les systèmes d'applications.

C'est dans ce domaine que l'Europe spatiale a connu jusqu'à présent le plus de succès industriels et commerciaux, le rôle de la France ayant été déterminant dans cette réussite. Ce succès dans la maîtrise d'un système de lancement compétitif a été et reste fondamental dans la dynamique industrielle de l'espace européen. Les tirs quasi-mensuels d'Ariane pour des clients du monde entier sont la démonstration régulière de la dimension industrielle et commerciale de l'espace et des capacités compétitives de l'Europe. Il est indispensable que les positions de force acquises par l'industrie française dans ce domaine des systèmes et services de lancements soient consolidées et que l'Europe reste à la pointe de l'efficacité dans les lanceurs qui conditionnent directement la compétitivité de l'ensemble de ses systèmes spatiaux.

En dehors de ces quatre grands enjeux économiques, industriels et commerciaux de l'espace, deux autres enjeux importants doivent être pris en considération, bien qu'ils ne soient pas directement liés à un marché commercial.

Le premier concerne les programmes scientifiques.

Au-delà de leur intérêt scientifique fondamental, ces programmes sont également à l'origine technique de la plupart des applications et des équipements spatiaux. Ils constituent en quelque sorte le laboratoire de l'industrie spatiale et jouent à ce titre un rôle fondamental de renouvellement et d'extension de ses technologies spécifiques et de ses applications.

Les grands enjeux scientifiques qui émergent actuellement justifieraient une approche plus ambitieuse de l'Europe, et particulièrement de la France, qui soit en relation avec les compétences scientifiques exceptionnelles disponibles, qui constituent à long terme la base de son renouvellement technologique.

Le second concerne les vols habités.

L'extension de l'activité de l'homme dans l'espace se situe dans la logique du développement de l'aventure humaine. Cette dimension fondamentale, et le caractère très démonstratif de la "conquête de l'espace" ont entraîné dans le passé une surdétermination politique des programmes de vols habités, dans le contexte de l'affrontement est-ouest. En référence au développement constaté aux Etats-Unis et en Union Soviétique, l'Europe a défini depuis le début des années 80 un ensemble de programmes permettant de déboucher sur une autonomie européenne dans les vols habités et l'activité humaine en orbite.

Mais le contexte politique, économique, technologique et concurrentiel international a considérablement évolué depuis la définition de ces programmes : détente est-ouest et son impact sur les programmes spatiaux américain et soviétique, guerre du Golfe consacrant l'émergence de l'espace militaire, ouverture de l'Europe de l'Est, réunification de l'Allemagne, crise économique et budgétaire dans les principaux pays européens, concurrence violente du Japon sur des secteurs clefs de l'industrie européenne et besoins importants d'investissements de R&D et de production.

Cette évolution a été prise en compte par l'ESA qui, par rapport aux projets adoptés dans leurs phases d'étude et de développement préliminaire en 1987, a réduit la dimension des programmes d'autonomie dans les vols habités et les a étalés dans le temps pour qu'ils restent compatibles avec une croissance moindre des budgets. La décision politique de leur engagement en phase de développement, plusieurs fois retardée, devrait être prise en novembre 1991. Pourtant, malgré ces aménagements, la question reste posée de la définition même de ces programmes et de leur priorité dans le contexte actuel.

3.2 Le problème de l'adaptation des moyens et de leur augmentation au-delà des niveaux actuels

C'est au plan budgétaire et économique que se situe le cœur du problème. L'idéal pour les agences spatiales et l'industrie serait de pouvoir développer à la fois les budgets de l'ensemble des programmes scientifiques et d'applications, et d'engager sans réserve les programmes de

vols habités. Mais une dérive des coûts est à craindre compte tenu des sous-estimations initiales et des impondérables propres à ce type de programmes pour lesquels aucun risque ne peut être pris du fait de la présence humaine.

Par ailleurs, dans un contexte économique extrêmement contraint, il est pratiquement impossible d'obtenir une garantie de croissance aussi forte des budgets demandés sur une période aussi longue, compte tenu du niveau relatif déjà atteint par l'espace à l'intérieur du budget public total de R&D. Augmenter encore de quelques points l'importance relative de l'espace dans l'enveloppe recherche constitue le maximum de l'accroissement possible des ressources. Au-delà, il ne deviendrait plus possible de justifier la priorité absolue donnée à l'espace par rapport à d'autres secteurs industriels représentant des volumes d'affaires, des emplois et des enjeux sans commune mesure, et qui manquent cruellement de crédits de R&D pour affronter la concurrence internationale.

Le risque d'étouffement budgétaire est donc réel et, de fait, même s'ils ne sont pas de même nature, les programmes liés aux vols habités se trouvent en concurrence budgétaire avec les programmes d'applications.

Concernant les perspectives économiques, industrielles et commerciales de l'espace, toute substitution en termes budgétaires de programmes de vols habités aux programmes d'applications, militaires, civiles et scientifiques reviendrait à sacrifier le long terme au profit du court terme.

Jusqu'à présent, les programmes spatiaux civils européens ont été mieux définis et mieux gérés qu'ils ne l'ont été aux États-Unis, avec des budgets plus limités mais en croissance rapide et régulière. En rapport avec les budgets affectés, l'impact industriel et commercial de l'espace est très positif en Europe et tout particulièrement en France, qui a su se placer sur les domaines en relation avec des marchés importants : lanceurs, télécommunications, observation de la Terre.

En abordant à grande échelle les programmes relatifs aux vols habités, l'Europe doit également trouver sa propre voie d'excellence et tirer les leçons des programmes spatiaux américain, et a fortiori soviétique, qui ont en partie sacrifié les objectifs de l'espace utile et scientifique à des opérations de pur prestige politique, très valorisantes a priori pour les agences spatiales. La conséquence en a été, dans un second temps, une rupture du soutien populaire et une dégradation de l'image des agences et du secteur. L'élargissement durable du consensus politique sur les programmes spatiaux européens du futur repose sur une insertion bien identifiée de ceux-ci dans les préoccupations de la société européenne. Cela signifie qu'ils doivent à la fois contribuer à la résolution des problèmes actuels, à tester des solutions nouvelles et à jeter les jalons d'une expansion à plus long terme.

Les possibilités de plus en plus démontrées de la technologie spatiale fournissent de nombreuses opportunités pour répondre à ce défi. Elles justifient amplement la poursuite du soutien au développement des programmes spatiaux à un taux au moins égal à celui des budgets publics de R&D. Le rôle des agences, ESA et CNES, reste en effet déterminant dans le soutien au développement durable de l'industrie et des applications spatiales, et il doit être confirmé.

Il serait extrêmement risqué de disperser les compétences alors que les moyens européens sont limités. Mais parallèlement, ces agences doivent être à même de mieux définir leurs programmes qui, en termes d'enjeux, dépassent maintenant largement la seule communauté spatiale. Ceci suppose que leurs missions soient mieux définies sur le long terme et moins dépendantes de la conjoncture politique. A leur niveau propre, les agences doivent également être plus ouvertes, tant par rapport à la communauté scientifique que par rapport à la communauté économique et industrielle, et fonctionner de façon moins auto-centrée, de façon à éviter le risque d'isolement et de rejet constaté dans d'autres pays.

Table des matières

1 - Le contexte politique et budgétaire

1.1 Justifications politiques au financement public de l'espace et impact budgétaire	1
"Conquête de l'espace" et prestige national	1
Programmes scientifiques : le développement de la science et de la technologie	2
Développement d'applications civiles : enjeu industriel et commercial	2
Applications militaires	3
Gestion intégrée des différentes finalités par les agences spatiales	4
1.2 Le contexte international : évolution des finalités et des moyens affectés à l'espace dans les grands pays concernés	4
1.2.1 Etats-Unis : la difficile recherche d'un nouveau consensus sur l'espace civil	4
La crise du programme spatial civil	5
La perte de crédibilité des initiatives spatiales de la Présidence	8
L'attitude critique du Congrès	9
Le désintérêt croissant du public américain pour le programme spatial	11
La recherche d'un compromis du comité Augustine	12
Des incertitudes persistantes pour l'avenir	13
La considérable avance américaine dans l'espace militaire	14
1.2.2 Union Soviétique : la fin d'un secteur privilégié	16
Contraction rapide du budget spatial et recherche d'ouverture internationale	17
1.2.3 Japon : recherche d'une indépendance technologique nationale dans le cadre d'un budget réduit et émergence industrielle	18
Montée de la concurrence japonaise sur les marchés d'applications	19
1.2.4 Europe : renforcement continu du troisième pôle spatial mondial et recherche d'une autonomie dans les vols habités	19
Rythme soutenu de croissance des budgets spatiaux depuis 15 ans	21
Le problème budgétaire du passage à l'autonomie dans les vols habités	23
Une Europe de la défense mal préparée à l'irruption de l'espace militaire	25
Des situations nationales très contrastées et des évolutions divergentes à l'intérieur de l'Europe	26
<i>Allemagne : un effort accru mais contesté</i>	26
<i>Grande Bretagne : budget limité, en reprise sur l'utilisation de l'observation de la Terre</i>	28
<i>Italie : engagements croissants dans les programmes spatiaux européens</i>	28
<i>Espagne : émergence de l'espace via les programmes européens</i>	29

1.2.5 Le rôle leader et moteur de la France dans le développement des activités spatiales européennes	30
1.3 Evolution de l'impact budgétaire des programmes spatiaux civils et perspectives à horizon de 10 ans	32

2 - Evaluation de l'impact économique en rapport avec les moyens affectés
--

2.1 L'impact économique du développement spatial	34
L'impact économique direct des contrats d'agences	34
L'effet d'entraînement sur les marchés d'applications	35
<i>télécommunications</i>	38
<i>observation de la Terre</i>	39
<i>microgravité</i>	40
L'effet induit sur les secteurs en aval, en amont et en périphérie	41
<i>l'effet d'entraînement en aval</i>	41
<i>l'effet d'entraînement en amont et en périphérie</i>	43
2.2 Evaluation de l'importance de l'espace pour l'industrie française	45
L'impact économique et social des services fournis	49
La nécessité de dépasser l'argument des "retombées"	51

3 - Evaluation de l'adéquation des objectifs et des moyens aux enjeux
--

3.1 Les grands enjeux économiques et industriels du développement des programmes spatiaux	55
L'espace militaire	55
Les télécommunications spatiales	56
L'observation de la Terre	57
Les systèmes de lancement	58
Les programmes scientifiques	59
Les vols habités	59
3.2 Le problème de l'adaptation des moyens et de leur augmentation au-delà des niveaux actuels	61
Note biographique	62
Liste des sigles	63

1.1 Justifications politiques au financement public de l'espace et impact budgétaire

Le débat est largement ouvert au niveau international sur le problème des finalités politiques des grands programmes spatiaux civils, des objectifs globaux réellement poursuivis, de la place du spatial par rapport aux autres priorités publiques, et des limites budgétaires dans lesquelles doit s'inscrire le développement des nouveaux programmes. L'activité spatiale est en effet encore financée pour l'essentiel par les budgets publics, civils et militaires et les facteurs politiques sont déterminants dans ses perspectives de développement.

Les motivations politiques des Etats varient selon la nature des programmes spatiaux. En ce qui concerne les programmes civils, gérés essentiellement par les grandes agences spatiales (NASA aux Etats-Unis, ESA en Europe, NASDA au Japon, CNES en France, DARA en Allemagne etc.), les supports financiers des Etats sont liés à quatre grands types de motivation qui se recourent en partie :

- "conquête de l'espace" et prestige national

Les grands programmes liés à la conquête de l'espace débouchent sur des "premières" de l'aventure humaine dans l'espace (premier satellite artificiel, premier homme en orbite, première sortie dans l'espace, premier homme sur la Lune, premier vol longue durée, première sonde sur Venus ou Mars, première station spatiale permanente, première navette spatiale etc.).

Par son aspect de démonstration publique, visible de tous, la conquête de l'espace constitue un lieu particulièrement favorable à l'affrontement technologique pacifique entre nations et à la démonstration politique d'un certain niveau de développement sur la scène internationale. De fait, les succès (le premier "Spoutnik" soviétique, un américain sur la Lune, les vols humains soviétiques de longue durée), comme les échecs (explosion de la Navette Spatiale) sont l'objet d'un effet d'amplification politique, médiatique et affectif.

La dimension politique est déterminante dans la dynamique de ces programmes. Elle a été exacerbée lors de l'impulsion initiale de la course à la Lune, dans le cadre de la compétition Etats-Unis - URSS. Elle s'est un peu atténuée ensuite tout en restant très forte. Ainsi, l'argument déterminant dans la prise de décision de construction de la station spatiale américaine était de "faire face à la présence permanente de l'Union Soviétique dans l'espace"¹. Pour l'Europe, le Japon et la Chine, l'autonomie d'accès à l'espace, la maîtrise des technologies spatiales et l'évolution vers les vols habités, exclusivité américaine et soviétique jusqu'alors, sont considérées par des responsables politiques comme la preuve de leur arrivée dans le club des très grandes puissances.

Des justifications et arguments complémentaires aux investissements publics dans ces grands programmes de conquête de l'espace sont aussi donnés, concernant la maîtrise de nouvelles

¹ Cf *Civilian Space Stations and the U.S. Future in Space* Office of Technology Assessment Washington November 1984 , et *The Space Station Decision : Incremental Politics and Technological Choice* : Howard E. McCurdy NASA / John Hopkins University Baltimore 1990

technologies et l'effet d'entraînement technologique ou les retombées qu'elles sont supposées engendrer dans l'industrie. Intervient également l'éventualité de nouvelles applications, comme par exemple l'utilisation de la microgravité spatiale ou la mise en place de satellites capteurs d'énergie dans le futur, comme arguments complémentaires pour le développement de stations spatiales et du travail humain en orbite.

- **programmes scientifiques : le développement de la science et de la technologie**

Les programmes spatiaux scientifiques ont trait à une meilleure connaissance de la Terre et de son environnement, du Soleil, de la Lune, des autres planètes du système solaire et plus généralement de l'Univers.

Le soutien public à ces programmes relève du rôle traditionnel des Etats concernant le développement des connaissances scientifiques. Il est à noter que ce champ de la connaissance bénéficie d'un intérêt constant et jamais démenti, tant de la communauté scientifique que du grand public. La meilleure connaissance de l'Univers constitue toujours une justification finale importante des programmes scientifiques eux-mêmes, mais également de façon indirecte, des grands programmes technologiques.

Le développement des connaissances scientifiques liées à l'environnement de la Terre, à l'espace, à la découverte de l'Univers et les technologies nécessaires ont également un effet d'entraînement sur le reste de l'activité spatiale, en servant parfois de précurseurs à de nouvelles applications, et sur les activités industrielles reliées, comme l'instrumentation scientifique, la météorologie, l'opto-électronique etc.. Ce rôle précurseur constitue également une justification au soutien des programmes scientifiques.

- **développement d'applications civiles : enjeu industriel et commercial**

Les programmes expérimentaux et de démonstration d'applications pratiques de l'espace sont souvent qualifiés "d'espace utile". Ils concernent les communications fixes et mobiles, la télédiffusion, la navigation, la localisation, la météorologie, la télédétection, etc.

Le soutien des Etats au développement d'applications nouvelles de la technologie spatiale se justifie par l'intérêt économique potentiel de ces nouvelles applications et par le coût important et les incertitudes relatives aux phases de R&D et de démonstration, qui ne pourraient être financées directement par les administrations techniques potentiellement intéressées ou par le secteur privé. Une fois que l'intérêt et la viabilité d'une nouvelle application sont démontrés, l'activité correspondante est progressivement prise en charge par les utilisateurs, qu'ils soient des administrations publiques (agences météorologiques et d'environnement par ex.) ou des entreprises privées (sociétés de télécommunications ou de télédiffusion par ex.).

Les télécommunications et la météorologie sont les applications spatiales maintenant les plus banalisées, et dont l'utilité est largement reconnue.

Les télécommunications sont la seule application spatiale pour laquelle existe un important marché commercial (Cf. analyse plus loin). La tendance est à un moindre financement public à travers les agences spatiales. Pourtant, l'amélioration des performances et l'élargissement du champ d'applications des télécommunications spatiales nécessitent encore d'important travaux

de R&D ne pouvant être pris en charge que très partiellement par les constructeurs de satellites ou leurs clients, opérateurs publics et privés.

L'observation de la Terre, qui s'est d'abord développée avec les satellites de météorologie et s'étend aux différentes formes de télédétection, apparaît comme porteuse de nombreuses applications dans le futur. Elle constitue un champ d'implication croissante des agences spatiales, avant que n'interviennent les administrations responsables de l'environnement.

La microgravité spatiale (très faible pesanteur) pourrait peut-être, à beaucoup plus long terme, déboucher sur des applications économiquement intéressantes¹.

Dans tous ces domaines d'applications, la question se pose des modalités du transfert progressif de la responsabilité des projets des agences spatiales vers des opérateurs publics ou privés dès qu'une gestion commerciale devient possible. Un désengagement trop rapide des agences, alors que la technologie n'est pas arrivée à maturité, ni le marché encore suffisamment identifié pour une exploitation commerciale (comme la privatisation du système Landsat aux Etats-Unis, par exemple), apparaît aussi préjudiciable au développement de l'espace commercial qu'un transfert trop tardif au secteur privé (Cas des systèmes de lancement, également aux Etats-Unis).

L'ensemble des applications civiles de l'espace est donc porteur d'enjeux industriels et commerciaux importants, ou potentiellement importants, qui constituent des motivations au soutien de l'Etat à leur développement et à leur expérimentation pour placer l'industrie nationale en bonne position compétitive sur le marché des nouveaux produits ou services concernés.

- applications militaires

L'évolution du contexte politique et stratégique international (détente et désescalade Est-Ouest, guerre du Golfe) met en évidence le rôle déterminant pris par la technologie spatiale dans les problèmes de défense et de sécurité et dans la supériorité militaire effective.

L'ampleur de cet impact sur les politiques de défense et les stratégies militaires n'est pas encore totalement cerné. Le problème de l'espace militaire avait été au niveau médiatique et politique polarisé sur le projet futuriste de "guerre des étoiles" alors qu'il concerne en fait une évolution beaucoup plus immédiate et fondamentale de l'ensemble de la problématique de la défense. La rupture introduite dans les problématiques de défense par la maîtrise de l'ensemble des systèmes spatiaux d'applications militaires² est comparable en importance à celle qu'avait entraînée l'arrivée de l'arme nucléaire. La tendance à la mise en orbite de capacités existant jusqu'alors au sol (télécommunications, localisation, observation, radar, écoute électronique...) apparaît comme irréversible dans le domaine militaire, dans le cadre d'une spatialisation globale du concept C³I (Command, Control, Communication, Intelligence).

D'une façon globale, il y a une profonde remise en cause des priorités dans les programmes militaires, avec croissance forte des budgets spatiaux militaires, ceci dans un contexte global de diminution des budgets militaires et des approvisionnements en matériel conventionnel et nucléaire.

¹ Cf. *Le développement des programmes de microgravité aux Etats-Unis, en Europe et au Japon, évolution des programmes depuis l'origine, bilan et perspectives à horizon de 10 ans*. CCE DG XII août 1988

² Cf. tableau 6 présentant les principaux systèmes américains actuels

Les motivations politiques concernant les budgets spatiaux militaires sont très différentes de celles relatives au financement des grands programmes civils. Les ministères de la défense sont de façon croissante utilisateurs de systèmes spatiaux d'applications qui viennent se substituer ou s'ajouter à ceux existants précédemment au sol ou embarqués sur avions. Ils financent le développement puis l'approvisionnement de ces systèmes qui remplissent un nombre croissant de missions. Il s'agit donc d'un important marché d'applications dont les principes de financement sont ceux des systèmes d'armes, infrastructure et équipements militaires.

Contrairement aux grands programmes civils, il n'y a pas d'interrogation politique sur leur finalité. Les militaires sont responsables des choix relatifs aux solutions spatiales par rapport aux solutions sol. Mais les coûts importants des programmes spatiaux posent le problème de leur financement et de la redistribution des crédits militaires entre systèmes spatiaux et systèmes non spatiaux et des formes de coopération internationale permettant d'élargir la base budgétaire disponible.

. gestion intégrée des différentes finalités par les agences spatiales

Globalement, si l'intervention publique dans l'espace obéit à des finalités différentes, il existe aussi des recoupements importants entre ces finalités. Ceux-ci sont liés notamment à la cohérence des technologies propres à l'espace et à l'élément commun indispensable à toutes les missions que constitue le système de lancement. Mais il y a également d'importants recoupements des finalités de certains programmes et applications. L'observation de la Terre, par exemple, présente un intérêt à la fois scientifique, militaire et d'applications civiles, tant publiques que commerciales. Ces facteurs de cohérence de l'espace ont amené les Etats à confier le plus souvent la gestion intégrée de l'essentiel des budgets spatiaux affectés à l'espace à des "agences spatiales", lesquelles doivent gérer les équilibres entre ces différentes finalités.

1.2 Le contexte international : évolution des finalités et des moyens affectés à l'espace dans les grands pays concernés

Les Etats-Unis, l'Union Soviétique, l'Europe, le Japon et la Chine représentent les cinq principaux centres d'activité spatiale mondiale, comme l'indique l'importance relative de leurs budgets spatiaux civils et militaires pour l'année 1990 (Cf. **Tableaux N° 1 et 2**).

Les niveaux d'efforts absolus et relatifs sont toutefois très différents, ainsi que la répartition entre les activités civiles et militaires, comme l'indique une comparaison de l'importance des budgets spatiaux par rapport au PNB des pays du G7 et de l'Union Soviétique (Cf. **Tableau N° 3**). De même, les objectifs poursuivis et les tendances d'évolution sont très différents, traduisant des politiques spatiales extrêmement contrastées qu'il convient de mieux cerner pour mieux appréhender la position particulière de la France dans son environnement international.

1.2 1 Etats-Unis : la difficile recherche d'un nouveau consensus sur l'espace civil

La situation américaine doit nécessairement être prise en compte dans toute réflexion politique sur le développement des programmes spatiaux. En effet, les Etats-Unis sont beaucoup plus fortement impliqués dans l'espace que l'Europe et depuis plus longtemps.

La référence aux Etats-Unis est permanente dans la communauté spatiale européenne, soit pour les citer en exemple en termes d'efforts financiers pour ce domaine et d'ambition des programmes, soit au contraire pour dénoncer leurs erreurs et leurs incohérences : l'erreur du "tout shuttle", le mauvais management du projet de station spatiale, la dégradation de l'image de la NASA, la privatisation trop rapide des applications, etc..

Les réussites et les échecs américains dans ce domaine ont de fait un impact déterminant sur le développement de l'espace dans les autres pays, dont la politique spatiale est en grande partie influencée par celle des Etats-Unis, et en est même parfois étroitement dépendante (Laboratoire européen Spacelab et autres systèmes embarqués sur la navette américaine, module européen de la station Freedom.)

Le programme spatial américain est incontestablement le plus complet et le plus ambitieux au niveau international, dans pratiquement toutes ses composantes (à l'exception des vols habités de longue durée qui sont l'apanage des soviétiques).

Le budget spatial américain pour 1990 s'est élevé à 30 milliards de \$, dont 12 milliards pour la NASA et 18 milliards pour le DoD (Department of Defense), ce qui montre que le maintien de la suprématie américaine dans l'espace est maintenant essentiellement le fait des dépenses spatiales militaires, qui ont fortement progressé pendant la décennie 1980.

La crise du programme spatial civil

Malgré les niveaux impressionnants du budget spatial de la NASA, il n'existe pas actuellement de consensus politique sur une vision à moyen et long terme du programme spatial civil américain, et il est possible de parler d'une véritable "crise" de la politique spatiale américaine.

Entre les visions expansionnistes de la Maison Blanche et celles plus restrictives du Congrès, un équilibre fragile s'est fait ces dernières années sur une évolution de + 10% par an du budget de la NASA¹ (+ 9,8 % en moyenne sur les années 80). La crise budgétaire américaine rend extrêmement difficile, voire impossible le maintien de ce taux de croissance pour les années à venir, sauf affirmation claire et entérinée par le Congrès d'une nouvelle priorité politique dans le domaine spatial, ce qui n'est pas le cas, au contraire.

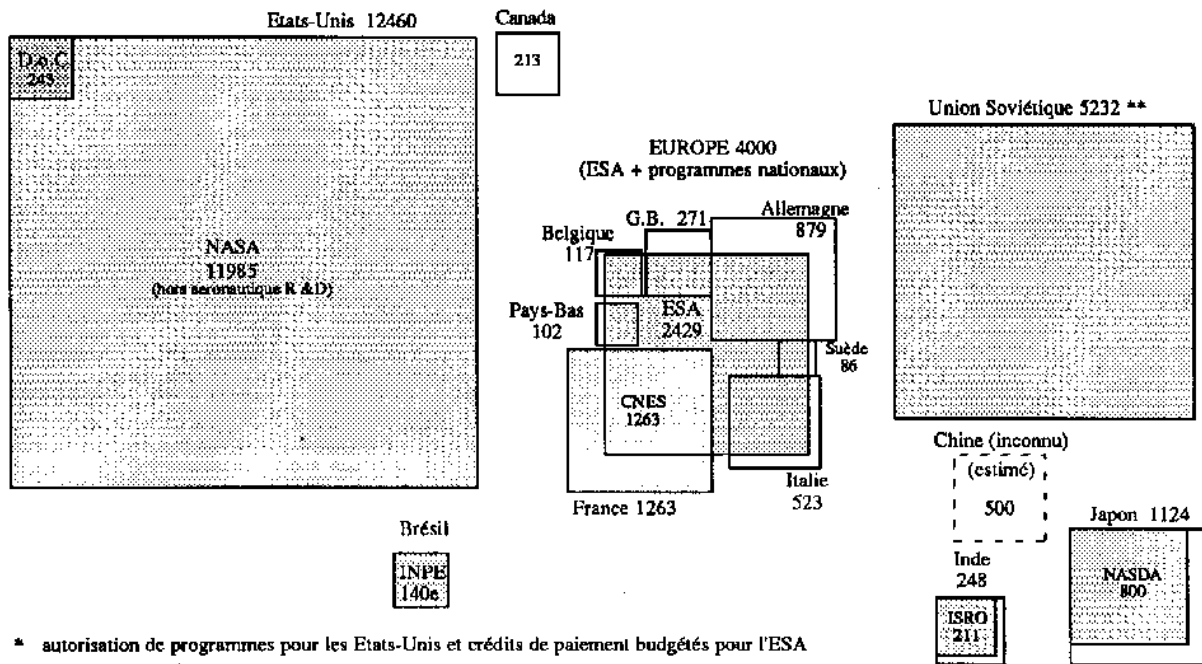
Or, la réalisation des grands programmes déjà engagés nécessiterait une croissance du budget nettement plus forte que 10% par an. La bataille est de ce fait permanente entre la Présidence et le Congrès (et au sein même du Congrès) sur le financement accordé chaque année aux principaux programmes (par exemple, annulation des financements de l'ACTS² par la Présidence, et rétablissement par le Congrès, à l'inverse, suppression du financement de la Space Station par la Chambre des Députés et rétablissement suite à la menace de veto de la Présidence etc.). Certains programmes importants mais moins politiques ont été purement et simplement annulés, comme l'Orbital Maneuvering Vehicule (OMV) par exemple³.

¹ Une analyse plus fine montre que les pertes directes et indirectes de l'accident de Challenger (notamment stockage et maintenance très coûteux de charges utiles scientifiques), ont absorbé l'essentiel de la progression du budget depuis 1987, le "pouvoir d'achat" réel de la NASA n'ayant que très peu progressé (+ 3 à 4 % par an environ) et ses commandes de matériel à l'industrie spatiale ayant décliné (Cf. Tableau N° 7)

² Advanced Communications Technologies Satellite: satellite de télécommunications destiné à tester des technologies avancées en bande Ka

³ Véhicule destiné aux manœuvres et au travail en orbite

Répartition mondiale des budgets* spatiaux civils pour l'année 1990 (en millions de \$)



* autorisation de programmes pour les Etats-Unis et crédits de paiement budgétés pour l'ESA

** 1 rouble = 1,66 \$ (taux de change officiel en Juin 1991)

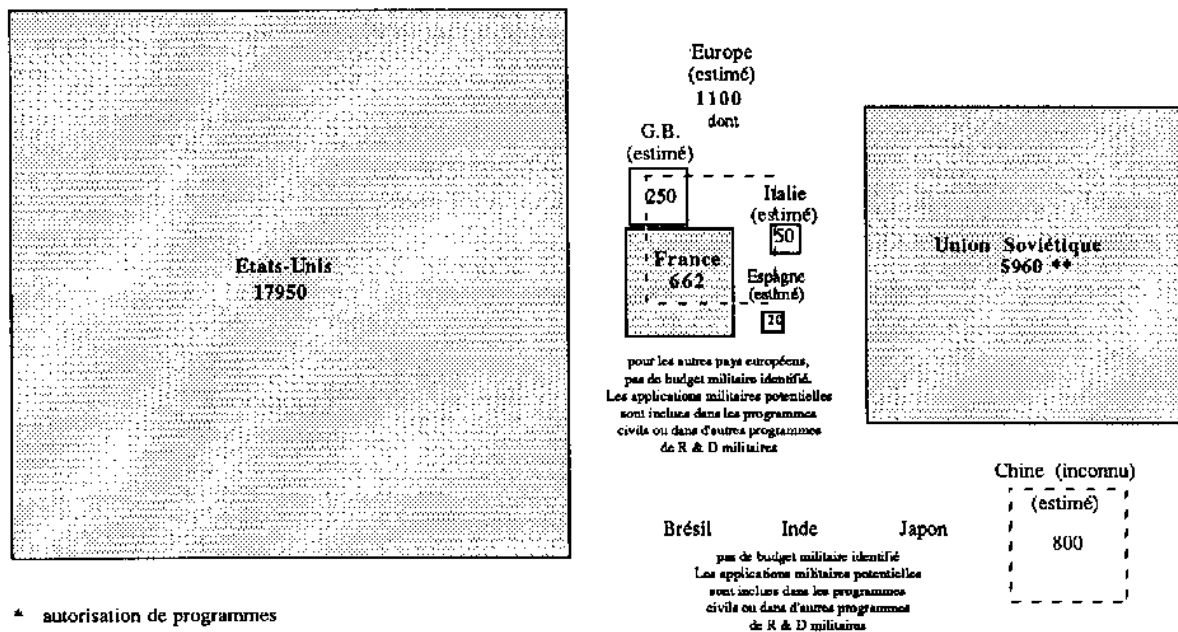
Ressources propres des Agences (CNES, NASDA) exclues

Source : base de données ECOSPACF d'Euroconsult

© Euroconsult 1991

Tableau n° 1

Répartition mondiale des budgets* spatiaux militaires pour l'année 1990 (en millions de \$)



* autorisation de programmes

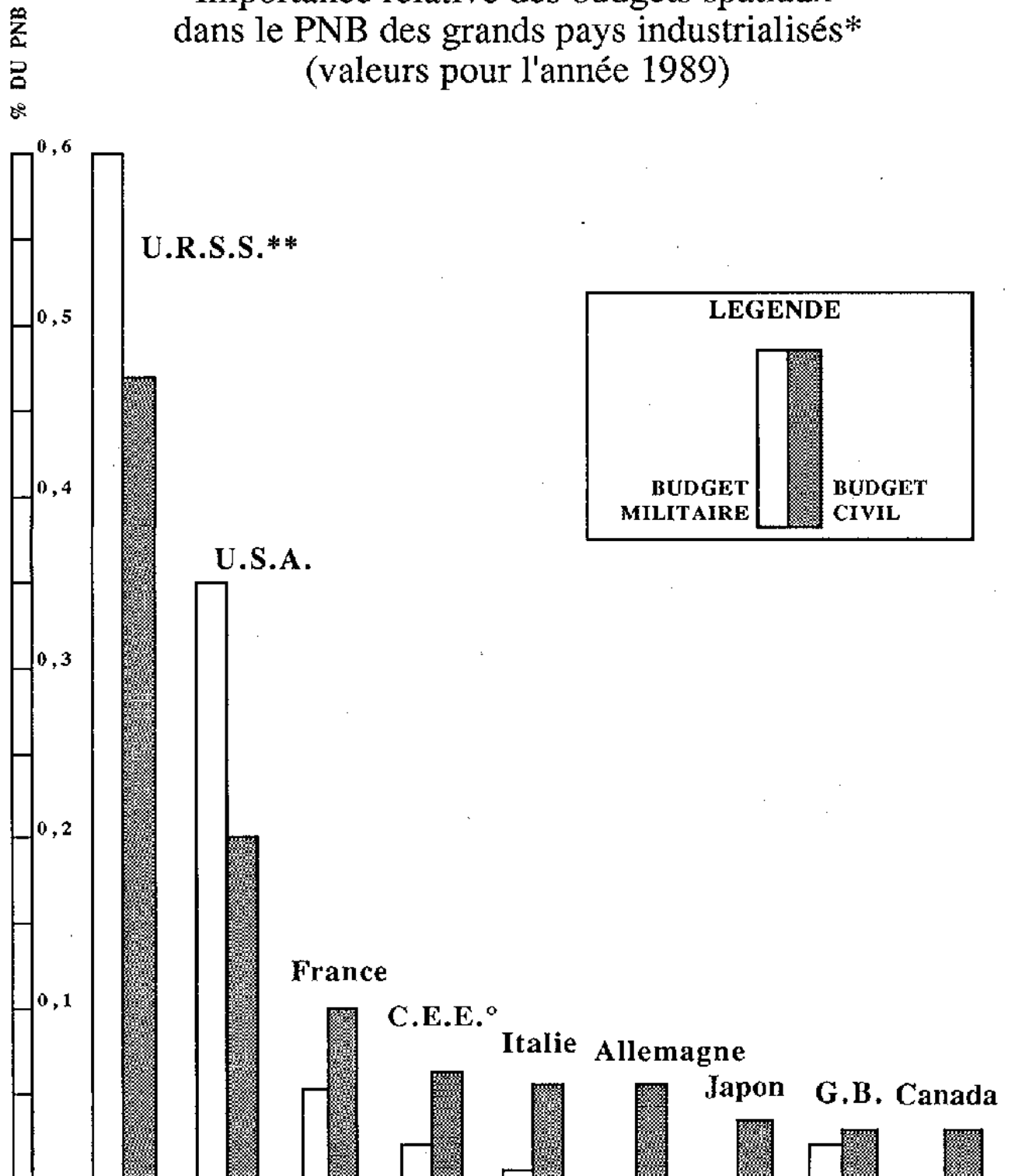
** 1 rouble = 1.66 \$ (taux de change officiel en Juin 1991)

Source : base de données ECOSPACF d'Euroconsult

© Euroconsult 1991

Tableau n° 2

Importance relative des budgets spatiaux dans le PNB des grands pays industrialisés* (valeurs pour l'année 1989)



* pays membres du G7 et Union Soviétique (budgets spatiaux civils hors ressources propres des Agences)

** Le budget spatial de l'Union Soviétique est en décroissance rapide : - 9% en 1990,
- 30 % prévus pour le plan 1991-1995 par rapport à celui de 1986-1990

° moyenne C.E.E.

Données primaires : budgets nationaux

Source : base de données ECOSPACE d'Euroconsult

Tableau n° 3

La perte de crédibilité des initiatives spatiales de la Présidence

Le désaccord entre la Présidence et le Congrès est autant qualitatif que quantitatif.

En référence au défi lunaire lancé par le président Kennedy au début des années 60, la Présidence américaine a, au cours des années 80, régulièrement lancé de nouveaux "défis" pour les Etats-Unis dans l'espace. Mais ceux-ci ont progressivement perdu une grande part de leur crédibilité, faute d'évaluation solide au départ, de soutien du Congrès et de moyens financiers suffisants. Il n'est pas inutile de rappeler les principales "initiatives" spatiales annoncées par la Présidence au cours des années 80, dans leur définition d'origine pour comprendre l'effet actuel de saturation.

Les "initiatives" spatiales de la Présidence américaine au cours des dix dernières années

1983 : initiative de défense stratégique ou guerre des étoiles, portant sur le développement d'un système de bouclier spatial contre les missiles intercontinentaux

1984 : initiative de mise en place d'une station spatiale habitée en permanence avant 10 ans

1985 : décision de réalisation d'un avion spatial permettant aussi bien d'aller en orbite que d'assurer des liaisons commerciales intercontinentales et devant voler avant 10 ans. Le projet a très vite éclaté en deux projets distincts : avion spatial "National AeroSpace Plane, NASP" et avion supersonique du futur, ou "Orient Express"

1986 : initiative d'un plan de conquête de l'espace à 2 composantes : liaison régulière avec l'espace "highway to space" et liaisons interplanétaires "bridge between Worlds", avec objectif d'une implantation permanente sur la Lune en 2017 et sur Mars en 2027. Dans la foulée, a été annoncée une coopération avec l'Union Soviétique pour la conquête de Mars.

1989 : pour le 20^{ème} anniversaire de la conquête de la Lune, décision d'une relance du programme spatial "Space exploration initiative" dans la continuité de l'initiative de 1986 avec l'objectif d'une présence permanente sur la Lune et d'une mission vers Mars.

1990 : dans le cadre des recherches scientifiques internationales sur les effets des changements globaux affectant la planète (dit "Global Change"), initiative sur un programme "Mission to Planet Earth".

Au niveau budgétaire, l'estimation initiale du coût de ces initiatives a été systématiquement sous-évaluée, d'où ensuite des réévaluations dans un rapport de 1 à 5 voire 1 à 10 (Cf exemple de la Space Station in **Tableau N° 4**) entraînant l'abandon de fait de l'aboutissement de certains projets ou leur étalement en phase études et développements exploratoires, sans perspective de développement réel, ou encore des re-définitions avec réduction considérable des objectifs, enlevant aux programmes initiaux une grande partie de leur intérêt¹.

¹ Cf *Questions Remain on the Costs, Uses, and Risks of the Redesigned Space Station* : Charles A. Bowers, Comptroller General of the United States, U.S. General Accounting Office, Washington, 1 may 1991

Cette profusion de projets ambitieux non menés à terme tels que programmés initialement, un nouveau projet se substituant en partie aux précédents, a terni l'image de l'espace qui fait souvent figure de gadget de la Présidence. Celle-ci est accusée de fuite en avant, et de transposition à long terme et dans l'espace d'une incapacité à résoudre les problèmes à court terme et plus "terre à terre", comme la perte de compétitivité des Etats-Unis vis-à-vis du Japon et à moindre titre de l'Europe, dans pratiquement tous les secteurs de haute technologie, dans un contexte de gravissime crise budgétaire et des finances publiques et de problèmes croissants de société.

**Evolution des estimations du coût du programme de la Space Station
(hors contributions internationales)**

1984 - NASA

estimation initiale basée sur design conceptuel : 8 milliards de \$ (84) ou **11 milliards de \$** courants de coûts directs pour une occupation permanente de la station en 1994

1987 - NASA

le coût estimé passe à 12,2 milliards de \$ (84) ou **17,7 milliards de \$** courants pour le développement de la première phase. La date de l'achèvement de l'assemblage est repoussée en 1997

1987 - NRC (Conseil national de la recherche)

32,9 milliards de \$ courants pour le développement total (en deux phases, plus les équipements au sol, les vols STS, et l'exploitation sur 1988-1998, mais excluant l'utilisation de TDRSS

1990 - NASA

l'estimation passe à **38,3 milliards de \$** courants, incluant installations sol, personnel, vols de STS. Le coût d'exploitation est alors estimé à 2,8 milliards de \$ en l'an 2001, première année de pleine exploitation

1991 - GAO (Cours des Comptes)

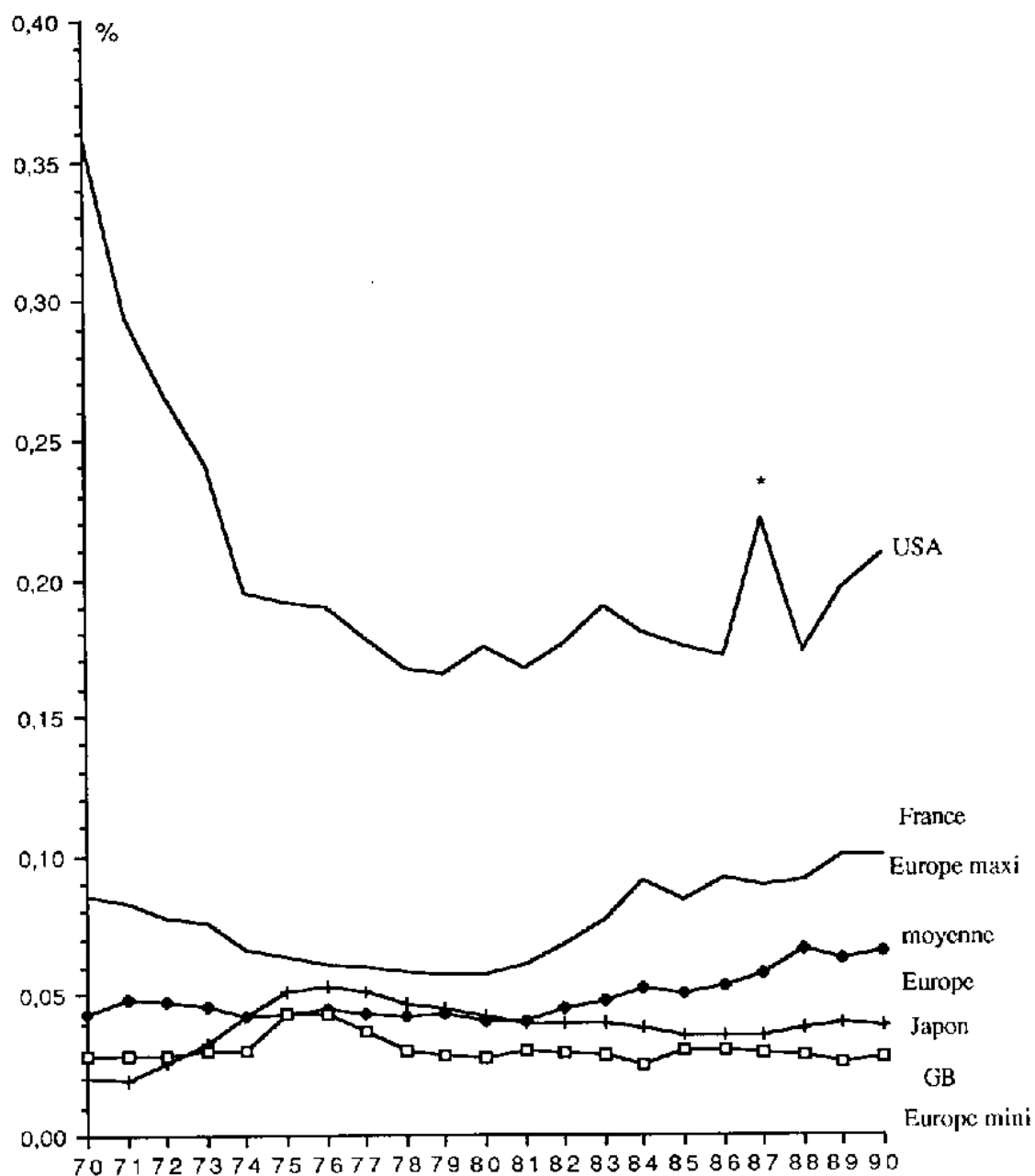
estimation du coût total du programme à **40 milliards de \$** courants pour atteindre une habitabilité permanente et 78 milliards de \$ pour exploiter la station de 2000 à 2027

Tableau N° 4

L'attitude critique du Congrès

Malgré les multiples "initiatives spatiales" de la présidence, l'effort budgétaire relatif américain pour les programmes spatiaux civils est resté stable au cours des 15 dernières années, fluctuant entre 0,15% et 0,2% du PNB américain contre une pointe à près de 1% du PNB lors du programme Apollo. (Cf. **Tableau N° 5**). En effet, le Congrès, qui est loin d'avoir une position monolithique sur les programmes spatiaux, y compris à l'intérieur des partis républicain et démocrate, n'a cessé de contrer les grands projets de la Présidence en limitant fortement les budgets, tout en défendant les programmes liés à l'espace utile et à la science. Cette attitude s'est appuyée sur des critiques de plus en plus fortes de différentes institutions

Evolution de la part du budget spatial civil * dans le PNB aux USA, en Europe et au Japon : 1970-1990



* hors ressources propres des agences * remplacement de l'orbiter Challenger

Source : base de données ECOSPACE d'Euroconsult © Euroconsult 1991

Données primaires : agences nationales, offices statistiques nationaux

Tableau n° 5

fédérales, l'Office budgétaire du Congrès (CBO), la cour des comptes (GAO), l'Académie des Sciences (NAS) critiquant la fuite en avant de la Présidence dans le domaine spatial¹.

De fait, le programme spatial civil américain manque actuellement de cohérence. Il regroupe de grands chantiers à des phases diverses d'engagement dont il est certain qu'ils ne pourront être menés tous à terme. De plus, les grands programmes précédents continuent à peser lourdement sur le budget de la NASA. C'est notamment le cas de la navette spatiale, qui depuis plus de 15 ans absorbe pratiquement moitié du budget d'équipement et de fonctionnement de programme de la NASA. L'accident de Challenger n'a pas été totalement dépassé, et des doutes continuent à planer sur le système qui ne fonctionne qu'à un rythme très réduit et à un coût très élevé, la Présidence ayant entériné au mois d'Août 1991 la limitation du programme aux navettes actuellement existantes et une limitation des missions à celles requérant impérativement l'utilisation de la navette spatiale.

Le désintérêt croissant du public américain pour le programme spatial

D'une façon plus globale, il est possible de constater un désintérêt croissant du public américain pour le programme spatial. Selon les enquêtes réalisées par la National Science Foundation (NSF) sur l'attitude de la population par rapport à la science et à la technologie², il apparaît que le soutien public à l'espace n'a cessé de se dégrader au cours des 20 dernières années. Selon la dernière enquête, seulement 17% des américains estiment que les Etats-Unis devraient dépenser plus dans l'espace, 38% estiment que le niveau de budget actuel est suffisant, et 43 % estiment qu'il doit être réduit.

Il s'agit du support public le plus mauvais pour l'ensemble des postes du budget fédéral, à la seule exception du développement d'armes nouvelles³.

L'élément fondamental de cette crise de confiance est la conviction qu'il existe des priorités plus urgentes pour l'utilisation des fonds publics. Un autre élément, nettement moins important, est lié à la dégradation de l'image de l'espace, du fait des problèmes récurrents de manque de fiabilité affectant la technologie spatiale, avec une série d'échecs de la navette spatiale et des lanceurs classiques, des programmes scientifiques (Space Telescope, Galileo) et même des satellites d'applications (GOES, SuperBird, etc.), ressentis comme des gaspillages inadmissibles. Toutefois, la perte de Challenger avait entraîné un sursaut du soutien populaire au programme spatial américain, mais qui s'est très vite atténué avec retour à un niveau de soutien inférieur à celui d'avant l'accident⁴.

Il est important de noter que ce désintérêt du public ne concerne pas de façon globale le financement public de la science et de la technologie, pour lequel le soutien du public s'accroît (15% seulement des américains estimant que les dépenses fédérales pour la science et la technologie sont trop importantes).

Par ailleurs, la demande sociale est très forte pour l'augmentation du financement public relatif à la résolution de nombreux problèmes de la société américaine. Ainsi plus des 3/4 de la

¹ Cf *Toward a New Era in Space, Realigning Policies to New Realities* National Academy of Science Washington 1989.

² Cf. "Science Indicators" NSF tous les deux ans

³ toutefois, le budget de la défense dans son ensemble bénéficie d'un meilleur support populaire que celui de l'espace

⁴ Cf *The Impact of the Challenger Accident on Public Attitudes Toward the Space Program*, NSF 1989

population souhaite une forte augmentation des budgets fédéraux pour l'éducation, la réduction de la pollution, l'aide matérielle aux personnes âgées, le renouvellement des équipements publics etc.

La dégradation du soutien public au programme spatial américain est un phénomène de fond, et le thème de sa réduction est maintenant politiquement beaucoup plus porteur que celui de son augmentation dans un contexte pré-électoral. Dans ce contexte, l'évolution de l'attitude du Congrès et à moindre titre de la Présidence (tous deux élus) vers une meilleure prise en compte des besoins de la société américaine dans la définition du programme spatial est non seulement compréhensible, mais indispensable au maintien des budgets spatiaux au niveau actuel. C'est notamment le cas de la "Mission to Planet Earth" en relation avec la demande sociale très forte de réduction de la pollution et de respect de l'écosystème, et l'orientation plus scientifique et plus "éducative" du programme spatial, le tout dans un budget stabilisé.

Deux des justifications politiques clefs à un puissant programme spatial se sont fortement érodées. Longtemps, l'argument de l'avance soviétique dans l'espace a été utilisé sans retenue pour justifier le financement du budget spatial aux Etats-Unis, pour la "reconquête du leadership". Dans la mesure où l'Union Soviétique réduit ses efforts dans ce domaine et connaît une grave crise, l'argument politique perd sa justification. Par ailleurs, y compris dans la maîtrise des vols routiniers en orbite basse, l'avance soviétique doit être fortement relativisée. Il s'agit d'une expérience accumulée, et en aucun cas d'une avance technologique.

L'autre argument battu en brèche concerne l'importance de l'espace pour le maintien du leadership technologique américain et son effet d'entraînement sur le reste de l'industrie. Les critiques sont de plus en plus virulentes aux Etats-Unis sur l'intérêt technologique réel des grands programmes spatiaux, et les analyses se sont multipliées sur le déclin technologique américain¹, accéléré par le détournement de l'essentiel des crédits de R&D vers les grands programmes de prestige payés sur fonds publics et gérés par des entreprises peu compétitives aux dépens du développement technologique de l'ensemble de l'industrie perdant du terrain face à la concurrence étrangère. Ces critiques, très majoritaires dans la communauté scientifique et industrielle rencontrent de plus en plus la compréhension du grand public. Celui-ci constate en effet quotidiennement le déclin technologique et la dégradation de l'efficacité industrielle, notamment face aux avancées du Japon et de l'Allemagne où les priorités publiques sont différentes.

La recherche d'un compromis du comité Augustine

L'examen de la politique spatiale américaine fait par le comité Augustine² en 1990 représente une réflexion approfondie sur la politique spatiale américaine et une tentative de compromis plus proche de l'attitude du Congrès que de celle de la Présidence. Il fixe comme priorités la science et l'analyse de l'environnement terrestre, et soutient le projet "Mission to Planet Earth". Il

¹ Cf. notamment *Made in America*, rapport de la commission du MIT sur la productivité industrielle MIT Boston 1989, *How Federal Spending for Infrastructure and Other Public Investments Affects the Economy* Congressional Budget Office July 1991 *La grande panne de la technologie américaine* J.C. Derian, ex responsable de la mission scientifique de l'Ambassade de France aux Etats-Unis Albin Michel 1988.

² Le comité Augustine, du nom de son président, directeur de la société Martin Marietta, a été chargé par la Présidence de définir de nouvelles orientations politiques pour les Etats-Unis dans le domaine spatial. Il a remis son rapport en 1990. Celui-ci constitue théoriquement le document de référence de la nouvelle orientation de la politique spatiale américaine, la présidence s'étant engagée, lors de la nomination du Comité, à suivre ses recommandations.

retient le principe de missions habitées en nombre réduit dans l'objectif à très long terme de base lunaire et de voyages sur Mars, sans dates pré-définies, quand la technologie et les moyens financiers le permettront. Il propose une version réduite, moins complexe et moins coûteuse de la Space Station. Il propose également le développement d'un lanceur lourd non habité plus simple et moins coûteux que la navette spatiale, mais utilisant les éléments de cette dernière. Il recommande également une meilleure gestion de la NASA et une réduction de ses effectifs par transfert de personnels vers d'autres structures de recherche et de développement fédérales. Il fixe le cadre budgétaire maximum impératif dans lequel doivent être conduits ces projets, à savoir environ +10% par an, ce qui semble être la limite budgétaire possible compte tenu du poids déjà important de l'espace dans le budget fédéral (22% du budget civil public de la recherche) . Il introduit d'ailleurs la notion de "go-as-you-pay"¹, reliant la programmation des projets aux moyens financiers réellement disponibles.

Des incertitudes persistantes pour l'avenir

Les recommandations du comité Augustine qui fixent le cadre d'un compromis à long terme n'ont jusqu'à présent pas été suivies dans les faits, et l'affrontement budgétaire se poursuit entre la Présidence et le Congrès.

Un récent conflit sur le budget de la Space Station a opposé au printemps 91 la Présidence au comité d'appropriation de la Chambre des Représentants², qui l'avait purement et simplement annulé. Le difficile compromis qui a été trouvé suite à la menace de veto de la Présidence sur l'ensemble du budget a porté sur le rétablissement du budget en raison des engagements pris par les Etats-Unis envers l'Europe et le Japon sur ce programme, en échange d'une économie d'un même montant de la NASA sur d'autres programmes. Ce conflit montre les limites de la politique purement nationale des Etats-Unis dans ce secteur au-delà des niveaux de budgets actuels. Le compromis portant sur la reconduction du budget de la Space Station pour 1992 ne règle pas les problèmes de fond, puisqu'il a entraîné des réductions de budgets équivalents sur les programmes jugés prioritaires par le Comité Augustine. Par ailleurs, le Congrès n'accepte pas que le budget de la Space Station soit pris sur d'autres postes que le budget de la NASA : à savoir recherche scientifique, ou équipements fédéraux (qui se considèrent eux-mêmes comme sinistrés) comme cela était proposé par la Présidence.

Dans ce contexte, il est difficile d'avoir une vision claire de l'orientation de la politique spatiale américaine pour les années à venir. Une évolution allant dans le sens des recommandations du Comité Augustine, qui sont à la fois réalistes et ambitieuses pour le programme spatial américain, et surtout qui visent à le réinsérer dans les préoccupations de la société américaine pourrait finir par s'imposer, mais cela n'est pas certain. Des arbitrages devront intervenir sur plusieurs programmes (version encore réduite de la station spatiale, ou annulation pure et simple ?, lanceur lourd en continuité du Space Shuttle?, report de la phase prototype du NASP³, abandon total de l'initiative de 1989? etc.), à moins d'une véritable relance de la politique spatiale, très peu probable dans le contexte budgétaire, politique et industriel des Etats-Unis.

¹ "avancez selon ce que vous payez", allusion à l'expression populaire américaine inverse, "pay-as-you-go" signifiant "payez selon ce que vous avez consommé".

² Un conflit de même nature était intervenu l'année dernière sur le budget relatif aux vols futurs vers la Lune et Mars en liaison avec les initiatives de 1986 et de 1989 de la Présidence, qui s'est traduit par une très forte réduction.

³ National Aerospace Plane, avion spatial étudié en commun entre la Nasa et le Département de la Défense, et qui devrait être lancé en phase de développement en 1993.

Il est certain qu'il s'agit là d'une incertitude majeure pour la politique spatiale européenne, qui pour une part importante de ses projets en interface avec les Etats-Unis (notamment Station Freedom et systèmes volant sur la navette spatiale), a eu dans le passé l'expérience des inconvénients de ce type de dépendance avec le programme Spacelab.

Pour 1992, le budget de la NASA a été adopté par le Congrès à un niveau de 14,3 milliards de \$ (+ 3% par rapport à 1991), contre 15,7 milliards demandés par la Présidence. Le sauvetage du budget de la Space Station (1,9 à 2 milliards de \$ en 1992) s'est fait grâce à la réduction des budgets d'applications, essentiellement observation de la Terre (EOS), scientifique (essentiellement le télescope spatial à infrarouge) et du projet d'avion spatial NASP.

La considérable avance américaine dans l'espace militaire

Contrastant avec les incertitudes relatives aux grands programmes civils, l'espace militaire a connu ces dernières années une croissance exceptionnelle aux Etats-Unis. Après vingt ans d'importants travaux de R&D dans tous les domaines d'applications, les années 80 ont consacré la mise en place de nombreux systèmes spatiaux militaires opérationnels. L'avance prise par les Etats-Unis dans l'espace militaire est considérable, l'intégration des applications spatiales dans l'ensemble du système de défense est maintenant très avancée, et la guerre du Golfe en a prouvé l'opérationalité.

Les principaux systèmes¹ militaires opérationnels ou en cours de mise en place aux Etats-Unis (s'y ajoutent des systèmes secrets et expérimentaux) sont présentés dans le **Tableau N° 6**, qui en donne les principales caractéristiques ainsi que le coût unitaire estimé des satellites correspondants². Ces systèmes représentaient en 1990 environ 80 satellites actifs en orbite.

Le développement et le renouvellement de ces programmes spatiaux militaires devraient se poursuivre dans le cadre d'un budget croissant à un rythme légèrement réduit. Il s'agit du seul segment du marché militaire en croissance réelle : +2% par an prévus sur 1990-94 pour les approvisionnements par le D.o.D., contre -3% pour les avions, -5% pour les navires, -8% pour les blindés³.

Le budget spatial du Department of Defense n'a cessé de croître depuis un point bas de 1,4 milliard de \$ en 1972. Cette progression s'est accélérée au cours de la décennie 1980 dans le cadre de la politique de défense de l'administration Reagan comportant un important volet spatial. Le budget consacré à l'espace militaire a ainsi quintuplé de 1980 à 1990, passant de 3,8 à 19,4 milliards de \$ (soit un passage de 3% à 6,3% du budget de la défense, et de 8% à 14% des approvisionnements du D.o.D.). Le budget prévu pour 1991 est de 19,2 milliards de \$, soit un niveau de 6,3 % du budget total de la défense nationale. Sur ce montant, 8,2 milliards de \$ correspondent au poste de soutien général qui recouvre le support technique et de mission ainsi que l'ensemble des programmes secrets de l'USAF et de la Navy. Parmi les applications, les télécommunications (dont la navigation) sont les plus dotées avec 2,7 milliards de \$.

Ces programmes militaires représentent l'essentiel de l'activité de l'industrie spatiale américaine (Cf. **Tableau N° 7**)

¹ Un système comprend plusieurs satellites remplissant une même mission et devant être renouvelés régulièrement

² Cf. *An Overview of Defense Satellite Programs and Launch Activities* U.S. General Accounting Office June 1990, & D.o.D. Budget 1991

³ Cf. D.o.D. Budget Projections 1991

Caractéristiques et coûts des principaux systèmes spatiaux militaires américains

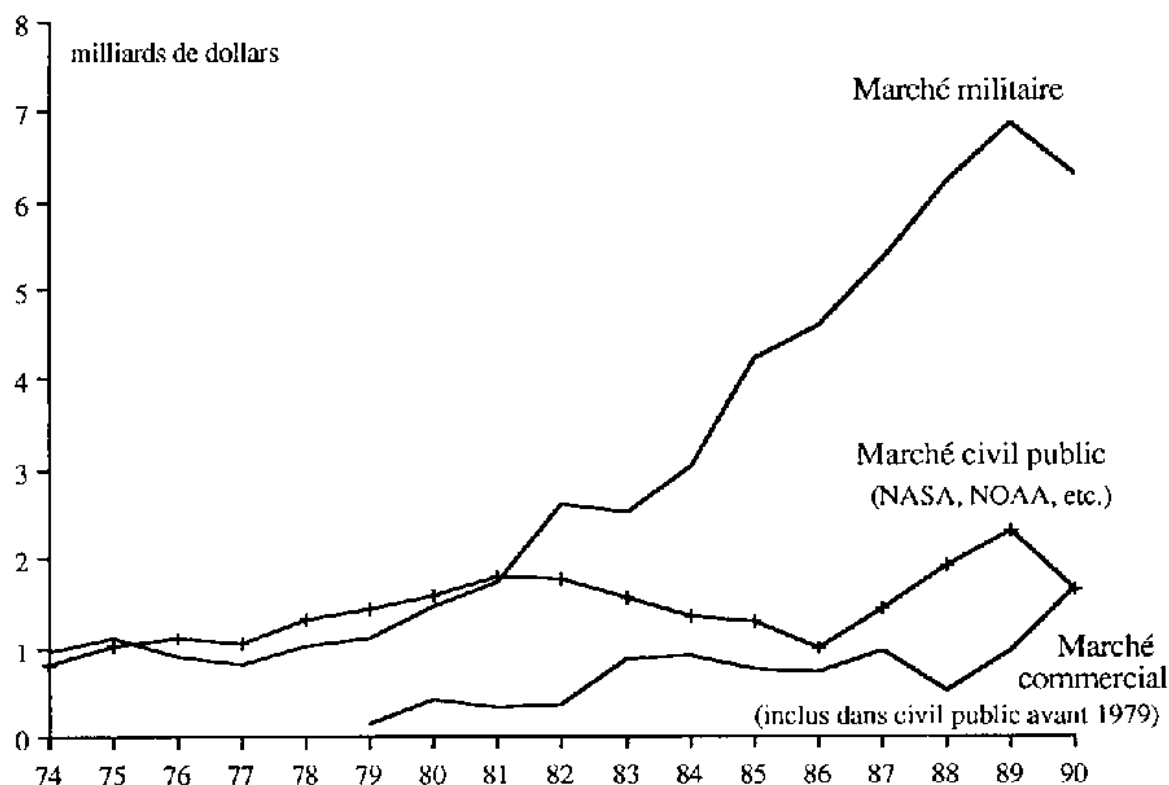
Système	Orbite	Durée de vie des satellites en année	Mission	Satellites en orbite en 1990	Coût unitaire des satellites (en millions de \$)
<u>Observation</u>					
Lacrosse	500 à 800 km.	3 à 8	Image radar. Résolution entre 0,61 et 3 m	1 à 2	500 à 1000 incluant lanc.
KH-11	200-500 km.	3 à 4	Résolution d'environ 15 cm	1 à 2	1250 à 1750 incluant lanc.
KH-12 ou KH-11+ ou KH-11 FO	approx. 200 km.	3 à 8	Recueil et transmission instantanée d'images. Résolution d'environ 15 cm. Images de nuit. Ravitaillés en vol par le STS.	1 à 3	1250 à 1750 incluant lanc.
<u>Ecoute électronique</u>					
Magnum		5 à 10	Captation des signaux de communications et de télémétrie	2	250 à 750 incluant lanc.
Jumpsat	orbite très elliptique	5 à 10	Surveillance des radars anti-missiles balistiques	2	250 à 750 incluant lanc.
White Cloud	1100 km.	5 à 10	Détection et localisation de bateaux	16	50 à 250 incluant lanc.
<u>Navigation</u>					
Transit	orbite polaire	12 à 13	Localisation mondiale en 2 dimensions. Le système sera remplacé par GPS en 1996	7 opérationnels + 5 de réserve en orbite	10,7 pour les 3 derniers satellites, excluant lanc.
Navstar/GPS	6 orbites semisynchrone, inclinaison 55°	6	Localisation mondiale 3 dimensions tous temps et détection de détonations nucléaires	7 + 3 expér. (sur 24 prévus)	47, excluant lanc.
<u>Communications</u>					
Milstar	géo.	5 à 10	Communications stratégiques et tactiques	0 en 90 (6 prévus)	750 à 1000, incluant lanc.
Fleetsatcom	géo.	12	Communications mondiales pour les forces mobiles. Transmission UHF	6	83, excluant lanc.
Leasat	géo.	12	Communications mondiales pour les forces mobiles.	4	loués à Hughes pour 48 millions de \$ en 1991 pour 4 satellites
UHF-FO	géo.	12	Idem, transmission UHF	0 en 1990 (5 + 4 prévus)	170, incluant lanc.
DSCS 3	géo	7	Voix et données haut débit pour commande et contrôle mondial - SHF et UHF	4 (sur 14 prévus)	134, excluant lanc.
<u>Relais de données</u>					
TDRSS	orbite circulaire	5 à 10	Relais de communications entre les satellites, la navette et les stations sol	3	> 100 hors lanc.
<u>Alerte avancée</u>					
DSP	géo.	2 à 5	Alerte avancée de tests de missiles et attaques de missiles. Détection d'explosion nucléaire	5 en orbite (3 opérationnels + 2 en réserve)	260, excluant lanc.
<u>Météorologie</u>					
DMSP	héliosynchrone	27 à 39 mois	Couverture globale toutes les 12 heures. Météo + information océanographique (visible + IR)	2 en orbite + 2 en réserve au sol	149, excluant lanc.

Sources données primaires : CBO, GAO, D.o.D.

© Euroconsult Ecospace Data Base 1991

Tableau n° 6

Evolution de la production spatiale américaine :1974-90*



* Cette série statistique sur la production spatiale américaine est la seule donnant la ventilation par marché final. Mais elle ne concerne que la production industrielle et est très restrictive. En effet, elle ne prend en compte que les ventes de produits spatiaux : lanceurs, satellites, navettes et sondes spatiales, à l'exclusion des systèmes de propulsion et de toutes les activités au sol (études, R&D, tests, essais, opérations...). De ce fait, la "production" stricto-sensu de matériel spatial ne s'élève qu'à un peu plus de 10 milliards de \$ en 1990, à comparer aux 29 milliards de \$ de chiffre d'affaires recensé par l'AIA comme chiffre d'affaires spatial de l'industrie américaine. Par contre, le poids relatif des différents marchés n'est pas affecté par cette limitation

Source des données : US Department of Commerce

Tableau N° 7

1.2.2 Union Soviétique : la fin d'un secteur privilégié

L'Union Soviétique constitue l'autre "modèle" de référence dans le domaine des programmes spatiaux. De fait, l'espace a joué au cours des trente dernières années un rôle fondamental dans la politique scientifique, technologique et internationale de l'Union Soviétique qui, en rapport à son budget national, a été le pays le plus impliqué dans ce secteur, dans le cadre d'une compétition technologique avec les Etats-Unis. Encore plus qu'aux Etats-Unis, l'espace a été constamment promu comme lieu privilégié d'une affirmation scientifique et technologique internationale. L'effort budgétaire soviétique dans l'espace est en valeur relative le plus élevé du monde. Il a été en 1989 de 1,07% du PNB, dont 0,47% pour les programmes civils¹.

¹ 6,9 milliards de roubles pour un PNB de 643,75 milliards de roubles (données Agence Novosti)

Contraction rapide du budget spatial et recherche d'ouverture internationale

Depuis l'arrivée de Gorbatchev au pouvoir, l'espace n'est plus le secteur intouchable qu'il était depuis 30 ans. Il est régulièrement amalgamé au domaine militaire dans les discours sur le désarmement et le redéploiement des crédits publics vers des objectifs civils et de développement et il subit de plein fouet la gravissime crise budgétaire. Le budget spatial a baissé en 1990 à 6,3 milliards de roubles (soit environ 1% du PNB, dont 0,43% pour les programmes civils), contre 6,9 milliards de roubles en 1989.

Les applications militaires sont encore dominantes (50 des 96 charges utiles lancées en 1990 concernaient directement des missions militaires, pour 55% du budget), mais les activités spatiales civiles ont représenté ces dernières années une part croissante avec un engagement important dans les programmes habités et l'exploration planétaire, ouvertes à la coopération internationale.

Le nouveau plan quinquennal (1991-95) prévoit une très forte diminution des budgets affectés à l'espace, soit environ 22 milliards de roubles (dont 15 milliards de roubles pour les programmes civils), contre 31,6 milliards de roubles pour le plan précédent (1986-90), ce qui devrait ramener le poids du budget spatial dans le PNB soviétique au niveau de ce qui est observé aux Etats-Unis. Le programme de navette Bourane est virtuellement abandonné. Parallèlement, il y a recherche de toutes les voies possibles de commercialisation et d'ouverture à l'extérieur pour trouver des financements alternatifs. Les offres de coopération, de fourniture de services de lancement, mais également de télécommunications/télédiffusion, d'expériences en microgravité, de vente d'images, ainsi que de vols d'astronautes payants se multiplient au niveau international. Ces offres de services n'ont rencontré qu'un marché très limité jusqu'à présent.

La grave crise de la société soviétique, y compris aux niveaux scientifique, technologique et industriel, constitue un contre exemple particulièrement gênant pour ceux qui voient dans un très ambitieux programme spatial un moyen d'entraînement technologique et industriel de l'ensemble de la société. Le cas soviétique est extrême, et il est compréhensible qu'il n'y ait pas de soutien populaire à l'accroissement des dépenses publiques pour l'exploration de l'espace quand les besoins les plus immédiats de la population ne sont pas satisfaits.

L'Administration Gorbatchev a fortement influé sur les orientations du programme spatial, maintenant plus tourné vers la rentabilité économique et la commercialisation "tous azimuts" sur le marché international. Boris Eltsine et ses partisans militent quant à eux pour une réduction encore plus forte du budget spatial dans le cadre d'une réorientation du budget de l'Etat vers les besoins réels de la société soviétique. L'implication de hauts responsables du programme spatial soviétique dans la tentative de putsch d'août 1991 a fortement durci les critiques des réformateurs contre le secteur spatial, jugé exagérément privilégié et trop influent sur l'appareil d'Etat.

L'expérience soviétique interpelle l'Europe dans la définition de ses finalités et de ses ambitions. Par ailleurs, les offres soviétiques de coopération tous azimuts méritent considération, l'expérience soviétique et ses capacités, notamment pour des vols habités routiniers et de longue durée pourrait bénéficier aux européens.

1.2.3 Japon : recherche d'une indépendance technologique nationale dans le cadre d'un budget réduit et émergence industrielle

Le programme spatial japonais découle du choix fait en 1970 d'une coopération étroite avec les Etats-Unis pour le développement des applications puis, progressivement de programmes purement nationaux.

L'effort relatif du Japon dans l'espace reste nettement inférieur à celui de l'Europe. Le budget spatial civil ne représente que 0,043% du PNB en 1990, soit moins qu'en 1980 (0,048%), et les objectifs japonais sont actuellement limités à la maîtrise nationale des technologies clés de l'espace après une longue période de coopération (ressentie maintenant comme une dépendance) avec les Etats-Unis. S'y ajoute la volonté à moyen terme d'aborder les vols habités par la coopération internationale en étant reconnu comme partenaire à part entière des grands programmes internationaux.

Compte tenu du niveau de développement économique du Japon, les dépenses spatiales sont donc encore d'un poids relativement faible dans l'économie japonaise, et sous-dimensionnées par rapport à l'ambition affichée. En simplifiant, l'éventail de programmes spatiaux en cours de réalisation ou programmés au Japon est comparable à celui de l'ESA (lanceur lourd cryogénique, mini-navette, satellites technologiques, plate-forme autonome pour la microgravité, module de station spatiale...), ceci avec un budget spatial inférieur à celui du seul budget spatial français civil.

La croissance du budget spatial japonais a repris en 1988, après 10 années de pause, dans le cadre du plan spatial à long terme décidé en 1987.

L'année 1988 a également consacré l'émergence du MITI comme nouvel intervenant dans le programme spatial. Ce ministère qui oriente son action sur le soutien au développement des équipements et matériels pouvant déboucher sur le marché commercial, gère maintenant près de 10% des dépenses publiques affectées à l'espace.

Le budget spatial japonais apparaît comme insuffisant pour mener à terme l'ensemble des programmes tels qu'ils sont décidés actuellement. Compte tenu des programmes à l'étude, les observateurs et les acteurs du programme spatial japonais considèrent qu'un doublement, voire un triplement des dépenses publiques serait nécessaire.

Cependant, les niveaux de croissance observés ces dernières années (+5% en 1990, +9,6% en 1991, +7,2% prévus en 1992) restent très inférieurs à ce qui est nécessaire pour assurer le financement des grands projets. Un taux de croissance de +14% par an était demandé par la NASDA sur la période 1987-2000, et un "consensus" avait été obtenu avec les ministères concernés et l'Agence des sciences et techniques sur une croissance de 12%. Là encore, le contexte budgétaire est contraint, entraînant un glissement des programmes et un prolongement des phases études.

Le budget spatial japonais s'élève pour 1991 à 177,7 milliards de yens, dont 72% sont gérés par la NASDA qui dispose par ailleurs de ressources propres provenant de contributions d'utilisateurs non gouvernementaux tels que NTT, NHK.

Il fait peu de doutes qu'il existe au Japon une "réserve" de soutien de l'opinion publique à un plus important budget spatial, ce secteur bénéficiant d'une assez bonne image populaire¹. Mais un des problèmes du Japon (et aussi l'une des raisons de son succès industriel) tient à la faible implication de l'Etat dans le financement et la gestion de la R&D par rapport aux groupes industriels qui l'orientent vers les domaines les plus porteurs d'applications. Ceci limite les possibilités de l'Etat d'accroître la part déjà très importante de l'espace dans le budget dont il est réellement gestionnaire.

La montée de la concurrence japonaise sur les marchés d'applications

La politique spatiale japonaise a eu jusqu'à présent relativement peu d'impact sur le développement spatial européen. Le Japon garde des liens privilégiés de coopération avec les Etats-Unis et est polarisé sur son indépendance technologique dans ce domaine. Il continue pour l'instant à accuser un retard par rapport à l'Europe concernant les grands programmes.

Par contre, la concurrence industrielle japonaise s'accroît très rapidement sur l'ensemble des marchés d'applications spatiales, avec un leadership mondial dans les stations sol de télécommunications, les périphériques de traitement d'images d'observation de la Terre et les composants hautes performances, pour lesquels le Japon est parfois en situation de monopole. Ses compétences progressent rapidement au niveau des équipements embarqués de satellites, et devraient déboucher dans quelques années sur la fourniture de satellites complets, compte tenu des très ambitieux programmes de satellites expérimentaux actuels (ETS 6 et COMETS dans les télécommunications, MOS et JERS dans l'observation). Il est d'ailleurs à noter que les Etats-Unis s'opposent régulièrement au développement de satellites de télécommunications sur fonds publics au Japon pour protéger leur leadership de maîtrise d'oeuvre dans ce secteur², alors que parallèlement leur dépendance s'accroît rapidement par rapport au Japon en ce qui concerne les composants.

1.2.4 Europe : renforcement continu du troisième pôle spatial mondial et recherche d'une autonomie dans les vols habités

En Europe, les dépenses publiques pour l'espace n'ont jusqu'à présent jamais eu l'importance quantitative ni l'enjeu politique qu'elles ont eu aux Etats-Unis et en Union Soviétique. S'il y a eu des problèmes politiques dans la définition des programmes et la participation des différents pays aux programmes coopératifs gérés par l'Agence Spatiale Européenne, il n'y a jamais eu jusqu'à présent de véritable crise dans ce domaine, et les budgets spatiaux publics se sont, d'une façon globale, développés de façon régulière tant au niveau des programmes coopératifs que des programmes nationaux (Cf. **Tableau N° 8**).

¹ Avec toutefois, pour une part importante de la population, une association au domaine militaire qui peut constituer un frein

² Par l'utilisation de la loi dite "Super 301" contre les subventions entraînant des distorsions de concurrence. Cf. *Space Business in Japan : Situation and Prospects for National Policy, Applications and Industry* Euroconsult May 1990

Evolution du budget* spatial civil de l'ensemble des pays européens : 1975-1990

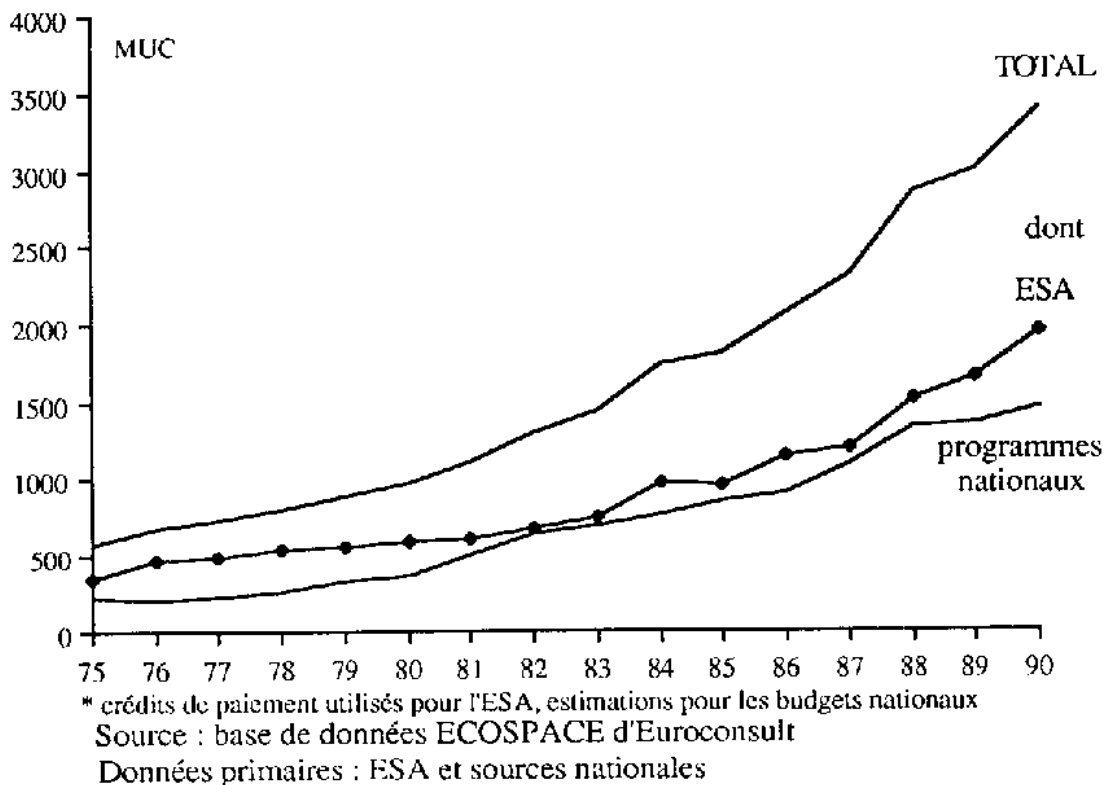


Tableau N° 8

Parallèlement à la progression des crédits en valeur absolue, l'effort budgétaire relatif de l'Europe dans le domaine spatial civil s'est régulièrement accru depuis 10 ans, passant de 0,042% du PNB en 1980 à 0,078% en 1990, soit 2,5 fois moins que les Etats-Unis, mais deux fois plus que le Japon.

En rapport avec les budgets qui y ont été affectés, le bilan de l'espace européen est jusqu'à présent ressenti comme largement positif, et il n'y a pas eu le phénomène de désenchantement constaté aux Etats-Unis. Considérées comme plus modestes et plus réalistes que celles des Etats-Unis et de l'Union Soviétique, les ambitions spatiales de l'Europe ont politiquement joué un rôle important dans son émergence technologique sur la scène internationale, comme un exemple de ce que l'Europe peut faire de mieux quand elle unit ses forces, avec un effet de rattrapage certain par rapport aux Etats-Unis (lanceurs classiques, programmes scientifiques, observation de la Terre) et le maintien d'une avance par rapport au Japon. Le soutien, tant politique que du grand public aux programmes spatiaux a jusqu'à présent été très bon en Europe, à l'exception de la Grande-Bretagne, où il y a eu un véritable désengagement politique.

Toutefois, au-delà du grand public et des milieux politiques, il est possible de constater depuis quelques années en Europe le développement d'attitudes critiques par rapport aux programmes

spatiaux de la part d'institutions scientifiques, technologiques et industrielles nationales¹, concernant moins les programmes passés que les projets futurs relatifs aux vols habités.

Rythme soutenu de croissance des budgets spatiaux depuis 15 ans

Le développement des budgets de l'ESA s'est fait pendant une dizaine d'années à partir du triptyque de grands projets engagés en 1974 lors de la relance de l'Europe spatiale (lanceur Ariane, laboratoire spatial Spacelab et satellites de communications ECS et MARECS). Ensuite, les budgets de l'ESA ont été marqués par le développement d'Ariane 4, et par une plus forte implication sur les applications de télécommunications et d'observation de la Terre, intervenant en décalage d'une dizaine d'années par rapport à la NASA qui a eu tendance à s'en dégager sur cette période (Cf. **Tableau N° 9** des budgets comparés NASA - ESA - CNES).

Depuis le milieu des années 80, les programmes de l'ESA sont entrés dans une nouvelle phase avec le lancement d'une seconde génération de grands programmes portant sur l'infrastructure spatiale. En termes budgétaires, cette situation est caractérisée par le très fort développement du budget lanceur avec Ariane 5 et le décollage des budgets Hermes et Columbus en phase d'études avancées, tandis que les domaines d'applications télécommunications et observation sont en stagnation. A moyen terme, l'effort sur Ariane va se réduire avec une prise de relais prévue pour les programmes Hermes/Columbus et la reprise des budgets pour les programmes l'observation de la Terre. Par contre, les budgets R&D télécommunications devraient poursuivre leur décroissance, avec transfert des moyens sur le développement de satellites relais. Les dépenses relatives à la microgravité devraient croître à un rythme moins important. Les programmes scientifiques devraient quant à eux poursuivre leur croissance lente et régulière.

En autorisations de programmes, pour 1991, les budgets spatiaux civils européens sont de l'ordre de 7 milliards de \$², dont 4,1 milliards pour l'ESA. Les grands pays européens disposent en effet d'importants programmes nationaux qui progressent parallèlement aux programmes coopératifs européens, et même à un taux plus élevé ces dernières années en Italie, en Allemagne et en Grande-Bretagne. Cette tendance s'inverse globalement depuis deux ans avec l'engagement des principaux pays sur les programmes lourds de l'ESA.

Globalement, la croissance des budgets spatiaux civils européens a été de l'ordre de 10% de 1975 à 1985, et a progressé à un taux de 15% par an de 1985 à 1990.

Cette croissance devait encore s'accélérer avec l'engagement des nouveaux programmes approuvés lors de la conférence de 1987 à La Haye. Le plan spatial à long terme (PLT) de l'ESA adopté alors représentait un engagement total pour la période 1987-2000 de 31,06 milliards d'ECUs (prix 1986) dont 16,1 milliards pour les quatre nouveaux grands projets d'infrastructure : Ariane 5, Hermès, Columbus et le système de satellites relais DRS devant permettre à l'Europe d'être autonome dans les vols habités.

¹ critiques de l'Académie des Sciences, des industriels du Conseil National de la Recherche en France, du patronat et du BMFT en Allemagne etc.

² Pour 1 ECU = 1,256 \$ et 1 F = 0,181 \$

Ventilation comparée des budgets (1) NASA, ASE et CNES en 1991 (en millions de \$)
Importance relative des programmes pour chaque agence ; poids relatif de l'ASE par rapport à la NASA et du CNES par rapport à l'ASE

	NASA (2)		ASE		ASE en % de la NASA	CNES		CNES en % ASE
Budget général (3)	2 720	(20,4%)	584	(14,1%)	21,5%	334	(18,7%)	57,2%
Programmes scientifiques (4)	1 570	(11,7%)	206	(5%)	13,1%	139	(7,8%)	67,4%
Observation de la Terre/ Météorologie (5)	668	(5%)	283	(6,8%)	42,4%	357	(19,9%)	126%
Télécommunications (6)	308	(2,3%)	317	(7,6%)	103%	57	(3,2%)	18%
Microgravité	102	(0,8%)	76	(1,8%)	74,5%	≈ 15e	(0,8%)	19,7%
Système de transport spatial(7)	4 993	(37,4%)	1 643	(39,6%)	32,9%	744	(41,6%)	45,3%
Infrastructure en orbite	1 900	(14,2%)	985	(23,7%)	51,8%	79	(4,4%)	8%
Recherche et technologie (8)	290	(2,2%)	-	-		65	(3,6%)	ns
Dépenses diverses non ventilées (9)	805	(6%)	57	(1,4%)	5,2%	-	-	ns
Total	13 356	(100%)	4 151	(100%)	31,1%	1790	(100%)	43,1%

(1) Autorisation de programme pour la NASA, crédits d'engagement budgétés pour l'ASE et le CNES

(2) Hors dépenses de R & D aéronautique

(3) Constructions d'installations et gestion des programmes pour la NASA. Inclut CSG Kourou pour l'ASE. Support fonctionnel des programmes pour le CNES

(4) Physique/ astronomie, sciences de la vie, exploration planétaire pour la NASA.

(5) Inclut les programmes de collecte-localisation pour le CNES

(6) Incluant R &D sur TDAS (Tracking & Data Advanced System), TDRSS (R&D et utilisation) pour la NASA.

(7) Incluant lanceurs consommables (229 millions de \$) et NASP.

(8) Pas de poste R&T identifiable pour l'ASE

(9) Space and Ground Network (hors TDRSS), technologie spatiale, assurance qualité, programmes commerciaux, systèmes d'information, R&T, éducation pour la NASA.

Programmes financés par les tiers, TDP-1 et Prodex pour l'ASE.

Taux de conversion 1990 : 1 ECU = 1,256 \$; 1 franc = 0,181 \$

Tableau n° 9

Le problème budgétaire du passage à l'autonomie dans les vols habités

Compte tenu de la forte pression budgétaire dans plusieurs pays européens, liée à la crise économique, à la guerre du Golfe, au financement du développement de l'Europe de l'Est, aux importants besoins en R&D de l'industrie, une première révision a été proposée par l'ESA à l'automne 1990 portant sur un montant réduit (29,7 milliards d'ECUs) et un étalement du plan jusqu'en 2001. Le programme Ariane 5, déjà engagé, reste inchangé. L'objectif était de revenir à une croissance budgétaire inférieure à 15% par an sur la période 1991-95.

Les difficultés pour trouver un consensus sur ce nouveau plan, liées aux réticences allemandes et italiennes principalement, la Grande-Bretagne étant peu concernée, ont amené l'ESA à proposer en septembre 1991 un nouvel étalement des projets, jusqu'en 2003, permettant de contenir l'augmentation annuelle des dépenses, hors inflation, à 10% par an sur la période 1992 - 1997. Au moment où sont écrites ces lignes, il est trop tôt pour savoir si ces aménagements permettront un nouveau consensus européen sur la poursuite de ces programmes, ou un étalement, ou encore une redéfinition, lors de la conférence des ministres européens prévue en novembre à Munich. Toutefois, le débat budgétaire ouvert sur les programmes spatiaux européens du futur ne sera pas clos après la conférence ministérielle de novembre, quelles qu'en soient les décisions, compte tenu de la durée des programmes concernés, des hypothèses de croissance retenues, des aléas propres à ce genre de programmes et des incertitudes budgétaires existant dans plusieurs pays concernés.

En premier lieu, il convient d'avoir à l'esprit que la croissance lente et continue des budgets spatiaux civils européens a progressivement réduit l'écart avec les Etats-Unis. Globalement, les budgets spatiaux civils européens (ESA + programmes nationaux) pèsent maintenant environ moitié de ceux de la NASA (7 milliards de \$ d'autorisations de programmes pour 1991, à comparer à 13,3 milliards de \$ aux Etats-Unis).

La différence concerne essentiellement trois postes :

- les programmes liés aux vols habités, qui représentent pour la NASA un budget d'un peu plus de 4,5 milliards de \$ pour 1991, contre environ 1,5 milliard de \$ en Europe,
- les programmes scientifiques, qui absorbent 1,5 milliard de \$ aux Etats-Unis, contre environ 650 millions de \$ en Europe,
- le budget de fonctionnement de la NASA elle-même, sur-dimensionné par rapport à celui des agences spatiales européennes, soit 2,7 milliards de \$ pour la NASA contre moins d'un milliard de \$ en Europe, incluant l'ESA, le CNES et les autres agences nationales.

Les programmes d'applications civiles bénéficient par contre pour 1991 de budgets similaires en Europe et aux Etats-Unis en ce qui concerne l'observation de la Terre et la microgravité, et l'Europe dépense plus en ce qui concerne les télécommunications (ceci ne signifie pas que l'industrie américaine reçoive moins de crédits de R&D dans ce domaine, au contraire, mais ceux-ci proviennent essentiellement de programmes militaires).

Le nouveau saut quantitatif souhaité par la communauté spatiale en Europe est donc essentiellement lié au développement de l'ensemble des composantes nécessaires à une autonomie européenne concernant les vols habités et le travail en orbite (navette Hermes,

lanceur Ariane 5 Mk 2, Station spatiale Columbus, satellite relais, et coûts de maintenance, d'adaptation et d'opération de l'ensemble).

Au-delà des débats budgétaires à court terme, il est possible de considérer que ces programmes permettant des vols habités autonomes, s'ajoutant au maintien des autres programmes (lanceurs classiques, programmes scientifiques, programmes de développement d'applications), nécessiteraient de porter en une dizaine d'années l'effort relatif européen dans l'espace civil à un niveau double du niveau actuel. Ceci représente pour l'Europe dans son ensemble un niveau légèrement inférieur à celui des États-Unis en termes de poids des dépenses spatiales civiles dans le PNB (environ 0,18 % du PNB), et pour la France un niveau relatif similaire au niveau actuel des États-Unis (0,20% à 0,22%).

Cette évolution structurelle et durable au-delà des efforts budgétaires actuels suppose un maintien, voire un élargissement lui aussi durable du consensus politique permettant un minimum de garanties quant à la continuité du financement public. "La pire des solutions consisterait à décider de réaliser l'ensemble du programme envisagé sans y allouer les montants financiers correspondants" déclarait récemment le Ministre français de la recherche¹

L'expérience américaine a en effet montré qu'il existait un risque "d'étouffement budgétaire" dans ce secteur, lié à deux causes:

d'une part

- la grande difficulté à maintenir un taux de croissance net des budgets aussi élevé sur longue période (qui, hors hypothèse totalement irréaliste d'une croissance économique continue de 10% l'an, suppose la réduction du poids d'autres postes budgétaires) et donc le risque de voir se réduire les budgets anticipés et

d'autre part

- le risque de dérive du coût des grands programmes concernés, qui se situent toujours bien au-delà des estimations initiales².

Dans ce cas, la dynamique propre aux grands programmes, à forte visibilité politique, entraîne généralement le laminage des programmes scientifiques et d'applications, moins prestigieux, et des crises douloureuses de remise en cause de programmes en cours de développement.

Il est donc important de bien appréhender le cadre budgétaire dans lequel peut se développer un programme spatial européen élargi aux projets relatifs à une autonomie européenne dans les vols habités. Les évolutions récentes constatées aux États-Unis et en Union Soviétique, que la communauté spatiale européenne a en point de mire et cite en référence permanente dans ce secteur, montrent en effet qu'il existe des limites budgétaires au-delà desquelles il est difficile de trouver un support politique aux programmes spatiaux, sauf priorité nationale absolue (cas des années 60 et de la rivalité U.S.A. - U.R.S.S.) et où se pose un problème de conflit avec d'autres priorités.

¹ Cf. "L'Europe spatiale à l'heure des choix" H. Curien Courrier du Parlement Juin 1991

² Cf. dérive des coûts de la Station Spatiale Freedom Tableau N° 4 et réévaluation du coût du programme Hermes de + 36 % par rapport aux prévisions initiales

Une Europe de la défense mal préparée à l'irruption de l'espace militaire

Les dépenses spatiales militaires sont restées marginales en Europe jusqu'au milieu des années 80, et elles sont encore inférieures à 1 milliard de \$ (800 millions d'ECU) en 1990. Seules la France et la Grande-Bretagne sont engagées dans des programmes spatiaux significatifs. La France développe le premier satellite d'observation militaire européen Hélios et dispose d'un système de télécommunications militaires Syracuse embarqué sur Telecom 1 & 2. La Grande-Bretagne a un système de télécommunications militaires dédié Skynet et réalise celui de l'OTAN (Nato IV) et a fait des travaux de R&D sur l'écoute électronique. L'Italie participe au satellite d'observation militaire français Hélios et a un projet de satellite de télécommunications militaires : Sicral. L'Espagne va mettre en place un système de télécommunications spatiales embarquant une charge utile militaire, Hispasat, et participe également à Hélios.

Le coût considérable des programmes spatiaux militaires et leur dimension politique posent le problème du cadre coopératif dans lequel ils pourraient être poursuivis en Europe. Différentes alternatives sont envisagées : programmes nationaux dédiés aux besoins militaires (comme les Skynet britanniques, ou le projet Sicral italien), ou à finalité civile et militaire (comme les Telecom 1 & 2 français ou Hispasat espagnols), programmes coopératifs ad hoc autour d'un programme national (type Hélios), coopération dans le cadre de l'ESA, coopération dans le cadre de l'OTAN (comme les satellites de télécommunications Nato IV), dans le cadre de l'UEO (projets de satellites d'observation) ou d'une nouvelle structure à créer, coopération transatlantique, etc.

La possibilité de développement de programmes coopératifs mixtes civil/militaire est aussi envisagée (notamment dans le domaine télécommunications fixes et mobiles, observation, météorologie, localisation). Elle pose également d'importants problèmes politiques du fait du non recoupement entre les axes politiques de coopération militaire et ceux concernant les coopérations civiles.

L'Europe de la défense n'est pas encore arrivée à un niveau de maturité suffisant pour apporter une réponse collective unique et cohérente au défi de l'irruption de l'espace militaire, qui met en évidence ses divergences sur ce problème sensible, ceci d'autant que le passage à la technologie spatiale militaire a un aspect "global". Les différentes composantes (observation dans différentes gammes de fréquences, communication, localisation, alerte avancée, écoute électronique...) doivent être en effet fortement inter-reliées, et qui plus est en temps réel, pour être efficaces. Les systèmes spatiaux militaires ont de plus par nature une couverture d'emblée mondiale.

Pour l'Europe, la définition de ces programmes spatiaux militaires pose le problème de la défense européenne dans sa globalité : défense de ses frontières et défense de ses intérêts dans le reste du monde. Or il s'agit là de sujets sur lesquels l'Europe a avancé très prudemment, et élément par élément, au cours des années passées, pour éviter de mettre en évidence des oppositions entre politiques nationales encore très différentes, lesquelles sont apparues au grand jour lors de la guerre du Golfe.

L'émergence inéluctable des applications opérationnelles de l'espace militaire constitue un défi fondamental pour l'Europe qui y est mal préparée. Les solutions qui seront adoptées, et qui sont encore loin d'être formalisées, auront des conséquences politiques, technologiques et industrielles très importantes, y compris sur le développement de l'espace civil, un rééquilibrage étant prévisible en termes de valeur entre les deux domaines au cours de la

décennie à venir (à l'instar de ce qui s'est passé aux Etats-Unis au cours des années 80 mais dans une ampleur moindre).

Des situations nationales très contrastées et des évolutions divergentes à l'intérieur de l'Europe

L'évolution globale de l'espace européen ne traduit pas une évolution homogène des différents pays concernés. Les situations demeurent très contrastées, en ce qui concerne l'importance politique donnée à ce secteur, et donc celle des budgets publics consacrés à l'espace, le taux de croissance de ces budgets, et leur répartition entre les programmes de l'ESA et les programmes nationaux. De plus, la tendance au cours de la décennie écoulée n'a pas été à une réduction de ces divergences, au contraire (Cf. **Tableaux N° 3 et N° 10**)

Il est évident qu'il est difficile, voire impossible de normaliser les ambitions politiques de chacun des différents pays européens dans le domaine spatial. Les organismes coopératifs créés dans ce secteur (ELDO, ESRO puis ESA) l'ont très vite compris et ont trouvé des formules (programmes à la carte) permettant de faire la synthèse entre la nécessité de la coopération européenne et les motivations des différents pays participants. Jusqu'à présent, les programmes spatiaux européens ont pu se développer malgré ces problèmes.

Il est certain que l'espace a été intégré à des niveaux très différents, mais de façon croissante par les différents pays européens (à l'exception de la Grande-Bretagne) comme un objectif politique important pour l'affirmation de l'Europe sur la scène internationale.

Les deux extrêmes concernant les grands pays européens, sont constitués par

- la France, pays de loin le plus impliqué dans l'espace, avec un effort budgétaire qui s'est régulièrement accru, de 0,065% du PNB au milieu des années 70 à 0,11% en 1990,
- la Grande-Bretagne, pays le moins engagé dans l'espace civil, et qui a vu son effort budgétaire se réduire constamment de 0,045% du PNB au milieu des années 80 à 0,030% en 1990.

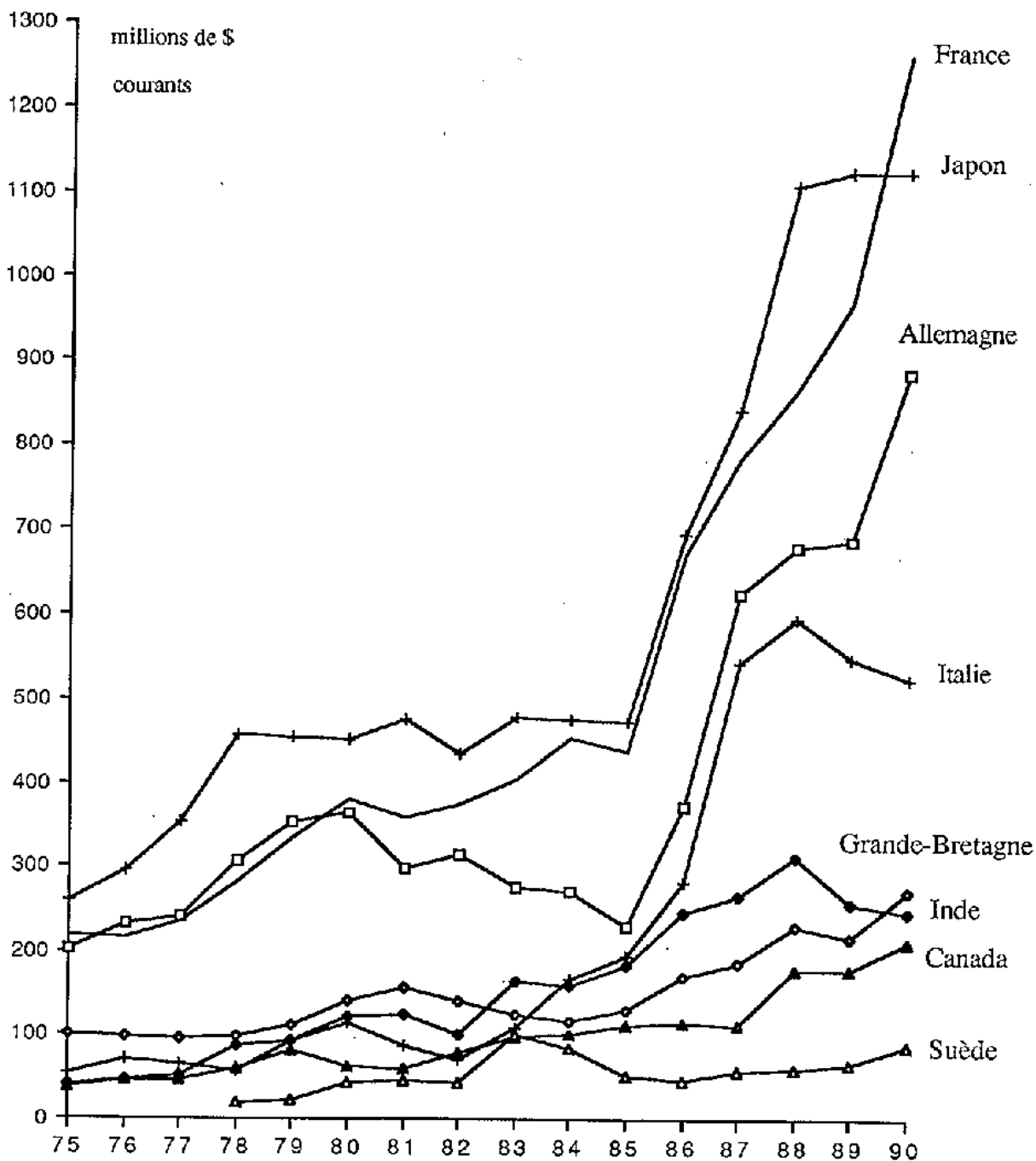
Entre ces deux extrêmes, les situations sont également très contrastées. Un survol très rapide des différentes situations nationales permet de mieux situer la place et le rôle très particulier joué par la France dans l'espace au niveau européen.

Allemagne : un effort accru mais contesté

Le budget spatial allemand s'est élevé pour 1990 à 1,42 milliard de DM dont près de 900 millions de contribution à l'ESA, soit un rapport de près de 2/3.

L'engagement accru dans les programmes européens depuis 1986 s'accompagne cependant d'une volonté de renforcement du programme national, avec en particulier des projets nouveaux tels que Atmos pour l'observation de l'environnement de la Terre et Sänger, lanceur à décollage horizontal, qui sont proposés ensuite à la coopération internationale. Par ailleurs, suite à la réunification, la DARA poursuit les programmes engagés par l'ex-RDA en coopération bilatérale avec l'URSS.

Evolution des budgets spatiaux civils des principaux pays européens, du Japon, du Canada et de l'Inde



hors ressources propres des agences

Source : base de données ECOSPACE d'Euroconsult

Données primaires : agences et organismes nationaux

Tableau n° 10

L'agence spatiale DARA, nouvellement instituée, prépare un plan spatial à horizon 2000 qui prévoit un total de ressources de 25 milliards de DM (hors Sängler) dont 16,1 prévus pour les programmes ESA, 7 milliards pour le programme national et 1,9 pour le DLR.

Ce plan devrait permettre de financer la participation allemande au développement des trois grands projets de l'ESA pour lesquels l'Allemagne s'était engagée à hauteur de 7,5 milliards de DM jusqu'à leur achèvement. La maîtrise d'œuvre du programme de station spatiale Columbus, suite à l'expérience acquise avec le laboratoire spatial Spacelab, devrait constituer le programme majeur de l'effort spatial allemand pour le début des années 90.

Cependant, dans un contexte d'économies budgétaires, de priorités nouvelles liées à la réunification, une limitation du coût du programme spatial et sa réorientation vers "l'espace utile" sont régulièrement évoquées, et des critiques se sont élevées contre le programme d'infrastructure et de vols habités, soutenues par le BMFT qui souhaite une réduction de 15 à 20% de la contribution allemande à l'ESA.

Grande Bretagne : budget limité, en reprise sur l'utilisation de l'observation de la Terre

A partir de 1986, la Grande-Bretagne a réduit fortement sa participation à l'ESA en décidant de ne contribuer à aucun des trois programmes majeurs (Ariane 5, Hermes, Columbus) d'ici à l'an 2000. Cependant le gouvernement britannique n'est pas resté sur une position aussi radicale puisqu'il a décidé en 1988 de participer à la phase de pré-développement de Columbus à hauteur de 5,5%. Pour 1990, sur un budget spatial civil de 152 millions de £ (+ 14,3%), 62 % sont affectés à l'ESA.

Entre 1985 et 1990, la contribution britannique à l'ESA est passée d'un niveau de 14% à 6,4%, ce qui place maintenant la Grande-Bretagne au quatrième rang des pays contributeurs, derrière la France, l'Allemagne et l'Italie.

Parallèlement, le gouvernement a accru son effort intérieur avec un doublement du budget national sur la même période pour atteindre 58 millions de £ en 1990.

Plus de la moitié de ce montant correspond au programme d'observation de la Terre, en croissance ces dernières années en particulier en ce qui concerne les activités au sol de traitement et de distribution de données. Dans les télécommunications spatiales, la Grande-Bretagne est en net retrait sur les programmes de l'ESA, contrastant avec son effort initial sur cette application. Par contre, le système de télécommunications spatiales du ministère britannique de la défense est le plus ancien en Europe et le seul qui exploite des satellites dédiés.

Italie : engagements croissants dans les programmes spatiaux européens

Le développement de l'activité spatiale de l'Italie s'est caractérisé par un engagement croissant dans les programmes de l'ESA, et dans des programmes nationaux, se traduisant par une croissance extrêmement rapide du budget spatial de 1982 à 1987, suivie d'une stabilisation et d'un légère décroissance.

En raison de son engagement sur les grands projets européens : Ariane 5, Hermes, Columbus, et satellite relais DRS dont elle a la maîtrise d'œuvre, l'Italie est devenue le troisième financeur

de l'ESA (14,8% des contributions nationales). En 1990, le budget spatial géré par l'Agence Spatiale Italienne (ASI), qui avait très fortement crû ces dernières années, est en réduction de 16 % à 630 milliards de liras, dont plus de 350 milliards de liras sont affectés aux programmes de l'ESA.

Le satellite national pré-opérationnel de télécommunications en bande Ka, Italsat, a été lancé début 1991, mais les réalisations nationales sont restées en retrait du fait de retards successifs dans leur engagement budgétaire et de l'indisponibilité de la navette spatiale américaine .

Dans les applications militaires, l'Italie participe au programme Helios à un niveau de 14% et étudie la construction d'un système de télécommunications par satellite (SICRAL).

Espagne : émergence de l'espace via les programmes européens

L'Espagne n'a réellement développé son effort spatial que depuis 1976, dans le cadre d'une participation plus active à l'ESA, presque exclusivement centrée sur le programme Ariane. Cette situation s'est modifiée au milieu des années 80 avec des prises de participation notables sur les grands programmes du triptyque européen, avec pour Columbus le plus haut niveau de contribution nationale après la France, l'Allemagne et l'Italie, soit 6%.

En 1990, le budget spatial civil géré par le centre de développement des technologies industrielles (CDTI) atteint près de 13 milliards de Pesetas dont 8,5 milliards pour l'ESA. La participation espagnole à l'ESA représente 4,1 % des contributions nationales en 1990.

Dans le domaine des applications, le gouvernement espagnol met en place un système de télécommunications/télédiffusion par satellite Hispasat, incluant des capacités militaires. Ce satellite est fourni par l'industrie européenne avec une participation espagnole de l'ordre de 30%. L'Espagne participe également au programme français de satellites d'observation Helios à hauteur de 7%.

L'essentiel de l'activité spatiale des petits pays européens concerne leur participation aux activités de l'ESA. Les Pays-Bas possèdent toutefois un important programme national scientifique, et la Suède possède également un programme national dans les télécommunications et l'observation avec une participation à SPOT.

Deux pays de la CEE, Le Portugal et la Grèce, ne sont cependant pas membres de l'ESA et n'ont pas de programmes nationaux dans le domaine spatial.

1.2.5 Le rôle leader et moteur de la France dans le développement des activités spatiales européennes

Le programme spatial français est actuellement le plus complet en Europe, dans pratiquement toutes ses composantes. La France a en effet à la fois la première contribution nationale à l'Agence Spatiale Européenne et le plus important programme spatial civil national et de coopération bilatérale.

Ceci se traduit par un effort budgétaire relatif, dans l'espace civil, double de la moyenne des autres pays européens.

Par ailleurs, la France possède le plus important programme spatial militaire en Europe.

Il est clair que l'espace a été géré jusqu'à présent par la France comme un lieu privilégié d'affirmation international de sa capacité scientifique, technologique et industrielle, qui s'est traduit par une priorité politique plus grande que celle qui lui a été donnée en Allemagne et a fortiori en Grande-Bretagne.

Cette place importante de l'espace est due à la fois

- à la tradition française de développement de grands programmes nationaux comme vecteurs de développement technologique,
- à un choix précoce de l'espace comme lieu privilégié d'affirmation technologique et politique d'indépendance nationale, avec création d'une puissante structure publique de développement dans ce secteur : le CNES (au même titre que le CEA dans le nucléaire),
- à ses choix politiques dans les domaines connexes, notamment politique de défense incluant des missiles intercontinentaux ayant fourni la base technologique pour les lanceurs,
- à sa structure industrielle marquée par des positions de force de la France dans les industries intervenant dans le domaine spatial, notamment aéronautique, propulsion, télécommunications, matériaux hautes performances.

Cette spécialisation technologique et industrielle relative doit bien sûr être mise en relation avec des faiblesses dans d'autres secteurs (électronique, composants, chimie fine etc.).

Allant de pair avec cette place privilégiée, le support politique et du grand public à l'espace est exceptionnel en France comparé aux autres pays. Le développement régulier du budget spatial a fait l'objet d'un soutien pratiquement unanime de tous les partis politiques au cours des 15 dernières années. Par ailleurs, les sondages d'opinion ont fait régulièrement ressortir un excellent soutien du grand public. Lors des enquêtes d'opinion réalisées à l'occasion des dernières présidentielles¹ l'espace est même ressorti comme un des rares domaines pour lesquels une majorité de français était prêt à payer plus d'impôts pour soutenir une politique plus ambitieuse. Les sondages les plus récents confirment ce soutien massif, avec toutefois un léger effritement (8 français sur 10 approuvant la politique spatiale de la France). Mais ce soutien va de pair avec des espoirs très importants concernant le rôle de l'espace au niveau du développement technologique, industriel et de l'emploi pour le futur².

¹ Cf. Sondage d'Antenne 2 préparatoire au débat entre les deux candidats aux présidentielles de 1988.

² Cf. Sondage commandité par la DGE mai 1991

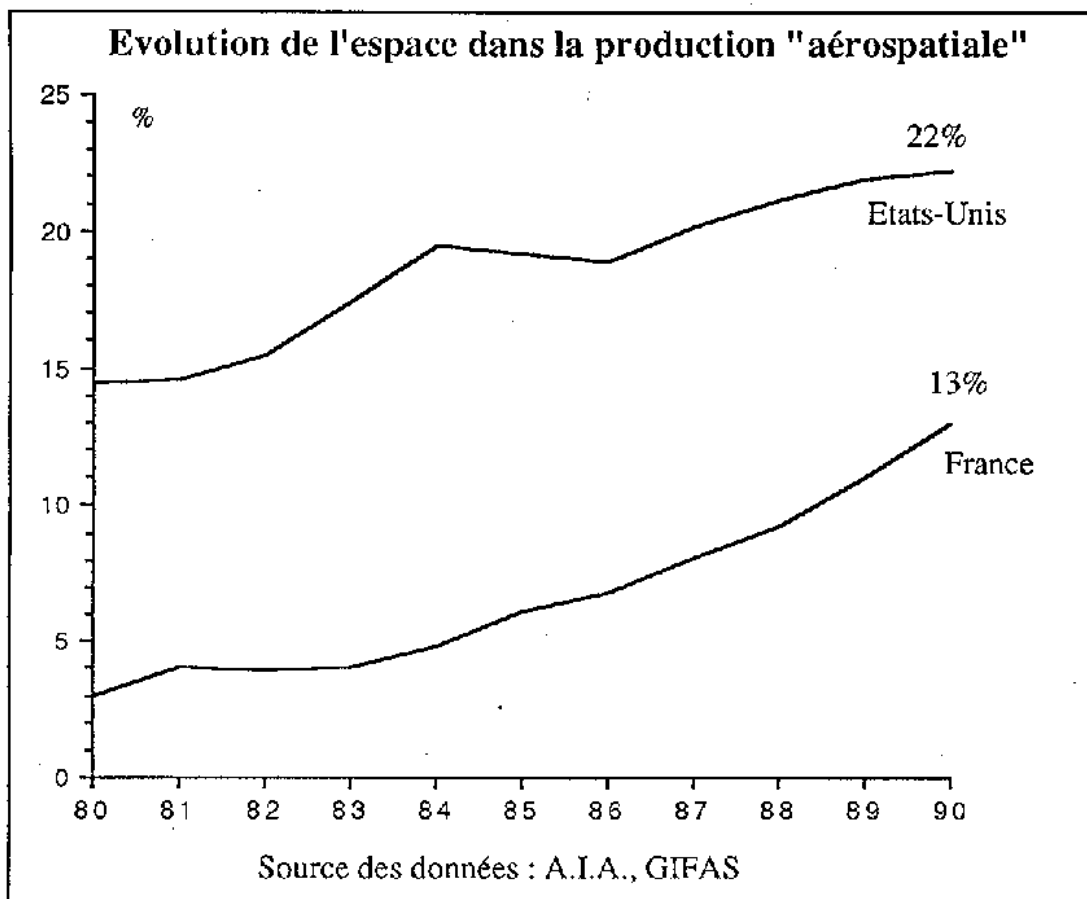


Tableau N° 11

La France a joué un rôle leader dans la définition des grands programmes européens, avec une spécialisation dans le domaine des lanceurs (Ariane) et dans l'observation de la Terre (Spot et Helios). Bien que les spécialisations intra-européennes retenues lors de la création de l'Agence Spatiale Européenne n'aient pas favorisé la France sur les télécommunications, elle a ravi à la Grande-Bretagne le leadership européen dans ce domaine également.

Pour 1991 le budget civil public est en croissance de 13% à 7,75 milliards de francs. Pour 1992, il doit progresser à 8,6 milliards de F, soit + 7,9% à périmètre comparable. La part du CNES progresse ainsi à près de 17% de la totalité du budget civil de la recherche et développement¹.

S'ajoutent à la subvention publique les ressources propres du CNES en forte augmentation ces dernières années (2,1 milliards en 1991), qui ont porté le total des ressources disponibles pour l'agence spatiale nationale à 9,8 milliards de francs en 1991. 43 % de ce total sont attribués aux programmes de l'ESA et 29 % à la réalisation du programme national et en coopération bilatérale. Le solde correspond au support fonctionnel des programmes et au fonctionnement du CNES.

¹ dans sa définition française, différente de celle de l'OCDE, qui est plus large

Le budget spatial militaire a connu une forte croissance ces dernières années (taux de croissance annuel moyen en valeur courante de 20% entre 1987 et 1991¹) en raison du développement du programme de satellite d'observation optique Helios dont le coût est estimé à 6,7 milliards de francs pour deux satellites. Pour 1991, le budget spatial militaire s'élève à 3,5 milliards de francs, dont 1 milliard est versé au CNES pour sa responsabilité de programme sur Helios.

1.3 Evolution de l'impact budgétaire des programmes spatiaux civils et perspectives à horizon de 10 ans

L'impact budgétaire des programmes spatiaux civils n'a cessé de s'accroître en France en valeur absolue et en valeur relative au cours des dix dernières années. Dans la définition normalisée de l'OCDE des dépenses civiles publiques de R&D, le poids de l'espace a progressé en France, de 8,2% en 1985 à 13% en 1990, soit actuellement près du double de l'effort relatif de l'Allemagne dans ce domaine (Cf. Tableau N°12). Dans la définition budgétaire française de "l'enveloppe civile de recherche", un peu plus restrictive que la définition OCDE car excluant les télécoms, le poids relatif de l'espace est encore plus important. Il a atteint 10% au milieu des années 80, et il a progressé depuis, pour atteindre 16,8% dans le budget 1992 (soit 8,6 milliards de F sur 51,1 milliards de F, et une croissance de +7,9% par rapport à 1991, contre +4,9% pour l'enveloppe recherche dans son ensemble).

L'engagement résolu de la France dans le futur programme européen tel que défini il y a 4 ans à La Haye devrait entraîner un effort financier accru. La contribution française au développement d'Ariane 5, Hermès et Columbus représentait une dépense initiale prévue de 35 milliards de francs (5 milliards d'ECU) (87) jusqu'à l'an 2000.

L'engagement de l'ensemble des programmes relatifs à l'autonomie européenne dans les vols habités, selon les plus récentes propositions de l'ESA (septembre 1991) retient le principe d'une croissance hors inflation du budget européen de +10% par an sur longue période. L'importance de l'implication française sur ces nouveaux programmes et la dynamique des programmes nationaux suppose une croissance au moins aussi importante du budget français, et même supérieure, comme cela a été le cas au cours des dix dernières années.

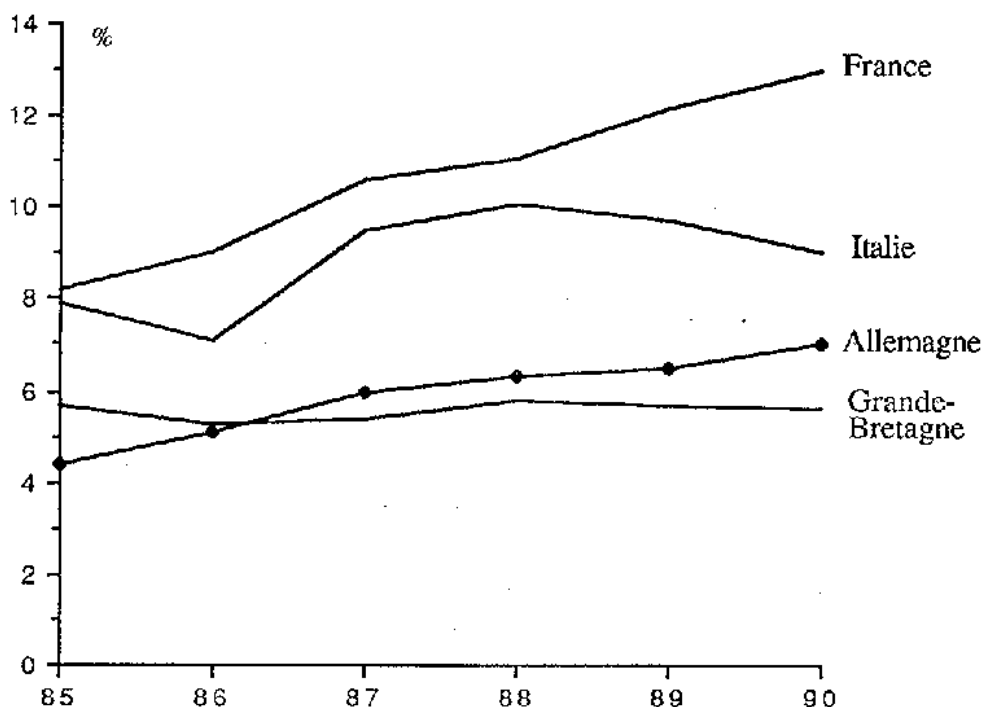
Sauf à retenir un taux de croissance de l'ensemble des dépenses publiques civiles de R&D supérieur à 10% hors inflation de façon continue, ce qui est budgétairement irréaliste, cela signifie une poursuite de la progression du poids relatif de l'espace de 16,8% de l'enveloppe civile de recherche vers une fourchette de 21 à 23 %, c'est-à-dire comparable au niveau atteint actuellement aux Etats-Unis (21,2% en 1989 et 23,3% en 1990 dans la définition OCDE).

Cette évaluation suppose pour le moins une continuité du poids relatif de l'Etat dans la redistribution des crédits de R&D industrielle. Mais il convient de rappeler que la France est déjà parmi les grands pays de l'OCDE celui où les prélèvements obligatoires sont les plus importants, de même que le poids de l'Etat dans le financement de la R&D (50% des dépenses de R&D, contre 33% en Allemagne et 20% au Japon en norme OCDE). Or la tendance internationale actuelle est à une stabilisation voire une réduction des prélèvements obligatoires. Par ailleurs, concernant les Etats les plus interventionnistes dans le choix et le financement des programmes de R&D, la tendance est à se rapprocher des modèles allemand et japonais de moindre intervention publique et d'un rôle plus important donné aux groupes industriels. C'est

¹ des autorisations de programmes

à dire qu'il n'existe a priori aucune marge de manœuvre concernant une expansion du budget public de R&D de référence à un taux plus rapide que ce qui est demandé dans l'espace.

Evolution du poids de l'espace civil dans les crédits budgétaires publics de R&D* des grands pays européens



* données standardisées selon les normes OCDE, estimations Euroconsult pour la France et l'Italie en 1990

Source des données : OCDE/DISTI

Tableau N° 12

Il est évident qu'en comparaison avec l'ensemble des autres secteurs économiques, les niveaux de financement public de l'espace civil déjà atteints et bien plus encore ceux qui sont proposés dans le cadre global du passage à l'autonomie dans les vols habités correspondent à un effort extrêmement important, sans équivalent dans les autres pays européens, qui doit être mis en relation avec les enjeux réels qui y sont associés.

Partie 2 - Evaluation de l'impact économique en rapport avec les moyens affectés

2-1 L'impact économique du développement spatial

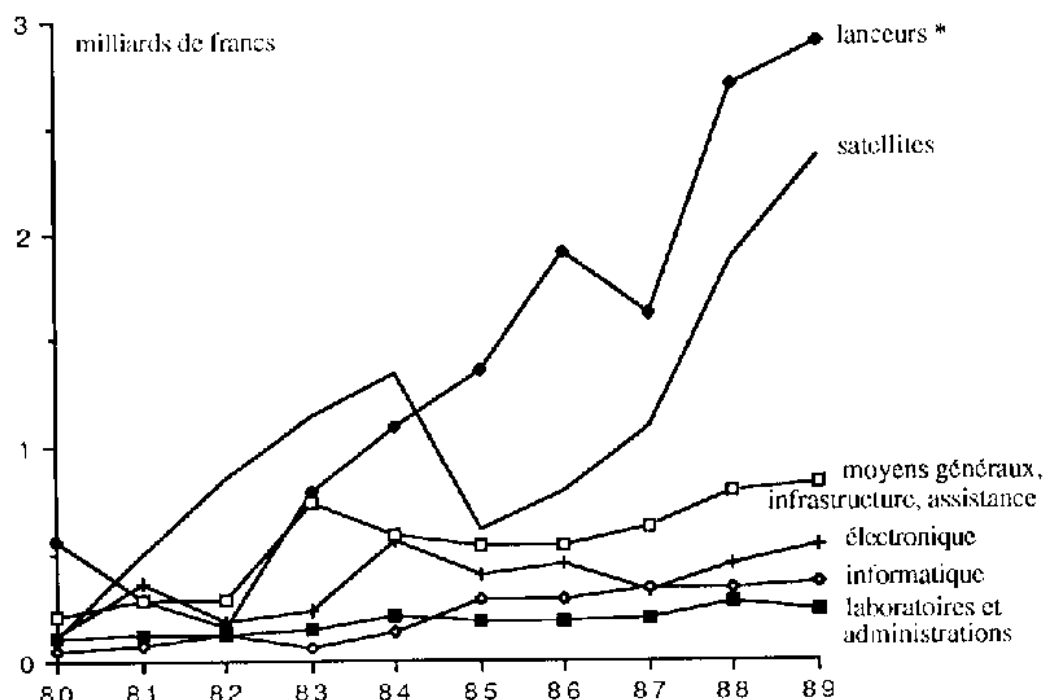
L'impact économique des budgets publics affectés à l'espace peut être appréhendé à plusieurs niveaux:

- impact direct des contrats d'Agences
- effet d'entraînement sur les marchés d'applications
- effet induit sur les industries en aval, en amont et en périphérie
- impact économique et social des services fournis.

• l'impact économique direct des contrats d'Agences

Le budget spatial public proprement dit se traduit par une activité économique directe au niveau de l'activité des agences spatiales elles mêmes, CNES et ESA (au prorata de la participation française), et à celui des entreprises bénéficiaires des contrats passés par ces agences.

Répartition par domaine industriel des contrats passés par le CNES et l'ESA à l'industrie française



* développement et lancements

Source des données : CNES/Politique Industrielle

Tableau N°13

Ces contrats industriels¹ d'agences concernent majoritairement l'industrie spatiale proprement dite (développement et production de lanceurs et de satellites, et tous les composants et équipements correspondants), mais également d'autres secteurs industriels, comme le génie civil et l'ingénierie (pour la construction des bases de lancement), l'informatique (pour les moyens de calcul au sol), les produits chimiques (carburants d'Ariane par ex.) etc².

L'évolution de cette activité économique directe est bien sûr liée à celle des budgets publics correspondants, et les contrats industriels passés par le CNES et l'Agence Spatiale Européenne se sont régulièrement développés avec l'accroissement du budget spatial national et de la participation française au budget de l'Agence Spatiale Européenne (Cf. **Tableau N° 13**).

• l'effet d'entraînement sur les marchés d'applications

A l'activité économique et industrielle engendrée par le budget des agences spatiales, s'ajoute l'activité correspondant au développement des marchés d'applications.

Les marchés d'applications, gérés par des opérateurs publics nationaux et internationaux (France Télécom, Eutelsat, Eumetsat, Intelsat) ou privés (opérateurs de télécommunications) fournissent une activité industrielle, financée sur leur budget d'équipement et amortie par l'exploitation du système. Il s'agit donc d'une activité économique autonome et récurrente, compte tenu du renouvellement des satellites nécessaires à l'exploitation d'un système. Cette activité économique n'est pas, contrairement aux budgets d'Agences, supportée par le budget de l'Etat, même si les clients sont fréquemment des sociétés publiques.

Cette activité économique est entraînée par les budgets d'application des agences en ce sens que ceux-ci ont permis de financer le développement des systèmes expérimentaux et de prouver leur efficacité avant que le relais ne soit pris par les opérateurs. Passée cette phase expérimentale, elle se développe de plus en plus dans une logique propre.

Le financement par les agences de systèmes expérimentaux, s'il est indispensable au développement de cette activité commerciale, est suffisant pour assurer son expansion. Celle-ci nécessite en effet une très bonne adaptation des produits développés aux besoins du marché et un secteur industriel puissant et compétitif susceptible d'assurer l'industrialisation de la production et sa commercialisation sur le marché international face aux industries américaine et japonaise. Progressivement, la logique de développement interne au nouveau secteur ainsi créé devient dominante, comme cela peut être constaté dans le cas des systèmes classiques de télécommunications spatiales. Le développement de nouveaux programmes expérimentaux par les agences spatiales contribue alors d'autant plus au développement du marché commercial qu'ils interviennent en soutien de l'industrie et sont conçus en bonne relation avec celle-ci et en connaissance des besoins du marché.

La bonne gestion du transfert progressif des applications spatiales des agences qui les ont initiées vers des opérateurs publics ou privés est un élément déterminant du développement économique optimal de l'industrie spatiale. Mais il ne s'agit pas d'un processus aisé.

¹ Le terme industriel est employé dans cette analyse dans son sens large, incluant les services, par opposition à l'activité des administrations et établissements publics

² Cette activité industrielle réelle générée par les agences dans toute une série de secteurs ne se retrouve pas dans le chiffre d'affaires de l'industrie spatiale proprement dite.

- En premier lieu, il est difficile d'estimer à quel moment un système d'application peut être considéré comme suffisamment mûr pour être pris en charge par le marché, cette prise en charge ne pouvant être que progressive (amortissement de la seule exploitation, puis de la construction, et enfin des coûts de développement).

- En second lieu, certaines applications recourent totalement ou partiellement une notion de service public. Si leur efficacité économique est incontestable en ce qui concerne les services finaux qu'ils fournissent (données météorologiques ou d'environnement de la Terre par ex.), une exploitation commerciale profitable du système spatial lui-même n'est pas toujours possible (cas de la météorologie et des satellites d'observation de la Terre pour encore de nombreuses années).

Les risques observés sont triples

- Un dégageant trop rapide des agences spatiales d'une application non encore totalement démontrée et dont le développement autonome n'est pas encore bien engagé se traduit par une marginalisation de l'activité correspondante et donc la perte des potentialités économiques industrielles et commerciales liées et un terrain laissé libre à la concurrence.

- A l'inverse, le maintien de la prise en charge à l'intérieur des agences d'applications suffisamment mûres est également un frein à leur développement, par rapport à une gestion plus commerciale, par un opérateur plus proche des besoins du marché.

- Enfin, la promotion de nouveaux systèmes d'applications spatiales par les agences peut se faire en concurrence de systèmes spatiaux et non spatiaux gérés et promus par les spécialistes des secteurs d'applications concernées. Ceci peut se solder par leur abandon ou leur soutien artificiel et se traduit alors par des pertes importantes d'investissements publics.

Dans le cas européen, l'implication des agences dans le développement et la promotion des applications spatiales, et ensuite dans le transfert aux opérateurs et le support à leur expansion a été plutôt mieux gérée qu'aux Etats-Unis au cours de la décennie écoulée.

Au niveau français, cette relation agence spatiale - nouveau secteur d'application a fait l'objet d'un mode de gestion tout à fait spécifique, avec création de filiales industrielles et commerciales en liaison avec les industriels concernés. Cette politique a été extrêmement efficace dans les secteurs totalement neufs où n'existait pas d'industrie structurée, comme les lanceurs ou l'observation de la Terre. Ainsi, Arianespace (environ 60% du marché mondial des lancements commerciaux) et Spot Image (environ 50% du marché mondial des ventes de données satellites) constituent chacune dans leur domaine des références d'efficacité de la gestion de ce transfert, plus ou moins copiées ensuite aux Etats-Unis et au Japon.

L'optimum a été atteint en ce qui concerne les lanceurs, avec le bon relais entre les agences - CNES et ESA - et la société Arianespace. Globalement, les 2 milliards d'ECUs de développement des Arianes 1 à 4 auront entraîné environ 10 milliards d'ECUs de contrats de lancement (à plus de 85% pour des clients autres que les agences, et à plus de 50% pour des clients hors Europe), ceci pour une centaine de lanceurs. Ce succès résulte toutefois d'un ensemble de facteurs de compétitivité liés non seulement aux budgets de R&D, mais aussi à la structure industrielle, au mode de gestion, au système commercial et à une bonne adaptation aux besoins du marché (Cf. tableau ci-dessous)

Les facteurs clefs de compétitivité d'Arianespace sur le marché des lancements spatiaux

Structure industrielle : organisation permanente et intégrée, non duplication des compétences industrielles en Europe, absence de concurrence intra-européenne, séries produites égales ou supérieures aux concurrents

Relation à la R&D : relation directe et cohérente entre R&D (agences), production (maîtres d'œuvre) et commercialisation (Arianespace)

Management, financement : gestion commerciale et industrielle du programme, base solide de capital permanent, formule dynamique d'assurance

Capacité commerciale : bonne adaptation de base aux besoins du marché, et adaptations spécifiques par la modularité, couvrant pratiquement tous les marchés, réseaux permanents de ventes et de suivi commercial en Europe, aux États-Unis et au Japon, bonne approche fonctionnelle du marché (placement direct très précis en orbite géostationnaire), délais courts de lancement permis par la capacité d'emport et de tir, formule avantageuse du lancement double

Avantage spécifique : base de Kourou très proche de l'équateur donnant un avantage de poids et/ou de durée de vie par rapport aux autres pas de tirs

en résultante de ces différents facteurs : coûts maîtrisés et prix attractifs

extrait de "The Competitiveness of the European Space Industry" ESTEC janvier 1991

Par contre, le transfert s'est beaucoup moins bien fait dans les domaines où existait un secteur déjà bien organisé, comme les télécommunications, où les solutions promues par les agences spatiales, parfois définies sans prise en compte suffisante des besoins réels du marché ont été souvent isolées et combattues par les acteurs du secteur (sociétés de télécoms et opérateurs) non associés aux choix et promoteurs de solutions alternatives. Ainsi les projets de satellites de télédiffusion directe haute puissance TDF / TVSat ou de radiolocalisation Locstar ont débouché sur des échecs, et les systèmes plus classiques, Eutelsat et les satellites des systèmes nationaux, comme Télécom 1 en France ou Kopernicus en Allemagne n'ont pas empêché la création d'un système alternatif en Europe (Astra) à partir de satellites américains bien adaptés aux besoins de télédiffusion de programmes TV.

Au-delà des activités purement industrielles, la solution française consistant à multiplier les mini-filiales d'Agence dans tous les domaines potentiels de services fournis par les systèmes spatiaux n'a pas que des effets positifs sur l'expansion du secteur spatial quand existe une offre potentielle alternative du secteur concurrentiel.

Les sociétés compétitives spécialisées dans les services, qui seraient en mesure d'intégrer les solutions spatiales dans leur offre, sont parfois découragées du fait de la concurrence de ces structures para-publiques qui vivent essentiellement du marché de promotion financé par les agences elles-mêmes et des premiers marchés d'applications qui proviennent en premier lieu du secteur public. Privées de ce marché de base, il leur est alors difficile d'aborder directement les marchés commerciaux et à l'export. D'où les critiques d'entreprises privées, notamment de services, qui ressentent souvent l'espace comme un secteur fermé sur lui-même et protégé¹.

¹ Cf. par ex. recommandations relatives à l'étude "Earth Observation Data Processing..." op cit. "ne pas étouffer le secteur privé" p.54. Ce problème existe aussi aux États-Unis, essentiellement par rapport à la NASA elle-même : Cf. *Encouraging Private Investment in Space Activities*, Congress of the United States, Congressional Budget Office février 1991.

Le développement de programmes expérimentaux d'applications par les agences est absolument indispensable pour soutenir la croissance de l'industrie spatiale et des activités industrielles et commerciales qui en découlent en aval. Toutefois, ce soutien n'est vraiment efficace dans l'aide à l'expansion économique du secteur d'applications concerné que s'il y a coopération étroite avec des acteurs industriels et des opérateurs clés susceptibles de transformer ces programmes en produits et services compétitifs, et transfert précoce des responsabilités industrielles et commerciales vers le secteur concurrentiel.

Il s'agit là d'une tâche ingrate pour les agences qui doivent s'ouvrir à des préoccupations extérieures et intervenir en support d'entreprises industrielles et commerciales plutôt que de définir des programmes propres à forte visibilité politique à partir de critères de pur défi technique. Elle est pourtant fondamentale pour qu'il y ait succès industriel et commercial au-delà des seuls programmes d'Agences qui sans cela restent des premières technologiques sans lendemain.

- télécommunications

Compte tenu des nombreux programmes de satellites expérimentaux, préopérationnels et opérationnels développés par les agences spatiales en Europe ou avec leur soutien (Symphonic, OTS, Sirio, ECS, MARECS, Olympus, Telecom 1, Kopernicus, Italsat), les positions acquises par l'industrie européenne dans ce domaine ne sont pas très bonnes, avec une part significative du marché européen fourni par l'industrie américaine (ASTRA et BSB) et des positions très fragiles à l'exportation hors Europe. Cette situation est bien loin d'être de la seule responsabilité des agences spatiales. Elle est en grande partie liée à la fragmentation excessive du marché européen des télécommunications spatiales et aux concurrences inter-étatiques dans ce domaine dont découle une structure industrielle également fragmentée.

Du fait des positions insuffisantes et encore très fragiles de l'industrie européenne dans le domaine des satellites de télécommunications, et de sa grande faiblesse au niveau aval du segment sol (Cf. plus loin), il existe un risque important de perte de terrain face à l'industrie américaine dominante et à l'industrie japonaise qui progresse rapidement par les composants et les systèmes. Compte tenu de l'évolution technologique rapide dans ce domaine et du champ encore très vaste d'application des télécommunications spatiales, les besoins de R&D de l'industrie européenne (au sein de laquelle la France est leader) restent très importants.

La poursuite du désengagement des agences dans ce domaine serait très grave car il n'existe actuellement pratiquement pas de financement alternatif pour l'industrie européenne contrairement à l'industrie américaine, qui bénéficie d'un support considérable de crédits de R&D militaire et de synergies entre production civile et militaire, et à l'industrie japonaise qui s'étend dans ce domaine à partir de positions dominantes dans l'électronique, les composants et les télécommunications.

Or, l'essentiel de la bataille industrielle et commerciale dans le domaine spatial se joue sur les télécommunications. Il s'agit de loin du plus grand marché d'applications, qui pèse actuellement pratiquement autant que les marchés d'agences et qui est la partie la plus concurrentielle du marché. C'est ce marché qui justifie les importantes restructurations industrielles en cours et qui structure les principales alliances : regroupement de Matra et Marconi; participation dans Loral Space Systems d'Aérospatiale-Alcatel-Alenia-MBB; regroupements entre constructeurs américains et européens dans les grands projets de télécommunications mobiles de Motorola (Iridium) et de Qualcomm (Globalstar) etc.. Par ailleurs, les télécommunications constituent le

marché de base des lancements commerciaux : plus des 3/4 des tirs d'Ariane concernent le lancements de satellites de télécommunications.

- observation de la Terre

Le domaine de l'observation de la Terre et des applications qui en découlent concernent l'analyse du climat, le suivi et le contrôle de la pollution, la gestion des ressources terrestres, l'aide à l'agriculture, l'aménagement du territoire, la géologie, la cartographie, l'hydrologie, l'océanographie et toute une série d'autres domaines.

Les problèmes liés à l'environnement, au contrôle de la pollution et à la gestion des ressources naturelles sont des sujets d'intérêt politique croissant et à très forte demande sociale. Ils représentent des opportunités exceptionnelles de développement de nouveaux programmes d'applications spatiales, notamment dans le cadre du projet international d'analyse des changements globaux affectant la planète "Global Change". La technologie spatiale est en effet la seule susceptible de fournir des moyens d'analyse et de compréhension des phénomènes au niveau de la planète, de suivi des problèmes et de contrôle global des mesures pouvant être prises.

L'essentiel du marché actuel et prévisible concernant l'utilisation des données d'observation de la Terre se situe dans l'ensemble du secteur public, allant des organisations internationales aux collectivités locales, en passant par les administrations nationales. En découlent des problèmes d'organisation publique du développement de cette activité¹, et dans l'immédiat, une tendance à la réorientation des programmes spatiaux vers les préoccupations "terrestres" et plus généralement vers l'espace "utile" que traduit bien le concept américain de "Mission to Planet Earth". Le comité Augustine aux Etats-Unis réclame que ces préoccupations soient prioritaires par rapport aux programmes de conquête de l'espace à partir de la Terre "Mission from Planet Earth"². Cette réorientation est évoquée en Europe mais elle n'intervient qu'en second rang dans les priorités des agences spatiales après le développement d'une autonomie dans les vols habités.

Il s'agit là d'un secteur extrêmement porteur de développement économique des applications spatiales. Mais plus encore que les télécommunications, l'observation de la Terre nécessitera de mettre la technologie spatiale au service d'utilisateurs potentiels de nature très différente qui devront progressivement se l'approprier, ce qui suppose un travail de promotion et d'adaptation des nouveaux systèmes aux besoins de nombreux acteurs qui ne sont pas encore en mesure d'en financer le développement.

Le rôle des agences reste déterminant pour les années à venir. Il concerne le financement des systèmes expérimentaux et opérationnels en phase de démarrage, leur adaptation à un marché extrêmement divers et le soutien à l'ensemble de la chaîne de valeur ajoutée intervenant en aval des données d'observation de la Terre. La concurrence internationale dans ce secteur, venant des Etats-Unis, qui après un désengagement public trop précoce reviennent en force, et du Japon qui en fait un axe prioritaire, est extrêmement dure sur l'ensemble de la filière allant du matériel spatial aux services fournis aux utilisateurs finaux. L'essentiel du marché se situe en aval de la fourniture des données satellites (Cf ci-après les effets induits).

¹ Cf. *Earth observation data processing and interpretation services : analysis of the sector and the conditions for its development* Commission of the European Communities DG XII Bruxelles Juin 1991

² Mission vers la planète Terre, par rapport aux missions à partir de la planète Terre

L'ensemble des applications liées à l'observation de la Terre et à la télédétection n'en sont qu'en phase préliminaire de développement avec des perspectives importantes dans de nombreux secteurs, dont ceux de la maîtrise de la connaissance de l'environnement et du contrôle de la pollution, qui correspondent à une très forte demande sociale. Mais les investissements restant à réaliser sont considérables, tant au niveau spatial qu'à celui des moyens de stockage, distribution, traitement et interprétation des données. Un travail important d'adaptation de cette technologie à tous les secteurs potentiellement utilisateurs est également à réaliser. Le rôle des agences reste à ce niveau déterminant.

- microgravité

La très faible pesanteur existant dans les véhicules spatiaux en orbite présente un intérêt scientifique évident pour différentes disciplines : physique des fluides, transitions de phases, cristallisation, biochimie... et de nombreuses expériences ont été réalisées ou sont programmées sur les années à venir par les agences qui y consacrent des budgets croissants.

Il est actuellement beaucoup trop tôt pour envisager une prise de relais par le marché, car de nombreux facteurs relatifs à la viabilité technique, opérationnelle et commerciale des applications envisagées ne sont pas encore maîtrisés. A l'horizon de 10 ans retenu pour cette analyse, les travaux de recherche et d'approfondissement sur la microgravité, les outils permettant de travailler dans cet environnement et les nombreuses expériences et itérations nécessaires devront être pris en charge par les agences spatiales¹.

Il s'agit là de travaux de recherche à très long terme, dont l'intérêt scientifique est évident, mais dont il est encore beaucoup trop tôt pour savoir s'ils déboucheront sur un marché significatif d'expérimentation réellement commerciale, voire au-delà de production.

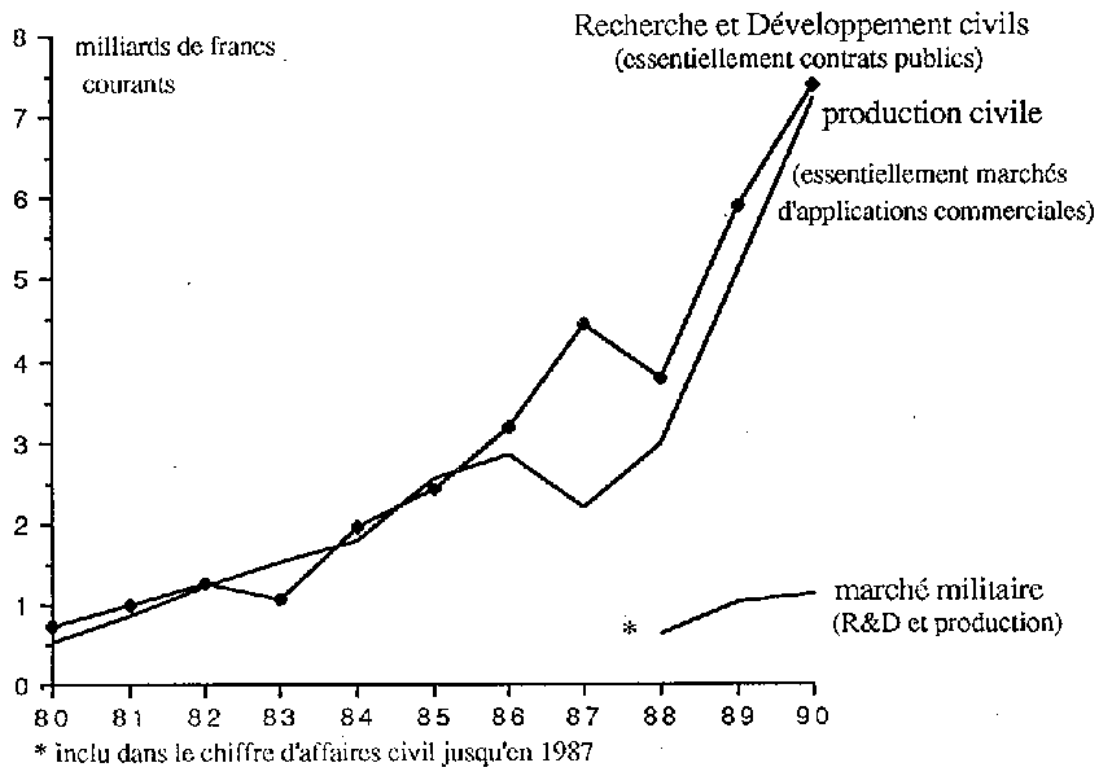
Actuellement, pour l'industrie spatiale française, les applications civiles, qui concernent pratiquement à 100 % les télécommunications² représentent un marché comparable en valeur et croissant sensiblement au même rythme que les contrats d'Agences (Cf. **Tableau N° 14**). S'y ajoute le marché des applications militaires, touchant jusqu'à présent les télécommunications et l'observation, encore relativement peu important mais aux perspectives d'expansion rapide³. Cette situation est extrêmement différente de celle des Etats-Unis, où le principal marché concerne les applications militaires, et où le marché des contrats publics d'agences est en déclin (Cf. **Tableau N° 7**).

¹ Cf. *Le développement des programmes de microgravité aux Etats-Unis, en Europe et au Japon, évolution des programmes depuis l'origine, bilan et perspectives à horizon de 10 ans*. CCE DG XII août 1988

² Les satellites d'observation de la Terre sont actuellement financés sur budgets d'agences.

³ le relativement faible niveau du marché militaire par rapport au marché civil est lié pour une part à l'importance des équipements sols de réception de télécommunications du programme Syracuse, qui ne sont pas comptabilisés dans la production "spatiale", et au fait qu'aucun lancement n'est pris en compte dans les trois années indiquées

Evolution de la production spatiale française par marché



Source des données : GIFAS

Tableau N° 14

• l'effet induit sur les secteurs en aval, en amont et en périphérie

Au-delà de l'activité spatiale stricto-sensu liée aux programmes d'Agences et aux applications civiles et militaires, le développement des programmes spatiaux a un effet d'entraînement sur le développement d'activités économiques en aval, en amont et en périphérie.

l'effet d'entraînement en aval

L'essentiel de cet effet d'entraînement porte sur l'aval, principalement au niveau des équipements sol nécessaires aux utilisateurs des systèmes d'applications spatiales.

Pour la principale application commerciale que sont les télécommunications spatiales, le marché des équipements sol des utilisateurs de satellites est en croissance exponentielle. Il concerne toute une série d'équipements allant des grandes antennes reliées au système international Intelsat aux petites stations à antenne parabolique permettant de recevoir la télévision à domicile, en passant par des terminaux spécialisés pour les réseaux privés d'entreprises (VSAT) ou les liaisons avec les navires et les mobiles terrestres. Au fur et à mesure que l'utilisation des télécommunications spatiales s'accroît pour de nouveaux usages, ces équipements concernent de plus en plus d'utilisateurs finaux : entreprises et individus. De ce fait, le poids relatif du marché des équipements sol devient de plus en plus important par rapport à celui de l'équipement spatial. Pour la décennie à venir, concernant les télécommunications spatiales

civiles, le marché mondial des équipements d'utilisation au sol est estimé à 5 fois celui des satellites eux-mêmes¹.

En ce qui concerne les télécommunications spatiales, principal marché civil d'application, les positions de l'industrie européenne sur le marché mondial sont beaucoup moins bonnes sur l'aval que sur les matériels spatiaux proprement dits, lanceurs et satellites (Cf. ci-dessous²).

Enjeux économiques et positions européennes sur les différents segments industriels des télécommunications spatiales³

Marché	part actuelle du marché mondial détenue par les européens	enjeu pour la décennie à venir (en milliards de \$)
lancements	60 %	9 à 13
satellites	25 %	12 à 15
stations sol (tous types)	12 %	48 à 72

Au delà de l'activité industrielle proprement dite, les systèmes de télécommunications spatiales entraînent la fourniture de services par les opérateurs. La valeur de ces revenus d'opération représentent annuellement environ 75 % de celle des satellites mis en orbite (satellites + lancements), soit environ 400 millions d'ECUs en Europe en 1990, et au niveau mondial un enjeu de 15 à 20 milliards de \$ pour la décennie à venir.

Si les télécommunications spatiales représentent de loin le principal marché d'applications spatiales, il convient toutefois de le relativiser dans l'ensemble du marché des télécommunications. En termes de ventes de matériels, les satellites de télécommunications (incluant les lancements) représentent actuellement un peu moins de 1% du marché total des équipements de télécommunications. En incluant tous les équipements sols utilisateurs, la valeur approche 2,5 %. Si les systèmes de télécommunications globales par satellite actuellement projetés (de type Globalstar et Iridium) arrivent effectivement sur le marché et que la télédiffusion directe par satellite s'impose, parallèlement à l'extension des réseaux privés de VSAT, cette part pourrait progresser à 5 % du marché des télécommunications à horizon de la fin du siècle, dont 1,5 % pour le segment spatial. Il est à noter que ce développement quantitatif va de pair avec une évolution qualitative, les nouveaux systèmes de télécommunications spatiales n'étant plus limités à un rôle passif de transmission mais intervenant au cœur des réseaux à valeur ajoutée et des services les plus innovants du marché des télécommunications.

Pour l'application d'observation de la Terre, qui se situe à un stade beaucoup moins avancé de maturité, se développe également très rapidement en aval un secteur de vente, de traitement et d'interprétation des données fournies par les satellites. Ainsi, pour 1989 en Europe, un chiffre d'affaires de ventes de données de satellites d'observation de la Terre d'environ 20 millions d'ECUs a entraîné un chiffre d'affaires trois fois plus important en vente d'équipements et de

¹ Cf. *The Space Communication User Earth Segment Market : Issues for European Industry* ESTEC September 1991

² Réf. idem précédente et *The Competitiveness of the European Space Industry* ESA / ESTEC Janvier 1991

³ Source : *World Space Industry Survey, Ten Year Outlook* EC sept 1991 et *The Space Communication User/Earth Segment Market, Issues for European Industry* ESTEC sept 1991

systèmes de traitement, et dix fois plus important en services de traitement et d'interprétation¹, soit au total près de 300 millions d'Ecus, avec un taux de croissance global du secteur de 30% par an.

Plus encore que pour le marché des satellites d'applications eux-mêmes, le développement des activités économiques en aval des applications spatiales n'est pas directement lié à celui des programmes des agences spatiales. Celles-ci ne les prennent que peu en compte, les considérant comme à la marge ou en dehors de leur domaine de responsabilité. De fait, si cette activité industrielle est née des possibilités de la technologie spatiale, elle se développe essentiellement de façon autonome. Les secteurs industriels concernés ne sont généralement pas les mêmes que ceux travaillant sur les satellites, bien que certaines entreprises aient des stratégies de positionnement amont-aval. Les conditions techniques, industrielles et commerciales de l'efficacité concurrentielle sont différentes de celles du segment spatial.

Ainsi, malgré sa faiblesse sur les satellites eux-mêmes, l'industrie japonaise est en position de leadership mondial sur les stations sol de télécommunications spatiales de toutes natures, et progresse très rapidement sur le marché des équipements périphériques pour le traitement de données et d'images d'observation de la Terre (écrans haute définition, imprimantes couleur haute définition, support de stockage des données etc.).

De même, l'industrie américaine est dominante techniquement et industriellement en Europe sur les stations de télécommunications d'entreprise, bien que les satellites soient fournis par l'industrie européenne. Elle domine également très largement le secteur des logiciels de traitement de données de satellites d'observation de la Terre, même quand ces derniers sont européens.

l'effet d'entraînement en amont et en périphérie

Les consommations intermédiaires du secteur spatial ont un effet d'entraînement sur les industries qui le fournissent, que ce soit en amont, au niveau des composants et matières de base utilisés par le secteur, ou en périphérie, au niveau de systèmes et équipements fournis par des industries spécialisées, telles que l'instrumentation scientifique, l'électronique de bord, la génération et le conditionnement d'énergie, les logiciels, les moyens de tests et d'essais. La valeur ajoutée de l'industrie spatiale étant de l'ordre de 50% du chiffre d'affaires, environ moitié de celui-ci provient donc des industries en amont et en périphérie. Bien sûr, comme pour l'aval, la relation fournisseur - client est ouverte et il n'y a pas d'effet d'entraînement automatique.

Dans la plupart des cas, le secteur spatial se procure en amont des composants et éléments déjà existants, de très haute qualité et fiabilité, dont il assure la "spatialisation" et l'intégration dans les produits spatiaux, lanceurs, satellites et infrastructure orbitale. Il s'agit toutefois rarement des technologies les plus avancées, car la multiplication des risques liés à l'environnement spatial et la nécessité d'autonomie du système pendant de longues années sans réparation ne permettent pas d'utiliser des technologies non encore totalement maîtrisées et qualifiées.

De ce fait, le secteur spatial finance très peu de technologies génériques, mais limite ses dépenses de recherches et technologies de base aux besoins extrêmement spécifiques qu'il

¹ Cf. *Le traitement et l'interprétation de données d'observation de la terre : analyse du secteur et conditions de son développement* CCE DG XII Mai 1991

rencontre. Les budgets des agences consacrés à la recherche et à la technologie de base, hors programmes sont très limités : 2,2% du budget de la NASA, 3,6 % du budget du CNES. Ils sont focalisés sur des problèmes techniques spécifiques aux programmes spatiaux (propulsion, matériaux aux propriétés particulières, stockage d'énergie sur satellite, robotique spatiale etc.). Ils ne permettent pas de faire des avancées technologiques de base significatives en dehors des spécifications spatiales. Ceci signifie que quand l'industrie nationale n'est pas en mesure de fournir les composants et éléments clefs de base nécessaires, ceux-ci sont importés, essentiellement des Etats-Unis et du Japon, la part de ce pays croissant très rapidement pour ce qui est des composants et équipements électroniques¹.

En ce qui concerne les systèmes et équipements spécialement adaptés aux besoins spatiaux, leur développement initial est financé par les contrats d'Agence. Ils sont ensuite utilisés sur les satellites d'applications, qui peuvent eux-mêmes justifier le financement de nouveaux équipements sur fonds propres ou avec aide publique des agences ou de clients institutionnels. Toutefois, certains équipements très spécialisés ou sophistiqués sont achetés directement aux Etats-Unis si les coûts et délais de développement sont rédhibitoires par rapport aux besoins européens.

Un problème de base peut être observé, qui concerne la réticence des maîtres d'œuvres spatiaux à utiliser pour leurs programmes commerciaux des composants et équipements européens développés sur crédits d'Agence spatiale. Ces équipements sont jugés souvent trop coûteux, disponibles dans des délais trop longs, non qualifiés en vol où n'ayant pas fait la preuve de leur fiabilité en orbite sur longue période².

Il n'existe pas de données statistiques précises disponibles sur la part des importations et leur évolution dans les consommations intermédiaires du secteur spatial. Des analyses faites sur des problèmes spécifiques, comme celui des composants électroniques ou au niveau de programmes particuliers tels que les satellites de télécommunications, donnent une estimation de l'ordre d'un cinquième des approvisionnements, soit environ 10% du chiffre d'affaires, avec une tendance à une perte de terrain de l'offre européenne par rapport aux Etats-Unis et au Japon.

L'effet d'entraînement sur les industries en amont de l'activité spatiale ne doit donc pas être surestimé. Les besoins quantitatifs des programmes spatiaux sont peu importants pour des exigences qualitatives extrêmes et spécifiques. L'industrie spatiale représente un marché insignifiant en pourcentage du chiffre d'affaires des industries des matériaux, des composants électroniques, des logiciels, c'est-à-dire dans tous les cas, moins de 1%. Si l'on se limite aux matériaux et aux composants de très hautes performances, cette part est un peu plus significative, mais jamais plus de quelques %.

Ce marché réduit, spécifique et exigeant profite aux fournisseurs qui dans leur champ technologique sont déjà à la pointe de la technique ou à des fournisseurs totalement spécialisés pour les seuls besoins spécifiques du spatial dont ils dépendent alors totalement en termes de financement de la R&D et de plan de charge. Quand l'industrie européenne n'est pas la plus performante dans un domaine donné, le secteur spatial ne peut donc lui fournir une base

¹ Notamment diodes bipolaires, transistors à effets de champs, éléments de mémoires électroniques, amplificateurs état solide, et plus généralement composants électroniques de haute performance et de haute fiabilité.

² Cf. *The Competitiveness of the European Space Industry*, op. cité

significative de R&D au-delà d'une adaptation ou d'une sélection de produits pour ses besoins propres. Mais même dans ce cas, si la production des composants et équipements spécifiques n'est pas compétitive, les fournisseurs européens restent cantonnés au seul marché protégé des agences spatiales et ne sont pas en mesure de fournir les marchés d'applications spatiales commerciales, notamment à l'exportation sur lesquels les maîtres d'œuvre européens travaillent alors avec des fournisseurs américains ou japonais.

Bien sûr, à l'inverse, des fournisseurs de composants et équipements européens peuvent se positionner successivement de façon compétitive sur les marchés de développement d'Agence, puis de systèmes d'applications européens, et sur des satellites étrangers. C'est le cas, par exemple pour Thomson, dans les tubes à ondes progressives (TOP) de haute puissance fournis pour des satellites américains et japonais (TDRS, BS2, satellite DBS de Hughes...)

Toutefois, globalement, le domaine amont des composants et équipements spatiaux n'est pas un secteur d'excellence de l'industrie européenne. L'Europe souffre, dans le domaine spatial comme dans d'autres secteurs High-Tech (télécommunications, missiles et systèmes d'armes, avionique), d'une prise de retard de certains de ses secteurs industriels "horizontaux", notamment en électronique et informatique et différents domaines du champ des matériaux, par rapport aux Etats-Unis et au Japon. Quant aux équipements et systèmes totalement spécifiques aux besoins spatiaux, la taille encore réduite du marché européen et la fragmentation de l'offre européenne, face à une industrie américaine plus concentrée et fournissant un très important marché militaire, font que l'industrie européenne est encore très fragile, en termes technologiques (mais il y a progression), et surtout en termes de compétitivité, compte tenu des écarts considérables de séries produites et de taille des marchés.

Pour 1989, les équipements embarqués qui représentaient 18 % de la production spatiale française n'ont représenté que 3 % des exportations spatiales. Le problème est en effet accentué au niveau français du fait d'une faiblesse traditionnelle dans les composants et d'un affaiblissement dans le domaine des équipements, à partir d'une position initiale de force. Cet affaiblissement résulte de transferts de compétences vers d'autres pays européens, dans le cadre de l'europanisation croissante des programmes spatiaux et d'une stratégie privilégiant une maîtrise d'œuvre française. Poussée à l'extrême, cette politique risquerait de vider certains grands programmes d'un contenu technologique et industriel important pour l'industrie nationale, alors que c'est à ce niveau que se situe l'essentiel de l'effet d'entraînement économique et industriel vers les marchés d'applications et les secteurs périphériques.

2.2 Evaluation de l'importance de l'espace pour l'industrie française

L'industrie spatiale française est incontestablement la première d'Europe, avec un leadership incontesté dans les lanceurs, les satellites de télécommunications, et les satellites d'observation de la Terre, trois secteurs qui débouchent sur un important marché civil et militaire d'applications. Elle est par contre moins impliquée que la RFA dans les systèmes habités, ce qui l'a peu handicapée sur le marché concurrentiel, du fait que cette activité est limitée aux programmes d'Agences. Elle est également leader en Europe concernant les stations sol (hors VSAT et TVRO pour lesquels l'industrie européenne dans son ensemble est assez faible). Parmi les 6 principales entreprises maîtres d'œuvre de systèmes spatiaux en Europe, 5 sont françaises ou à majorité française, avec chacune de fortes positions européennes dans leur domaine d'activité principale : à savoir Arianespace (services de lancement), Aérospatiale

(satellites et lanceurs), Alcatel (charges utiles satellites de télécoms et stations sol), Matra (satellites et électronique lanceurs), SEP (propulsion et segment sol observation de la Terre). Sextant Avionique et Thomson ont également des positions solides sur les équipements embarqués.

Globalement, le chiffre d'affaires de l'industrie spatiale proprement dite¹ a décuplé en 10 ans, pour atteindre en valeur consolidée² (excluant l'activité entre entreprises spatiales) près de 10 milliards de F en 1990 (Cf. **Tableau N° 15**). Sur ces dix milliards de F, la part des exportations est de l'ordre de 30 %. (Cf. **Tableau N° 16**). Ce chiffre d'affaires représente environ moitié du chiffre d'affaires de l'industrie spatiale européenne (estimé à 2,8 milliards d'ECUs). Ce "plus" industriel par rapport au poids relatif de la France dans les dépenses spatiales européennes est lié à l'importance de son marché d'applications (civil et militaire) et à la forte implication française sur Ariane et sur les satellites de télécommunications qui représentent tous deux un flux important d'exportations.

Une ventilation des contrats reçus par l'industrie spatiale en 1989 (réalisée sur enquête du CNES auprès des entreprises) donne le poids relatif des différents marchés sur un total de commandes de 11,3 milliards de F. (Cf. **Tableau N° 17**) et fait ressortir l'importance du marché à l'exportation. Une ventilation de l'activité à l'exportation (non consolidée) faite sur l'année 1990 montre l'importance relative des contrats de lancement Ariane dans le flux à l'exportation (Cf. **Tableau N° 18**).

Il convient d'ajouter à la production spatiale stricto-sensu environ 4 milliards de F pour prendre en compte les activités induites en aval : stations sol (2 milliards de F environ), les services de télécommunications spatiales³ (1 milliard de F environ) et les ventes d'images, d'équipements et de services de traitement de données d'observation de la Terre (500 millions de F environ) et autres services divers reliés directement à cette activité (500 millions de F), soit un total "filiale spatiale" de l'ordre de 14 milliards de F.

La mesure de l'activité spatiale de l'industrie, faite par le CNES sur une base différente, donne un chiffre d'affaires spatial total non consolidé (incluant les affaires entre entreprises spatiales) de 20 milliards de F, incluant 3,8 milliards d'activités diverses hors industrie spatiale, mais générées par les contrats du CNES (génie civil à Kourou, achats d'équipements, consommables etc.). Il n'existe pas de valeur consolidée, seule significative en termes de production finale, mais un calcul de la valeur ajoutée correspondante, qui ressort à 9,5 milliards de F sur les 20 milliards de chiffre d'affaires.

Ces deux approches statistiques sont cohérentes, et globalement, une estimation des chiffres d'affaires consolidés donne la ventilation suivante pour l'année 1990:

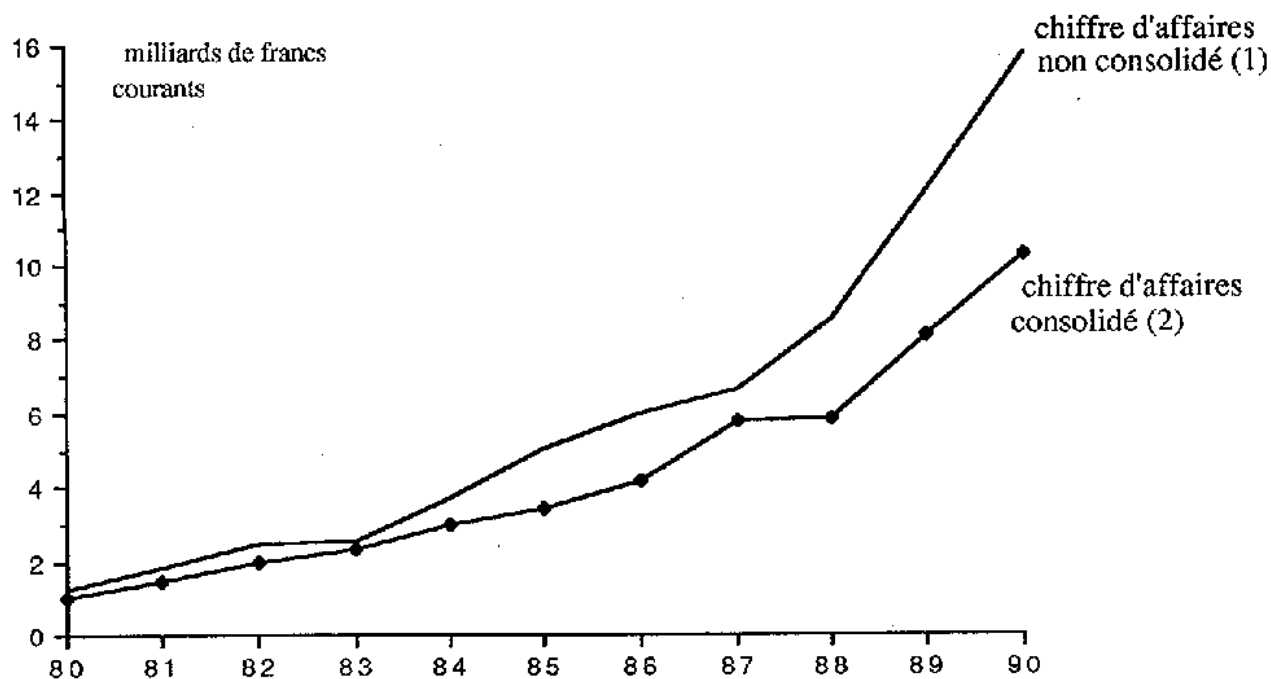
Chiffre d'affaires de l'industrie spatiale (incluant lancements) :	10 milliards de F
Chiffre d'affaires des produits et services en aval :	4 milliards de F
Chiffre d'affaires lié aux contrats CNES/ESA hors industrie spatiale	2,5 milliards de F
Total	<u>16,5 milliards de F</u>

¹ Données GIFAS

² des valeurs consolidées (qui permettent d'éviter de prendre en compte un même élément passant d'une entreprise à une autre) ne sont pas toujours disponibles, c'est pourquoi certaines valeurs sont données non consolidées, qui surestiment la valeur de production finale, mais par contre n'ont pas d'incidence importante quant à la répartition entre marchés finaux.

³ Hors part française de l'exploitation des systèmes internationaux

Evolution de la production spatiale française



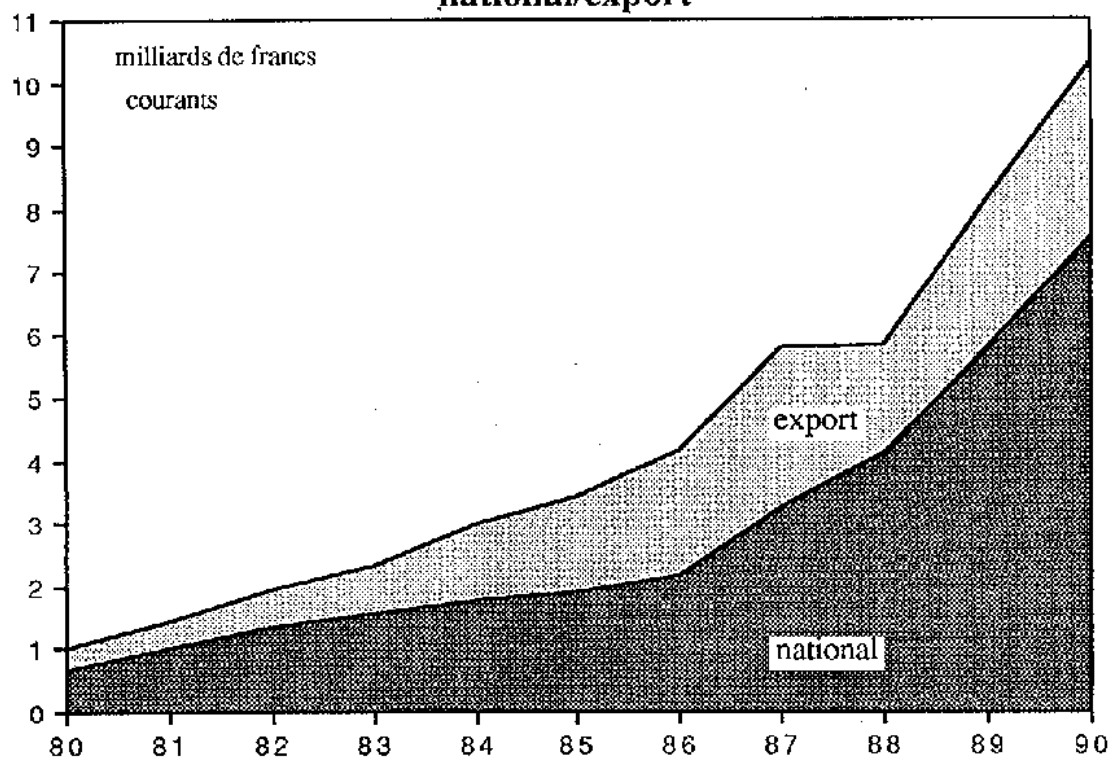
(1) inclut les échanges entre sociétés spatiales

(2) correspond aux seules facturations aux utilisateurs finaux, hors activité interne au secteur

Source des données : GIFAS

Tableau n°15

Ventilation du chiffre d'affaires* spatial national/export



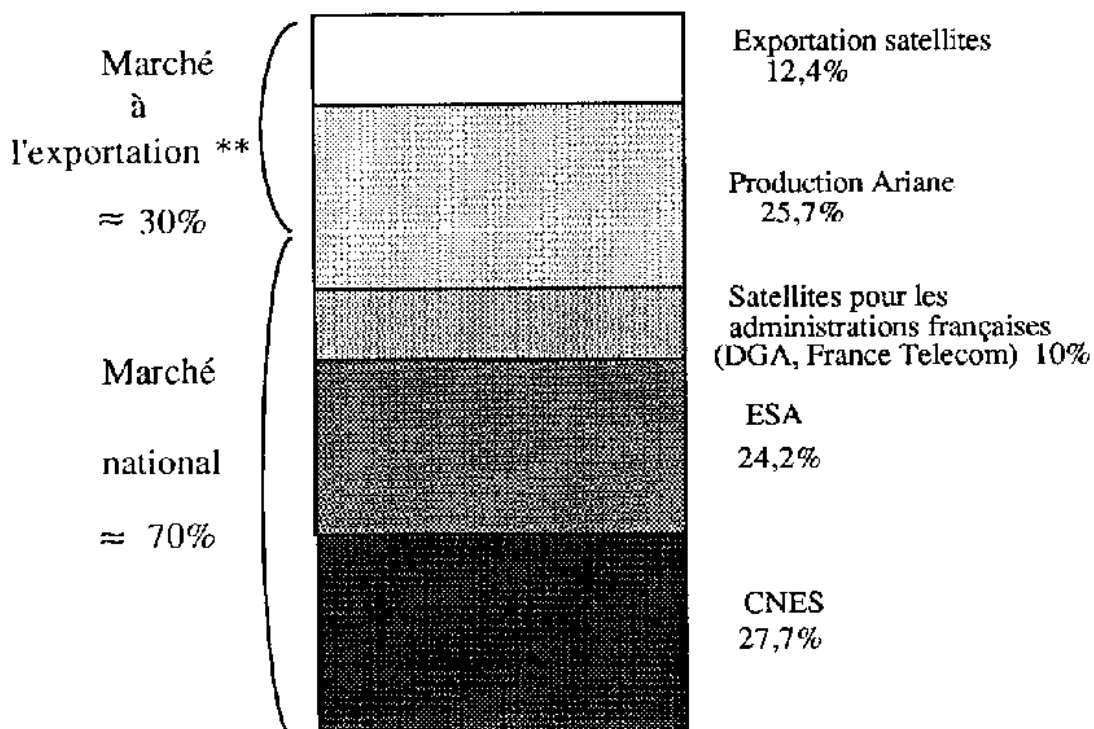
* consolidé

Source : base de données ECOSPACE d'Euroconsult

Données primaires : GIFAS

Tableau n° 16

**Ventilation des contrats passés à l'industrie spatiale française
en 1989 - Total : 11,3 milliards de francs ***



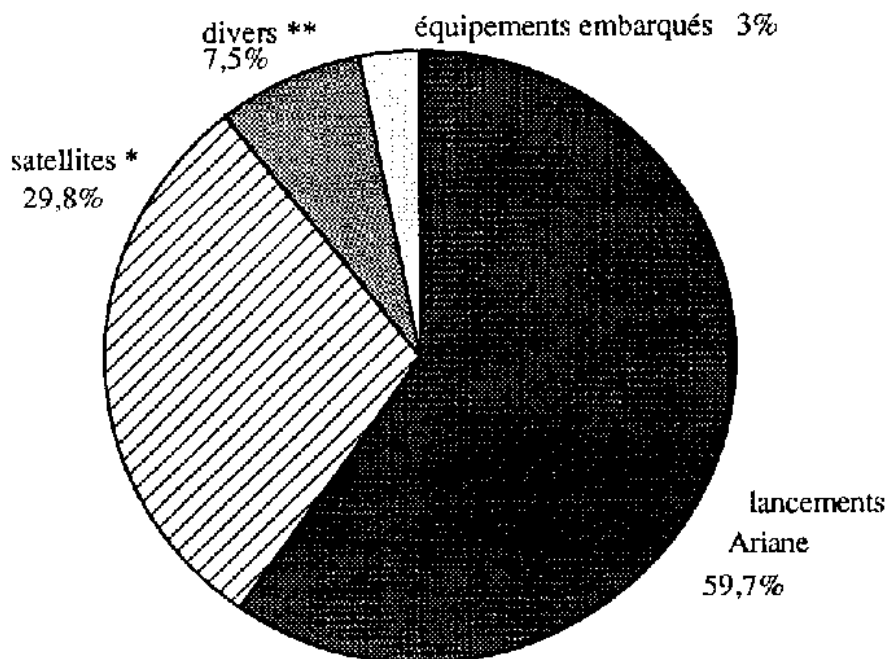
* contrats reçus dans l'année, espace stricto-sensu

** part exportation de l'activité Production Ariane estimée (lancements hors Europe et Europe moins France et moins part française des programmes ESA)

Source des données : CNES/Politique Industrielle

Tableau n° 17

**Répartition des exportations de l'industrie spatiale française
en 1990 - Total : 4,99 milliards de francs**



* et équipements vendus directement par les maîtres d'œuvre

** équipements sol, ingénierie, informatique, etc.

Source des données : CNES/Politique Industrielle

Tableau n° 18

En termes d'effectifs, les statistiques CNES donnent un volume d'emploi industriel de 9000 personnes pour l'industrie spatiale proprement dite, auxquelles s'ajoutent 4300 personnes dans les industries diverses bénéficiant de contrats CNES. Les sources normalisées réalisées sur statistiques professionnelles provenant des Communautés Européennes donnent un volume d'emplois liés à l'industrie spatiale proprement dite d'un montant comparable, soit environ 9000 personnes.

Pour avoir une vision complète des emplois liés à l'espace, il convient d'y ajouter les effectifs du CNES et de ses filiales non industrielles, ceux des personnels français de l'ESA ainsi que ceux des laboratoires travaillant sur les programmes spatiaux, soit au total environ 4000 personnes. Enfin, les activités industrielles et de services en aval emploient environ 5000 personnes.

Une synthèse des estimations d'effectifs donne la ventilation suivante pour l'année 1990:

Emplois de l'industrie spatiale stricto-sensu :	9 000
Emplois industriels et de services en aval :	5 000
Emplois industriels et de services hors espace sur contrats CNES/ESA	4 300
Emplois CNES et reliés, laboratoires	4 000
Total	<hr/> 22 300

En supposant que quelques activités périphériques de services ne sont pas prises en compte, l'ensemble des emplois liés à l'activité spatiale peut être actuellement estimé en France à près de 25 000 personnes.

• L'impact économique et social des services fournis

Au-delà de l'activité industrielle, économique et commerciale liée à la réalisation des programmes spatiaux eux-mêmes et aux activités industrielles en aval, en amont et en périphérie qui y sont plus ou moins reliées, les services fournis par les systèmes d'applications spatiales ont un important impact sur la société. C'est le cas, par exemple, des liaisons téléphoniques et de la transmission de télévision au-delà des océans, des prévisions météorologiques plus précises et à plus long terme, de la télédétection des ressources naturelles, d'un meilleur contrôle de la pollution etc..

Cet impact est extrêmement difficile à mesurer. Il se traduit essentiellement par la facilitation et l'optimisation de nombreuses activités économiques et sociales, ou "externalités", en langage économique. Des tentatives d'évaluation de l'impact économique de l'amélioration des prévisions météorologiques permise par les satellites ont été réalisées il y a une quinzaine d'années aux Etats-Unis par la NOAA. Elles faisaient apparaître des économies de l'ordre de 10 fois supérieures au coût des satellites. Le problème dans l'analyse de ces impacts est qu'ils interviennent souvent à long terme. Ainsi, pour la météorologie, c'est l'accumulation sur de nombreuses années des observations issues du programme mondial d'observation du système météorologique de la planète (programme GARP), qui permet de nourrir des modèles de plus en plus performants d'analyse de la dynamique de l'atmosphère terrestre, débouchant sur des prévisions plus précises à plus long terme. Plusieurs générations de satellites américains, européens, indiens, japonais et soviétiques, ont déjà participé et participeront encore à ce programme.

Toutefois, dans ces effets d'externalités, l'espace n'intervient jamais seul. Ainsi, pour la météo, les mesures au sol restent indispensables et complémentaires des données spatiales. Il en va de même pour la télédétection, pour laquelle les données satellites se complètent avec les données de terrains et d'autres informations statistiques à travers les systèmes d'information géographique (SIG). De même, dans les communications transocéaniques et la distribution TV, les satellites et les câbles coaxiaux et en fibres optiques se complètent¹ et se relaient mutuellement.

Cet impact socio-économique des services fournis est in fine le plus important puisqu'il constitue la finalité même de la mise en place de systèmes d'applications spatiales. Il intervient progressivement et à long terme et est d'autant plus rapide et important qu'il y a une bonne intégration et appropriation de la technologie spatiale par les acteurs économiques en interrelation avec les technologies pré-existantes.

Compte tenu des divers facteurs analysés, il est possible de donner un classement sommaire de l'importance qualitative² des différents types de programmes d'Agences en termes d'impact économique à un horizon prévisible (Cf. **Tableau N° 19**). Ce classement fait ressortir l'importance économique fondamentale des programmes d'applications et de lanceurs, par rapport, d'une part aux programmes scientifiques, dont ce n'est pas le rôle direct, mais qui ont un impact économique non négligeable, et d'autre part aux programmes d'infrastructure et de vols habités, dont l'impact est essentiellement celui direct et immédiat des contrats d'agences fournis à l'industrie et dont l'objectif est, à un horizon prévisible, plus politique et philosophique qu'économique.

Importance qualitative des effets économiques des programmes spatiaux

Impact / Programmes	Direct (contrats d'Agences)	Entraînement applications	Effets induits			
			industriels			services fournis en aval
			en aval	en amont	en périphérie	
Infrastructure, systèmes habités	●	○	◐	◑	◒	○
Programmes scientifiques	●	◑	◐	◒	◒	○
Télécommunications	●	●	●	◑	◑	●
Observation	●	●	●	◑	◑	●
Lanceurs	●	●	◐	●	●	○

● Important ◑ Moyen ◐ Faible ○ Inexistant

Tableau N° 19

¹ Cf. *Satellites et fibres optiques, concurrence et complémentarité* OCDE 1988

² pour un même niveau de budget, ce qui explique la même importance donnée à l'effet direct des contrats d'agences

Bien sûr, compte tenu du caractère naissant de l'activité spatiale, l'enjeu économique des programmes spatiaux ne se limite pas à l'impact immédiat des dépenses d'Agences. Dans la mesure où les conditions qui viennent d'être analysées sont remplies, les impacts induits interviennent selon leur nature à court, moyen ou long terme (Cf. Tableau N° 20).

Horizon des différents types d'impacts économiques des programmes d'applications spatiales

	immédiat	court-terme	moyen-terme	long-terme
Marché des Agences CNES, ESA...				
Marchés spatiaux d'applications				
Marchés en aval des systèmes d'applications				
Impact économique des services fournis				

Tableau N° 20

• La nécessité de dépasser l'argument des "retombées"

L'importance des budgets spatiaux d'agences et leur croissance soutenue est parfois justifiée par l'argument des "retombées" technologiques, économiques et industrielles qu'ils seraient susceptibles d'engendrer. Certaines agences spatiales ont développé d'importantes actions de lobbying à partir de ce thème des retombées. Cela a été notamment le cas de la NASA aux Etats-Unis pendant les années 70 et au début des années 80.

Cet argument s'est en grande partie retourné contre la NASA. Les "spinoffs" mis en évidence en dehors du domaine de l'espace sont apparus de plus en plus marginaux et sans relations avec l'ampleur du budget spatial. Ceci d'autant que les 20 dernières années ont été marquées par des pertes considérables de parts de marché et un affaiblissement technologique de l'industrie américaine sur tous les secteurs de haute technologie, malgré le plus important budget spatial du monde occidental, qui absorbe un quart des crédits publics de R&D. Qui plus est, cette perte de terrain de la technologie américaine a gagné progressivement le cœur même de la technologie spatiale, avec une dépendance croissante par rapport à des technologies japonaises (composants électroniques surtout, mais aussi matériaux).

Des mises en cause spectaculaires des technologies de base américaines ont stupéfié l'opinion publique. C'est le cas par exemple de la sélection de certains matériaux japonais en substitution de matériaux américains pour la navette spatiale, ou le récent report de 10 mois du lancement du

nouveau satellite expérimental de télécommunications de la NASA (ACTS) en raison du remplacement nécessaire des transistors défectueux des 56 amplificateurs, fournis par Dexcel, par des transistors fournis par le japonais NEC¹, ceci alors que ce programme vise à maintenir le leadership technologique américain dans les télécommunications spatiales du futur.

Même au sein du secteur spatial américain, l'argument simpliste des retombées est maintenant dépassé. Ainsi, Carl Sagan, concepteur de grands programmes scientifiques spatiaux américains, et fervent défenseur d'un programme spatial ambitieux au service de la science et des applications², va même jusqu'à considérer "les justifications de type retombées comme un signe de banqueroute et un argument méprisant pour l'intelligence des gens dans une démocratie".

Sans entériner totalement une critique aussi radicale (dont il faut savoir qu'elle traduit le point de vue de la plupart des spécialistes de l'innovation industrielle), il faut reconnaître que l'argumentation habituelle des retombées est en très grande partie non fondée et qu'elle a de quoi irriter les responsables scientifiques et techniques des autres secteurs industriels. Voulant apporter un argument complémentaire au développement des programmes spatiaux qui n'en ont pas besoin pour se justifier, compte tenu de leurs implications propres, l'argumentation en termes de "retombées" détourne l'analyse de ces véritables justifications, technologique, industrielle et commerciale. Elle contribue in fine à les affaiblir en situant très mal le rôle du secteur spatial, qui est à la fois moins universel et plus fondamental.

Le problème n'est pas que les inventaires de "retombées" technologiques et économiques des contrats qu'elles distribuent, que financent certaines agences, soient faux. Mais ils font de ces contrats l'unique source à l'origine de filières d'innovation se répercutant ensuite dans les différents secteurs industriels avec des effets multiplicateurs en cascades. Or, un contrat d'une agence spatiale reçu par une firme se situe lui-même en continuité des travaux précédents qu'elle a réalisés pour d'autres clients. L'expérience accumulée, la qualité des travaux réalisés et les références acquises permettent à la firme d'obtenir ce contrat, qui lui-même participera à cette capitalisation des connaissances dans un phénomène continu qui se déroule dans le temps. Considérer que les programmes d'une agence n'ont pas de dépendances technologiques en amont mais génèrent toutes les activités technologiques en aval n'est pas significatif. Cela ne permet ni de chiffrer un effet multiplicateur des budgets spatiaux, ni de mettre en évidence un effet d'entraînement supérieur à une autre affectation des ressources considérées.

Qui plus est, l'essentiel de la formation de la valeur ajoutée sur un contrat est lié au travail spécifique qui est accompli en rémunération du prix reçu, et non pas en rémunération de l'expérience accumulée. De ce fait, en termes purement économiques, il n'est pas possible de retenir le principe d'un facteur multiplicatif de l'argent injecté par un agent économique aux dépens d'un autre qui fournit un financement en aval. Sauf à arriver à des calculs qui, généralisés à tous les agents économiques ne pourraient s'équilibrer qu'avec une réévaluation du PNB dans un facteur de 3 ou 4, il est aisé de comprendre que les supposés effets économiques induits s'annulent réciproquement³.

¹ Le coût de remplacement s'élève à 5 millions de \$. Par ailleurs, les critiques japonaises sont incessantes concernant les défaillances des satellites américains fournis au Japon (GMS, BS 2, SuperBird...), et attribuées à la mauvaise qualité des composants américains : Cf. *Le suicide de l'industrie américaine*, Karatsu Hajime Voice, Tokyo avril 1991

² Cf interview du 18 septembre 1991 in Libération : "La Terre a besoin d'espace"

³ S'ajoute le fait qu'étant financés sur fonds publics, les budgets d'agences proviennent des prélèvements obligatoires effectués sur les autres secteurs économiques, qui en termes de flux financiers en sont à l'origine.

Par ailleurs, au niveau purement technologique, le processus d'innovation n'est pas linéaire, mais résulte de nombreuses interactions technologiques, industrielles, commerciales et financières parmi lesquelles l'importance relative d'une seule d'entre elles n'est pas pondérable. Il existe bien sûr des échanges technologiques permanents entre secteurs industriels, qui peuvent être mesurés en termes de transferts de brevets, licences, savoir faire, assistance technique etc. Mais une analyse des transferts technologiques réciproques entre secteurs n'est pas à l'avantage de l'espace, dont ce n'est d'ailleurs pas le rôle¹. En effet, l'essentiel des budgets de R&D gérés par les agences concerne le développement de programmes et, à moindre titre des travaux relatifs à des besoins technologiques spécifiques. De ce fait, le secteur spatial n'est pas en lui-même très créateur de nouvelles technologies. Il est essentiellement intégrateur de systèmes complexes faisant appel à de nombreuses technologies constitutives qu'il fait fonctionner et met en interaction dans des conditions extrêmes et très spécifiques liées au milieu spatial. En ce sens, il est très consommateur de hautes technologies maîtrisées dans les secteurs amont et périphériques, à qui il apporte ses propres adaptations pour répondre à ses contraintes particulières. Ces technologies touchent de nombreux domaines comme les matériaux hautes performances de toutes natures, de nombreux types de composants électroniques, des systèmes électriques, hydrauliques, mécaniques, de stockage d'énergie, des calculateurs embarqués, des logiciels etc..

Le nombre et le haut niveau des contraintes caractéristiques de l'espace (grande légèreté, variations de températures extrêmes, autonomie de fonctionnement sur de très longues durées de vie, vide, absence de pesanteur, absence de convection, rayonnement solaire intense, présence de particules lourdes, contraintes spécifiques d'accélération et de vibrations au lancement etc.) entraînent la réalisation de systèmes et l'adoption de solutions techniques tout à fait spécifiques à partir de technologies génériques la plupart du temps déjà très bien maîtrisées.

Cette extrême spécificité fait que les solutions techniques, par nature très coûteuses, adoptées dans l'espace ont peu d'applications en tant que telles dans d'autres secteurs. Ceux-ci font appel aux technologies génériques qu'ils organisent en fonction de leurs propres contraintes, sans qu'un détour par la solution appliquée dans l'espace ne soit généralement utile.

Les principaux échanges technologiques se font à l'intérieur du secteur lui même, entre programmes scientifiques et d'applications, et entre les différents domaines d'applications.

En dehors de ce champ spécifiquement spatial, des échanges se font avec le domaine proche de l'aéronautique, des missiles, de l'avionique, dans une logique des systèmes embarqués, mais au prix d'adaptations très importantes compte tenu de contraintes très différentes. Au-delà, les échanges technologiques touchent surtout les domaines de la propulsion, de l'armement, des télécommunications, du médical, de la robotique, des matériaux. Mais pour ces systèmes au sol, la spécificité du spatial oblige à des adaptations encore plus importantes lors des échanges technologiques². Dans tous ces cas, le flux des échanges se fait très majoritairement des autres secteurs vers l'espace et non l'inverse. Ceci confirme d'ailleurs l'a-priori politique du caractère

¹ Cf enquêtes régulières de la NSF sur la productivité comparée des dépenses de R&D par secteur, en termes de brevets, licences, nouveaux produits. En France, très peu de travaux existent en dehors de ceux à but promotionnel financés par les Agences elles-mêmes. Cf. *Espace, retombées en miettes* Science et Technologie février 1991

² Cf. *Analyse des problèmes relatifs aux transferts et effets d'entraînement technologique de l'industrie aérospatiale* CPE MRI avril 1983

démonstratif et prestigieux des programmes spatiaux, comme étant la synthèse de ce qu'un pays peut faire de mieux.

Si les programmes spatiaux devaient financer la base technologique des différents secteurs industriels qui le fournissent (composants, matériaux, équipements etc.), leurs coûts deviendraient exorbitants. Et il y aurait un risque important à orienter les crédits de recherche relatifs aux différents domaines technologiques en fonction des besoins spécifiques des programmes spatiaux, compte tenu de leur extrême spécificité et de la taille réduite du marché¹.

Ce serait trop attendre de l'espace qu'il entraîne technologiquement l'ensemble du reste de l'industrie, et d'une façon plus générale, il ne saurait y avoir durablement d'industrie spatiale florissante dans le contexte d'autres secteurs industriels qui seraient sinistrés. Le secteur spatial a besoin d'une solide base technologique et industrielle en amont, en périphérie et en aval pour se développer harmonieusement et participer au mieux à un échange technologique réciproque avec les autres secteurs de haute technologie. Si ce n'est pas le cas, il y a risque de dépendance technologique croissante par rapport aux pays disposant de puissantes industries de composants, de matériaux, d'électronique, d'informatique et autres industries à forte diffusion technologique inter-sectorielle, et focalisation sur la seule activité "systèmes" à faible contenu technologique.

L'argument des retombées économiques automatiques qu'auraient par nature les programmes spatiaux est démobilisateur, en ce sens qu'il ne porte pas l'attention sur toutes les conditions indispensables pour qu'il y ait transformation d'une avancée technique dans un domaine spécifique comme l'espace en un avantage technologique, industriel et commercial durable sur un marché concurrentiel.

¹ Un exemple extrême de formation d'un ghetto technologique autour de l'espace est donné par l'Union Soviétique, et à moindre titre par quelques sociétés américaines ne fournissant que la NASA et le D.o.D.

Partie 3 - Evaluation de l'adéquation des objectifs et des moyens aux enjeux

Deux séries de questions ont été posées par l'Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Technologiques dans le cadre de la présente expertise sur les enjeux économiques et industriels de la politique spatiale.

La première a trait aux enjeux liés à l'espace et aux objectifs poursuivis :

Les enjeux sont-ils tous cernés, et les objectifs correspondent-ils à ces enjeux? Ces objectifs sont-ils suffisamment prospectifs, raisonnablement ambitieux, judicieusement équilibrés ?

La seconde a trait aux moyens affectés :

Les moyens sont-ils adaptés aux objectifs : peuvent-ils être optimisés, et leur évolution est-elle maîtrisée et contrôlée ? L'effort relatif peut-il augmenter au-delà du niveau actuel ?

Il est possible de tenter de répondre à ces questions en précisant que la présente évaluation ne porte que sur les enjeux économiques, qui sont pris en compte à la fois au niveau de l'économie publique et des aspects budgétaires et à celui de l'économie industrielle intégrant les aspects commerciaux d'emplois et de concurrence internationale. Il est bien évident que d'autres facteurs, politiques, scientifiques, militaires etc, traités dans les autres expertises, doivent bien sûr être pris en compte pour une évaluation globale.

3.1 Les grands enjeux économiques et industriels du développement des programmes spatiaux

Il est toujours difficile de hiérarchiser des enjeux, certains d'entre eux apparaissant comme d'égale importance. C'est le cas de quatre enjeux majeurs pour le développement économique du secteur spatial, qui sont en grande partie inter-reliés.

Le principal enjeu à horizon de la décennie à venir concerne **l'espace militaire**.

L'expansion extrêmement rapide des Etats-Unis dans l'espace militaire a pratiquement laissé sur place l'Europe. Ainsi, alors que le rapport entre les budgets de défense américain et européen est de l'ordre de 2 à 1, celui des budgets spatiaux militaires est au minimum de l'ordre de 16 à 1. Le retard est donc considérable. Or, par ses implications fondamentales, l'espace militaire interpelle l'Europe au cœur de son problème de défense et lui pose un défi extrêmement difficile à relever.

La France en a pris conscience plus tôt que les autres pays européens et est actuellement la plus engagée dans les applications militaires, même si ses programmes sont encore modestes. Etant d'une façon plus globale la plus avancée dans le domaine spatial, elle a, à ce niveau, un rôle clef à jouer. Au-delà des aspects purement défense, l'enjeu est très important,

- au niveau budgétaire, compte tenu du coût très élevé des systèmes spatiaux militaires, ce qui suppose une augmentation et/ou un redéploiement des budgets d'équipement, et
- au niveau industriel, tant pour l'industrie de défense elle-même, qui sera amenée à se transformer, que pour l'industrie spatiale dans sa globalité, secteur civil compris.

L'essentiel des applications spatiales militaires (observation, télécommunications fixes et mobiles, localisation, navigation, météo...) recourent en effet fortement les applications civiles. La synergie entre les deux domaines est fondamentale dans la dynamique de développement technologique et industrielle des applications spatiales. Sur les 29 milliards de \$ de chiffre d'affaires (170 milliards de F) réalisés par l'industrie spatiale américaine, et sur les 300 000 personnes qu'elle emploie, plus des deux tiers concernent des programmes militaires.

De nombreux programmes spatiaux américains ont une double finalité, militaire et civile. C'est le cas par exemple de tous les lanceurs (Delta, Atlas et Titan), des satellites météorologiques (Advanced Tiros et DMSP), de satellites de télécommunications (grosse plateforme HS 601 de Hughes), du système global de navigation GPS Navstar etc. C'est le cas également au niveau des équipements et sous-systèmes, de moyens lourds de tests d'essais et d'intégration.

Compte tenu du poids considérable du marché spatial militaire américain, qui pèse actuellement 5 fois plus que la totalité du marché spatial commercial mondial, il s'agit là d'un avantage considérable pour l'industrie américaine.

Si l'Europe s'avérait incapable de s'engager rapidement dans les applications spatiales militaires, ce qui serait très grave à moyen terme concernant sa capacité autonome de défense, il serait pratiquement impossible à son industrie spatiale de pouvoir maintenir une base technologique et industrielle compétitive face à l'industrie spatiale américaine.

Le second enjeu déterminant concerne les télécommunications spatiales

Premier domaine d'application commerciale de l'espace, les télécommunications spatiales représentent de loin le principal marché de l'espace non financé par les budgets publics. Il s'agit d'un secteur qui est bien loin d'avoir trouvé les limites de son développement et dont le potentiel de croissance reste très important (liaisons hautes fréquences, télédiffusion directe moyenne et haute puissance, réseaux privés, liaisons entre mobiles, localisation...).

Globalement, l'industrie des télécommunications est devenue une des principales industries mondiales de cette fin de siècle, et la concurrence internationale y est extrêmement violente dans un contexte de déréglementation. L'Europe a mieux résisté jusqu'à présent dans ce secteur à la concurrence américaine et japonaise que dans les domaines voisins de l'électronique et de l'informatique. Mais ses positions restent fragiles sur les télécommunications spatiales et très en deçà de ce que doivent être ses ambitions. Elle est attaquée à la fois par l'industrie américaine dominante, bien implantée et bénéficiant du recoupement avec son très important marché militaire, et par l'industrie japonaise qui progresse très rapidement par les composants et équipements.

Aux Etats-Unis, la production relative aux télécommunications spatiales est déjà supérieure à celle destinée aux programmes de la NASA et elle croît beaucoup plus vite.

En Europe, ce n'est pas encore le cas, et la production spatiale relative aux télécommunications ne représente qu'environ moitié du marché des agences, et les positions de l'industrie européenne sont fragiles. La situation est meilleure en France, dont l'industrie est leader en Europe sur les télécommunications spatiales. Mais là également, les positions acquises sont fragiles et les positions à l'exportation encore très faibles. Le marché mondial des télécommunications spatiales alimente surtout le carnet de lancements d'Ariane (plus de 3/4 des satellites lancés). Les producteurs de satellites, par contre, ont du mal à être compétitifs sur leur marché intérieur et à percer à l'exportation. C'est en raison des enjeux importants du marché des télécommunications spatiales et de la dureté de la concurrence que les industriels français concernés se sont engagés dans des stratégies de rapprochement et de participation dans des entreprises étrangères, y compris aux Etats-Unis.

Si le secteur spatial européen n'arrivait pas à maintenir ses positions et à se renforcer sur le marché des satellites de télécommunications et qu'il doive se replier sur les marchés d'agences, il perdrait sa dimension industrielle et l'essentiel de son impact économique.

Compte tenu de l'importance de l'enjeu et de la pression concurrentielle, il est important qu'il y ait maintien d'un support technologique provenant des agences ou des clients institutionnels, parallèlement au développement espéré des programmes militaires.

Le troisième grand enjeu économique concerne l'observation de la Terre.

Il s'agit là d'un secteur actuellement moins mûr que celui des télécommunications, mais aux perspectives de développement au moins aussi importantes. L'observation de la Terre est par nature extrêmement polyvalente. Elle se trouve au carrefour de nombreux champs : domaine scientifique et applications, météorologie et télédétection, besoins civils et militaires, services publics et marchés commerciaux, connaissance de l'environnement et gestion des ressources terrestres etc. Elle est notamment porteuse de solutions extrêmement efficaces et globales à des interrogations clefs relatives à une meilleure connaissance des grands équilibres de la planète et de son évolution, ainsi que du contrôle de la pollution, pour lesquels existe une très importante demande sociale.

Les investissements restant à réaliser sont toutefois considérables, tant au niveau des systèmes spatiaux eux-mêmes qu'à celui de toute la filière de stockage, distribution, traitement et interprétation des données. Si les utilisateurs potentiels sont extrêmement nombreux, notamment au niveau des organismes publics internationaux, nationaux et régionaux, leur diversité même et les nombreux développements technologiques encore nécessaires excluent qu'il y ait une organisation rapide et spontanée du marché permettant une gestion purement commerciale de ce secteur.

Le rôle des agences reste donc déterminant. L'effacement trop rapide de la NASA dans ce domaine, du fait d'une surestimation de la maturité du marché, a permis à l'Europe de rattraper son retard et même de prendre un peu d'avance dans certains domaines concernant les systèmes civils (SPOT et ERS). Mais la NASA effectue maintenant un retour extrêmement important à travers le programme EOS. Plus globalement le gouvernement américain soutient le très ambitieux programme "Global Change" susceptible de donner un support très important au développement de l'industrie américaine des équipements et des services. Par ailleurs, l'industrie américaine bénéficie là encore de très importants programmes militaires qui lui fournissent une base technologique sans commune mesure avec ce qui existe actuellement en Europe.

La France a développé en Europe un leadership dans ce domaine, tant au niveau civil (SPOT) que militaire (Hélios), qui s'effrite du fait de l'eupéanisation des programmes obligeant à des transferts de compétences, et d'un positionnement minoritaire dans les nouveaux programmes de l'ESA (ERS, plateforme polaire). Cette évolution est normale dans une logique de dynamique européenne. Toutefois, elle suppose que l'enveloppe globale des programmes s'accroisse et qu'il y ait capacité à se positionner sur les applications les plus porteuses, tout en ne se limitant pas au seul niveau du segment spatial. L'essentiel de l'activité économique, financée par les utilisateurs, à attendre de cette application devrait en effet se développer sur l'aval.

Le quatrième enjeu majeur, transversal aux trois précédents, concerne **les systèmes de lancement**.

Une maîtrise autonome de cet élément clef indispensable pour l'accès à l'espace est indispensable, compte tenu des enjeux militaires, politiques, industriels et commerciaux qui y sont liés. Les systèmes de lancement doivent, de plus, être les moins coûteux possibles pour favoriser le développement de tous les systèmes d'applications. L'impact du lancement est en effet déterminant dans le coût global d'un système spatial. Intervient le coût direct du lancement, qui est en moyenne très proche de celui du ou des satellites embarqués, et le coût indirect de l'assurance, qui peut devenir rédhibitoire si la fiabilité est insuffisante, comme cela a pu être observé lors de la période de défaillances en série des lanceurs classiques.

C'est dans ce domaine que l'Europe spatiale a connu jusqu'à présent le plus de succès industriels et commerciaux, le rôle de la France ayant été fondamental dans cette réussite. Il est certain qu'elle a bénéficié de l'erreur américaine du "tout navette" du début des années 80, mais il ne s'agit pas là du seul facteur explicatif. Le maintien d'excellentes positions d'Arianespace sur le marché mondial après le retour massif des lanceurs classiques américains modernisés, bénéficiant chacun d'un volume important de commandes militaires, le prouve. Ce succès dans la maîtrise d'un système de lancement compétitif a été et reste fondamental dans la dynamique industrielle de l'espace européen. Les tirs quasi-mensuels d'Ariane pour des clients du monde entier sont la démonstration régulière de la dimension industrielle et commerciale de l'espace et des capacités compétitives de l'Europe. Les flux d'exportation sont significatifs et les niveaux de production atteints sont réellement industriels : série de plusieurs centaines pour les moteurs Viking par exemple, et globalement près de 100 Ariane (1 à 4) lancées en production depuis le début du programme.

Pour le futur, le relais est bien engagé avec le développement d'Ariane 5 et les très importants investissements, sans équivalents dans le reste du monde, qui ont été réalisés dans le cadre de ce programme pour optimiser la production et le tir de ce nouveau lanceur. Toutefois, la bataille concurrentielle n'est pas gagnée d'avance sur un marché en rapide évolution, où les besoins de lancements se diversifient rapidement (développement des applications en orbites basse et elliptique en plus de l'orbite géostationnaire, élargissement de la gamme de masses des satellites: allant des mini-satellites aux satellites très lourds). La modularité et l'adaptation fine aux besoins du marché, qui fait en grande partie le succès d'Ariane 4, la maîtrise routinière de la fiabilité, ainsi que la maîtrise des coûts seront des facteurs déterminants dans un contexte de concurrence accrue et élargie dans lequel Arianespace ne disposera pratiquement pas de marché

protégé¹. Des adaptations et développements complémentaires seront nécessaires, de même que le développement de capacités de lancements légers.

Il est indispensable que les positions de force acquises par l'industrie française dans ce domaine des systèmes et services de lancements soient consolidées et que l'Europe reste à la pointe de l'efficacité dans les lanceurs qui conditionnent directement la compétitivité de l'ensemble de ses systèmes spatiaux.

En dehors de ces quatre grands enjeux économiques, industriels et commerciaux de l'espace, deux autres enjeux importants doivent être pris en considération, bien qu'ils ne soient pas directement reliés à un marché commercial.

Le premier concerne les **programmes scientifiques**².

De par le caractère fondamental de l'ensemble des champs scientifiques liés à l'espace, ces programmes se justifient amplement. De plus, ils sont en phase avec l'importante demande sociale d'un support public au développement des connaissances scientifiques concernant la connaissance de l'Univers mais surtout des grands équilibres de la Terre. Au-delà de cet intérêt scientifique, ces programmes sont également à l'origine technique de la plupart des applications et des équipements spatiaux. Ils constituent en quelque sorte le laboratoire de l'industrie spatiale et jouent à ce titre un rôle fondamental de renouvellement et d'extension de ses technologies spécifiques et de ses applications.

Jusqu'à présent, l'Europe a consacré par rapport aux Etats-Unis une part plus modeste de ses ressources aux programmes scientifiques, mais avec une meilleure efficacité relative. Elle a maintenu le rythme d'une mission scientifique lourde tous les deux ans, et la qualité des programmes réalisés est largement reconnue. D'une façon générale, l'Europe a une bonne efficacité dans la réalisation des programmes scientifiques, liée à la qualité de la formation de ses scientifiques, à un moindre coût des ressources par rapport aux Etats-Unis et à une bonne gestion des programmes. La France joue son rôle à l'intérieur de l'espace européen dans ce domaine, avec toutefois un engagement relatif plus important sur les technologies et systèmes que sur les expériences scientifiques.

A l'intérieur des budgets spatiaux européens, les programmes scientifiques bénéficient d'une croissance lente mais régulière et d'une programmation à long terme qui les protègent de fluctuations brutales. Toutefois, les grands enjeux scientifiques qui se développent actuellement justifieraient une approche plus ambitieuse de l'Europe, et particulièrement de la France, qui soit en relation avec les compétences scientifiques exceptionnelles disponibles, qui constituent à long terme la base de son renouvellement technologique.

Le second enjeu concerne les **vois habités**.

L'extension de l'activité de l'homme dans l'espace se situe dans la logique du développement de l'aventure humaine. Le premier homme dans l'espace, et plus encore le premier homme sur la Lune constituent des étapes clefs d'évolution de l'humanité, autant philosophiques que technologiques. Cette dimension fondamentale, et le caractère extrêmement démonstratif de la

¹ Cf. sélection récente d'un lanceur américain, Delta, pour le lancement du 3ème satellite allemand de télécommunications DFS

² incluant l'expérimentation scientifique en microgravité

"conquête de l'espace" ont entraîné dans le passé une surdétermination politique des programmes de vols habités, dans le contexte de l'affrontement est-ouest.

La course à l'espace entre les Etats-Unis et l'Union Soviétique a été marquée par des succès des deux côtés aux différentes étapes de la présence de l'homme dans l'espace : notamment premier homme en orbite, première sortie dans l'espace, premier homme sur la Lune, première navette habitée, maintenant missions de longue durée en stations spatiales. Mais parallèlement à la détente est-ouest, la dimension politique de l'affrontement technologique sur la conquête de l'espace s'est atténuée. Privée en partie de la priorité politique qui leur était accordée, ces programmes, du fait de leurs coûts considérables, connaissent une période de crise en Union Soviétique et aux Etats-Unis et sont de plus en plus proposés à la coopération internationale.

L'Europe avait été jusqu'à présent assez peu concernée par cet affrontement est-ouest sur les vols habités, le seul programme significatif qu'elle ait réalisé dans ce domaine ayant été le laboratoire spatial Spacelab, embarqué sur la navette spatiale américaine. Bien qu'étant une réussite technique, ce programme a subi les aléas de la navette américaine. Il a été et sera assez peu utilisé compte tenu du coût intrinsèque de fonctionnement du système. Les opportunités de vols d'astronautes européens sur les systèmes américains et soviétiques se sont par contre multipliées au cours des années passées, et pas moins de cinq missions d'astronautes européens sont programmées pour la seule année 1992.

En logique avec le développement constaté aux Etats-Unis et en Union Soviétique, l'Agence Spatiale Européenne, en liaison avec les agences nationales, a défini depuis le début des années 80 un ensemble de programmes permettant de déboucher sur une autonomie européenne dans les vols habités et l'activité humaine en orbite. Comme cela a été observé aux Etats-Unis, mais dans un contexte différent, la surdétermination politique a été très importante dans ce choix. Au niveau des principaux pays concernés, mais surtout de la France, leader incontesté de l'espace en Europe, il s'agit d'une étape fondamentale devant consacrer l'émergence technologique de l'Europe au niveau international.

Mais le contexte politique, économique, technologique et concurrentiel international a considérablement évolué depuis la définition de ces programmes : détente est-ouest et son impact sur les programmes spatiaux américain et soviétique, guerre du Golfe consacrant l'émergence de l'espace militaire, ouverture de l'Europe de l'Est, réunification de l'Allemagne, crise économique et budgétaire dans les principaux pays européens, concurrence violente du Japon sur des secteurs clefs de l'industrie européenne et besoins importants d'investissements de R&D et de production.

Cette évolution a été prise en compte par l'ESA qui, par rapport aux projets adoptés dans leurs phases d'étude et de développement préliminaire en 1987, a réduit la dimension des programmes d'autonomie dans les vols habités et les a étalés dans le temps pour qu'ils restent compatibles avec une croissance moindre des budgets. La décision politique de leur engagement définitif, plusieurs fois retardée, devrait être prise en novembre 1991.

Pourtant, malgré ces aménagements, des questions se posent sur la définition même de ces programmes et leur priorité dans le contexte actuel. Elles ne remettent pas en cause l'intérêt à long terme que représente pour l'Europe le fait de s'engager sur le développement de capacités à effectuer des vols habités et à travailler en orbite, qui est évident. Elles portent sur :

- l'équilibre qui doit être recherché entre autonomie européenne et coopération internationale, qui à terme s'imposera pour les systèmes les plus sophistiqués,
- la définition, la sélection et l'enchaînement des programmes clefs pour assurer cette émergence de l'Europe, et surtout sur
- l'enveloppe budgétaire de référence dans le cadre de laquelle doivent être poursuivis ces programmes.

3.2 Le problème de l'adaptation des moyens et de leur augmentation au-delà des niveaux actuels

C'est en effet au plan budgétaire et économique que se situe le cœur du problème. L'idéal pour les agences spatiales et l'industrie serait de pouvoir développer à la fois les budgets de l'ensemble des programmes d'applications et scientifiques, et d'engager sans réserves les programmes de vols habités.

Mais ceci suppose une capacité réelle à augmenter de façon importante et durablement les budgets spatiaux civils, car il n'est pas possible concernant les systèmes relatifs aux vols habités d'envisager à un horizon prévisible un relais de financement par le marché, y compris en ce qui concerne les coûts d'exploitation. En effet, aucun des grands domaines d'applications qui se développent actuellement (systèmes militaires, télécommunications, observation de la Terre, météorologie, lanceurs commerciaux) ne sont demandeurs de systèmes habités, ni même d'interface avec des systèmes habités. Seule l'expérimentation en microgravité est en partie concernée, mais là également, les programmes et les expériences devront être financés par les agences sans relais par le marché à un horizon prévisible.

Or, une dérive des coûts est à craindre compte tenu des sous-estimations initiales et des impondérables propres à ce type de programmes pour lesquels aucun risque ne peut être pris du fait de la présence humaine.

Par ailleurs, dans un contexte économique extrêmement contraint, il est pratiquement impossible d'obtenir une garantie de croissance aussi forte des budgets demandés sur une période aussi longue, compte tenu du niveau relatif déjà atteint à l'intérieur du budget public total de R&D. Augmenter encore de quelques points l'importance relative de l'espace dans l'enveloppe recherche apparaît être le maximum de l'accroissement possible des ressources. Au-delà, il ne deviendrait plus possible de justifier la priorité absolue donnée à l'espace par rapport à d'autres secteurs industriels représentant des volumes d'affaires, des emplois et des enjeux sans commune mesure, et qui manquent cruellement de crédits de R&D pour affronter la concurrence internationale.

Le risque d'étouffement budgétaire est donc réel, et de fait, même s'ils ne sont pas de même nature, les programmes liés aux vols habités se trouvent en concurrence budgétaire avec les programmes d'applications. Concernant les perspectives économiques, industrielles et commerciales de l'espace, toute substitution en termes budgétaires de programmes de vols habités aux programmes de développement d'applications, militaires, civiles et scientifiques reviendrait à sacrifier le long terme au profit du court terme. L'avantage immédiat de ce type de programmes est en effet qu'ils fournissent à l'industrie une activité de développement immédiate, importante et garantie à moyen terme, et que cette activité, financée uniquement sur

budgets publics est protégée de la concurrence internationale. Par contre, ils ne débouchent pas sur des perspectives de production et de marchés récurrents.

Jusqu'à présent, les programmes spatiaux civils européens ont été mieux définis et mieux gérés qu'ils ne l'ont été aux Etats-Unis, avec des budgets plus limités mais en croissance rapide et régulière. En rapport avec les budgets affectés, l'impact industriel et commercial de l'espace est très positif en Europe et tout particulièrement en France, qui a su se placer sur les domaines clefs en relation avec des marchés importants : lanceurs, télécommunications, observation de la Terre. En abordant à grande échelle les programmes relatifs aux vols habités, l'Europe doit également trouver sa propre voie d'excellence et tirer les leçons des programmes spatiaux américains, et a fortiori soviétiques, qui ont en partie sacrifié les objectifs de l'espace utile et scientifique à des opérations de pur prestige politique, très valorisantes a priori pour les agences spatiales. La conséquence en a été, dans un second temps, une rupture du soutien populaire et une dégradation de l'image des agences et du secteur.

L'élargissement durable du consensus politique sur les programmes spatiaux européens du futur repose sur une insertion bien identifiée de ceux-ci dans les préoccupations de la société européenne. Cela signifie qu'ils doivent à la fois contribuer à la résolution des problèmes actuels, à tester des solutions nouvelles et à jeter les jalons d'une expansion à plus long terme.

Les possibilités de plus en plus démontrées de la technologie spatiale fournissent de nombreuses opportunités pour répondre à ce défi. Elles justifient amplement la poursuite du soutien au développement des programmes spatiaux à un taux au moins égal à celui des budgets publics de R&D. Le rôle des agences, ESA et CNES, reste en effet déterminant dans le soutien au développement durable de l'industrie et des applications spatiales, et il doit être confirmé. Il serait extrêmement risqué de disperser les compétences dans ce domaine alors que les moyens européens sont limités. Mais parallèlement, ces agences doivent être à même de mieux définir leurs programmes, qui, en termes d'enjeux dépassent maintenant largement la seule communauté spatiale. Ceci suppose que leurs missions soient mieux définies sur le long terme et moins dépendantes de la conjoncture politique. A leur niveau propre, elles doivent également être plus ouvertes, tant par rapport à la communauté scientifique que par rapport à la communauté économique et industrielle, et fonctionner de façon moins auto-centrée, de façon à éviter le risque d'isolement et de rejet constaté dans d'autres pays.

Note biographique

Marc Giget est spécialiste des problèmes de concurrence internationale dans les industries de haute technologie et conseiller auprès de grands groupes industriels. Il a successivement créé le SEST, groupe de recherche sur les problèmes Sociologiques, Economiques et Stratégiques liés aux Techniques nouvelles, puis Euroconsult, société de recherche, d'études et de conseil sur les industries de hautes technologies.

La branche Ecospace d'Euroconsult est spécialisée au niveau international dans tous les aspects économiques liés au développement spatial, avec une centaine de clients (entreprises, agences spatiales, opérateurs, organismes de tutelle) dans 23 pays.

Dans ce cadre, Marc Giget a réalisé de nombreux travaux d'expertise et d'évaluation économiques sur le secteur spatial, pour les entreprises concernées et des organismes publics, dont l'Office d'Evaluation Technologique du Congrès américain (sur la coopération internationale dans l'espace et la Space Station), l'ESA (sur la réduction du coût des satellites et la compétitivité de l'industrie spatiale européenne), la Commission des Communautés Européennes (sur le développement des applications d'observation de la terre) et l'OCDE (sur la concurrence entre satellites et des fibres optiques).

Organismes

A.I.A.	Aerospace Industries Association of America
ASI	Agenzia Spaziale Italiana
B.M.F.T.	Bundesminister für Forschung und Technologie (Allemagne)
C.B.O.	Congressional Budget Office (USA).
C.C.E.	Commission des Communautés Européennes
C.D.T.I.	Centre de Développement des Technologies Industrielles
C.E.A.	Commissariat à l'Énergie Atomique (France)
C.N.E.S.	Centre National d'Études Spatiales (France)
C.P.E. M.R.I.	Centre de Prospective et d'Étude Ministère de la Recherche (France)
DARA	Deutsche Agentur für Raumfahrtangelegenheiten
D.G.E.	Direction Générale à l'Espace
D.L.R.	Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt
D.o.C.	Department of Commerce
D.o.D.	Department of Defense (USA)
E.L.D.O.	European Launcher Development Organization
E.S.A.	European Space Agency
E.S.R.O.	European Space Research Organization
E.S.T.E.C.	European Space Research and Technology Center
G.A.O.	General Accounting Office (USA)
G.I.F.A.S.	Groupement des Industries Françaises Aéronautiques et Spatiales
MIT	Massachusetts Institute of Technology (USA)
M.I.T.I.	Ministry of International Trade and Industry (Japon)
N.A.S.	National Academy of Science
N.A.S.A.	National Aeronautics and Space Administration
N.A.S.D.A.	National Space Development Agency (Japon)
N.H.K.	Nippon Hoso Kyokai
N.O.A.A.	National Oceanic and Atmospheric Administration (USA)
N.R.C.	National Research Council (USA)
N.S.F.	National Science Foundation
NTT	Nippon Telegraph and Telephone Corporation
O.C.D.E.	Organisation de Coopération et de Développement Economique
O.T.A.	Office of Technology Assessment (USA)
O.T.A.N.	Organisation du Traité de L'Atlantique Nord
U.E.O.	Union de l'Europe Occidentale
U.S.A.F.	United States Air Force

Systèmes spatiaux / Programmes

A.C.T.S.	Advanced Communications Technologies Satellite (USA)
B.S.	Broadcasting Satellite (Japon)
B.S.B.	British Satellite Broadcasting
BSS	Broadcasting Satellite Services
COMET	Commercial Experiment Transporter (USA)
D.R.S.	Data Relay Satellite
E.C.S.	European Communication Satellite
E.C.S.	Experimental Communication Satellite (Japon)
EOS	Earth Observing System
J.E.R.S.	Japan Earth Resources Satellite
E.T.S.	Engineering Test Satellite (Japon)
GARP	Global Atmospheric Research Program
GIS	Geographic Information System
G.M.S.	Geostationary Meteorological System (Japon)
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite (USA)
MARECS	Maritime European Communications Satellites

MOS	Marine Observation Satellite (Japon)
NASP	National Aerospace Plane (USA)
O.M.V.	Orbital Maneuvering Vehicle (USA)
O.T.S.	Orbital Test Satellite (USA)
SPOT	Système Probatoire d'Observation de la Terre (France)
S.T.S.	Space Transport System (USA)
T.D.R.S.S.	Tracking and Data Relay Satellite System (USA)
TOP	Tube à Ondes Progressives
TVRO	TV Receiver Only
VSAT	Very Small Aperture Terminal

Divers

D.M.	Deutsche Mark
E.C.U.	European Currency Unit
G7	Groupe des 7 pays les plus industrialisés
P.L.T.	Plan spatial à Long Terme
P.N.B.	Produit National Brut
R&D	Recherche et Développement