

-- Deuxième édition (novembre 1993) --

LES ENFANTS DE L'ESPACE



Guide élémentaire
pour la deuxième génération
d'un monde solarien

par Guy Pignolet de Sainte Rose

Préface de Jacques-Louis Lions
Ancien Président du CNES

LES ENFANTS DE L'ESPACE

Guide élémentaire
pour la deuxième génération
d'un monde solarien

Ingénieur de l'Aventure, l'auteur a déjà vécu à travers trois carrières professionnelles : prospecteur de pétrole, puis professeur de collège, puis éducateur spatial et chercheur.

Dans ce livre qui s'ouvre au rêve tout en sachant rejeter le délire fantastique, qui s'appuie sur une technicité réelle tout en évitant les visions routinières, l'auteur a présenté pour la première fois en France une perspective cohérente de la place de l'homme dans le système solaire, avec l'explication des trajectoires cosmiques, le rôle des stations orbitales, les usines lunaires, l'électricité de l'espace, et la chasse aux astéroïdes.

Ce livre, une synthèse prospective et éducative à la dimension d'une étoile, est destiné à tous ceux qui veulent mieux comprendre l'aventure formidable dans laquelle nous sommes embarqués et il est plus particulièrement dédié à tous les jeunes qui dans un quart de siècle seront, sur Terre ou dans l'Espace, les bâtisseurs de ce nouveau monde.

Il a été publié une première fois aux Editions du Rocher en 1986 sous le titre "La Conquête Industrielle du Système Solaire", dans la collection "Sciences et Découvertes". Entre 1986 et 1990, plus de 4000 exemplaires ont été vendus en librairie. En mai 1990, le stock de l'éditeur a été détruit dans le grand incendie qui a ravagé les entrepôts des Presses de la Cité. Cette deuxième édition est entièrement réactualisée.

Guy Pignolet de Sainte Rose

14 Chemin des Jardins - 97439 Sainte Rose

Ingénieur au Centre National d'Etudes Spatiales,
Ancien Président du Comité Education
de la Fédération Astronautique Internationale,
Secrétaire de la Société Française de Transport d'Energie Sans Fil

PREFACE

Guy Pignolet, ancien élève de l'Ecole Polytechnique, Ingénieur au CNES, présente ici un panorama des sciences et des applications spatiales.

Dans son ouvrage, court et bien présenté, l'auteur réussit à bien situer le sujet dans le contexte global des sciences et des techniques. Il en montre les divers aspects, qui associent les vieux rêves de l'Humanité à des considérations purement économiques; la recherche fondamentale y côtoie la politique, les vastes synthèses conceptuelles vont de pair avec les détails techniques.

L'auteur, passionné de pédagogie, communique au lecteur son enthousiasme, sa fougue; ses points de vues sont parfois extrêmes mais toujours généreux. Il a eu visiblement un grand plaisir à écrire ce livre. Je suis persuadé que le lecteur trouvera un égal plaisir à le lire !

Jacques-Louis Lions
Président du CNES

LES ENFANTS DE L'ESPACE

Panoramas et Ouverture

Cosmonautes	5
Impesanteur	5
Gravitation	6
Trajectoires	9
Partir	11
Réactions	14
Ouvertures	17
Limites	20

Conquêtes et Territoires

Exploration	21
Positions	22
Regards	22
Miroirs	23
Ressources	27
Richesses	28
Energie	29
La Lune	32
Minerais	34
Partir (bis)	36
Génie Chimique	38
Astéroïdes	39
Minerais (bis)	41

Aménagements pour un Nouveau Monde

Perceptions	44
Tête de Pont	46
Transports	52
La Lune (bis)	57
Astéroïdes (bis)	62
Usines et Centrales	67
Cités Spatiales	73
La Crise et la Vie	77

<i>Glossaire</i>	81
<i>Bibliographie</i>	83

Première Partie :

PANORAMAS ET OUVERTURES

A la première génération, on va pour voir, et à la deuxième, on s'installe dans la vie.

COSMONAUTES

"Moi, quand je serai grand, je serai cosmonaute...". Toi, jeune homme, jeune femme qui lis ces lignes, quel que soit l'âge de tes artères, car la jeunesse est affaire d'état d'esprit et d'enthousiasme, toi, jeune personne de ce pré-vingt-et-unième siècle, sache que tu es déjà, aujourd'hui, cosmonaute d'une certaine manière.

Nous sommes tous déjà cosmonautes, tous nous sommes des voyageurs de l'Espace. Non seulement à 30 km/s, nous sommes emportés par notre vaisseau spatial Terre dans sa ronde annuelle autour du Soleil, mais aussi, chaque fois que nous faisons un bond sur nos deux pieds, nous échappons à la pesanteur, et nous faisons pendant un court instant cette expérience de flotter dans l'espace, nous vivons cet état d'impesanteur que les cosmonautes ressentent de manière permanente dans leurs stations orbitales...

IMPESANTEUR

Il est facile de comprendre le phénomène d'impesanteur (on dit maintenant *impesanteur* à la place de l'ancien terme *apesanteur* pour éviter les confusions phonétiques), si l'on comprend bien ce qu'est la pesanteur. Dans le mot *pesanteur*, il y a le terme *peser*, synonyme de *appuyer*. Il y a pesanteur lorsqu'il y a appui, et impesanteur en l'absence d'appui. L'homme debout, couché, assis, sur la Terre, est en état de pesanteur parce qu'il prend appui sur le sol, sur son lit, ou sur sa chaise. L'homme qui saute à pieds joints ne s'appuie sur rien pendant la durée de son saut et il est donc en état d'impesanteur. Le phénomène est facile à vérifier : pendant un saut sur place, les vêtements se mettent à flotter autour du corps, et le poids des objets que l'on tient disparaît jusqu'au

moment où l'on touche le sol à nouveau. Pendant un tel saut, l'état d'impesanteur dure environ une demi-seconde, et c'est court, trop court, pour qu'à moins d'en être averti, on puisse généralement y prêter attention. Jusqu'à ce qu'on le lui fasse remarquer, Monsieur Jourdain ne savait pas qu'il faisait de la prose. De même, bien qu'en général nous n'en soyons pas conscients, nous avons tous volé en impesanteur. C'est une impesanteur réelle, un avant goût du cosmos.

On peut augmenter la durée du phénomène en utilisant un trampoline, en suivant une trajectoire parabolique à bord d'un avion, et vivre ainsi jusqu'à quelques dizaines de secondes en impesanteur. Hector, le petit rongeur français qui dans les années 60 vola à bord d'une fusée Véronique, resta quelques minutes en impesanteur lors de son vol suborbital. Pour les longues durées, il n'y a qu'un seul moyen : c'est la mise sur orbite autour de la Terre. Alors, il est possible de passer des heures, des jours, et des mois sans appui, et donc sans pesanteur.

Rien à voir, donc avec une croyance souvent répandue dans le public, et renforcée par quelques mauvais films, selon laquelle il suffirait de mettre un scaphandre et de faire le vide pour échapper à la pesanteur. L'impesanteur n'a aucun lien direct avec le vide. Il y a également souvent confusion entre pesanteur et gravitation, mais il faut bien séparer les deux notions, et commencer à mieux comprendre le nouveau monde du Système Solaire dont nous sommes désormais les citoyens.

GRAVITATION

Une bonne perception de la nature et des lois universelles du milieu spatial dans lequel nous évoluons est utile. D'abord pour mieux nous situer, puis pour pouvoir progresser avec confiance et assurance dans le nouveau domaine qui nous est désormais ouvert.

La Terre, notre planète, qui tourne sur elle-même en 24 heures (et c'est ce rythme qui règle nos vies), tourne autour de l'étoile Soleil en 365 fois ce temps d'une journée. La Lune accompagne la Terre dans un ballet de 29 jours de période. Et de concert, toutes les autres planètes, leurs dizaines de satellites, et les millions d'astéroïdes, valsent autour du Soleil et autour les uns des autres dans un mouvement essentiellement réglé par les forces de *gravitation*.

Toutes les masses s'attirent mutuellement. Ce phénomène physique de la gravitation universelle, découvert par Newton alors qu'il cherchait à expliquer le mouvement de la chute des pommes, a été vérifié expérimentalement en suspendant à proximité les unes des autres des sphères remplies de mercure, et en mesurant avec une balance de

torsion ultrasensible l'attraction des masses, ou *attraction gravitationnelle*, entre ces sphères.

Cette attraction, qui se traduit par une accélération, dépend de deux facteurs : les masses en présence, et leur distance mutuelle. Elle est proportionnelle à la masse, et inversement proportionnelle au carré de la distance. Elle est universelle, et en tout point de l'univers, une masse est soumise à l'attraction de toutes les autres masses de l'univers. Ainsi, à la surface de la Terre, nous sommes soumis à l'attraction de notre propre planète, mais aussi à l'attraction de la Lune, qui est proche de nous, et du Soleil, plus lointain, mais considérablement plus massif. La Terre étant elle-même globalement attirée par la Lune et le Soleil, nous ne ressentons que la différence en plus ou en moins due à l'écart de distance qu'il peut y avoir entre le point où nous sommes et le centre de gravité de la Terre, par rapport à l'astre considéré. Cette attraction différentielle du Soleil et de la Terre est faible (quelques millièmes de g , g étant la valeur moyenne de l'attraction terrestre à la surface de la Terre), mais elle est la cause essentielle du phénomène des marées.

Les attractions des autres astres du système solaire sont négligeables à l'échelle humaine, et celles des soleils lointains encore plus négligeables, mais ce sont ces attractions qui sont responsables à l'échelle stellaire d'un certain aspect chaotique de l'évolution à long terme du système solaire, et à une échelle plus grande encore, du mouvement général des galaxies.

En orbite basse, l'attraction terrestre est sensiblement la même qu'à la surface, c'est à dire g , une accélération qui vaut environ 9,8 m/s/s (une accélération est un taux de variation de vitesse). La Terre n'étant ni parfaitement homogène, ni parfaitement sphérique, cette accélération varie légèrement selon la position à la surface ou au-dessus de la surface du globe. A la distance de l'*orbite géostationnaire*, soit à 42 000 km du centre de la Terre, là où tournent les satellites de communication, l'attraction est 40 fois plus faible qu'à la surface, et à un million de kilomètres de la Terre, l'accélération qu'elle produit sur un objet n'est plus que un vingt-millionième de ce qu'elle était à la surface. A cette distance, l'effet de l'attraction du Soleil est pratiquement aussi important que celui de l'attraction de la Terre elle-même.

Illustration N°1 : la gravitation universelle

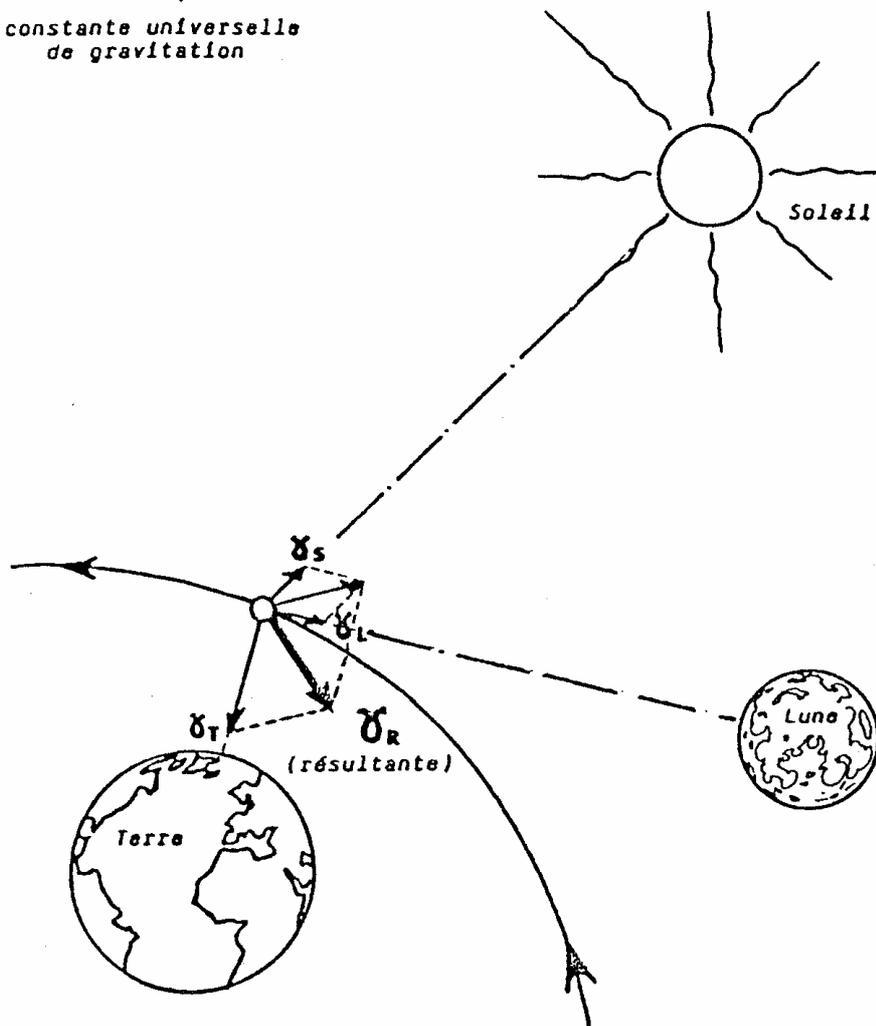
accélération

$$\gamma = G \cdot \frac{M}{D^2}$$

masse de l'astre attracteur

distance

constante universelle
de gravitation



Un corps lancé
dans l'espace est
soumis à l'attraction
de tous les autres corps qui existent
dans l'univers. Son mouvement est
déterminé par l'attraction résultante.

TRAJECTOIRES

Nous voici à un million de kilomètres de la Terre, dans cette zone mal aimée des astronomes, où l'attraction de la Terre cesse d'être prépondérante. Et là, il est utile de clarifier deux notions dont la compréhension est importante pour la navigation astronautique.

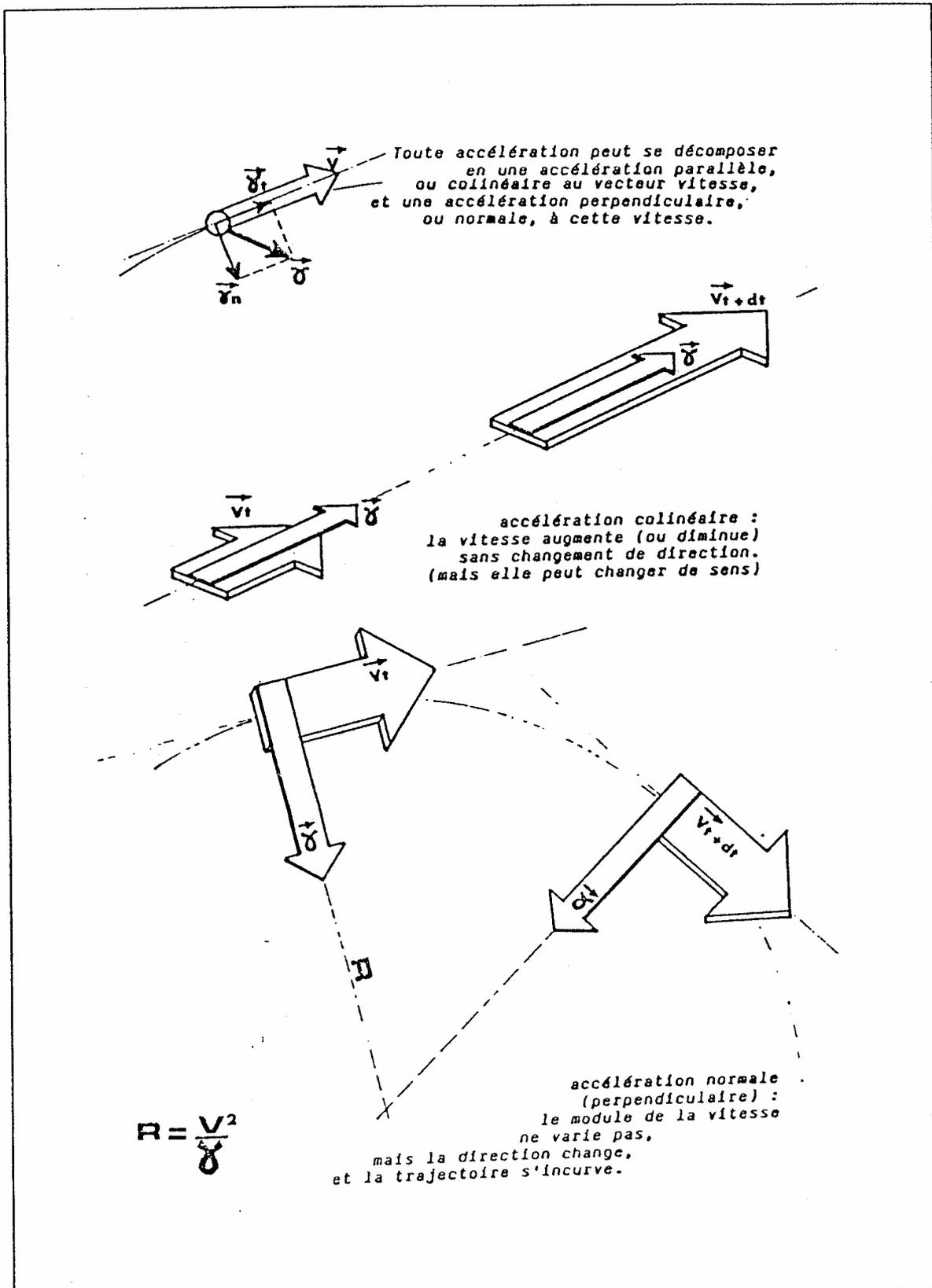
La première, nous l'avons dit, c'est que jamais il n'est possible d'échapper à l'attraction de la Terre, contrairement à ce que l'on peut lire dans certains textes de vulgarisation. Aussi loin que l'on s'en écarte, on reste soumis à l'attraction de la Terre, de plus en plus faible, mais jamais nulle, même à l'autre bout du système solaire.

La deuxième, c'est que les lois de Kepler, célèbres et méconnues à la fois, qui sont à la base des calculs astronomiques, sont des lois théoriques qui ne s'appliquent pas de manière simple à la réalité du cosmos. Les lois de Kepler, qui assigneraient aux astres des trajectoires elliptiques, paraboliques ou hyperboliques selon des règles d'une belle simplicité, supposent l'action d'un corps attracteur unique assimilable à un point. Or ce n'est jamais le cas. Il y a la Terre, la Lune, le Soleil, Jupiter, et les autres corps du système solaire, pour ne pas parler du reste du cosmos.

Les lois de Kepler ont pourtant permis tous les grands progrès de l'astronomie, au prix de fausses suppositions simplificatrices : on a considéré des orbites autour du Soleil, de la Terre, ou d'autres planètes, comme si en première approximation ils étaient seuls dans le cosmos. L'astre ainsi considéré comme principal était le foyer d'attraction autour duquel un satellite choisi décrivait des orbites quasi-elliptiques, et tous les autres corps étaient considérés comme des *perturbateurs*. Un savant *calcul des perturbations* permettait de prédire l'écart entre la trajectoire réelle et l'ellipse de référence. C'est une méthode de calcul puissante, qui a permis à Le Verrier de prévoir l'existence de la planète Neptune des années avant qu'elle ne soit effectivement observée.

Le principal inconvénient de la méthode est d'introduire une notion pratique mais fondamentalement fautive de *sphère d'attraction* d'un astre, qui malheureusement est souvent reprise mal à propos dans une presse scientifiquement mal éduquée. Pour des facilités de calcul, lorsqu'on utilise les équations képlériennes et la méthode des perturbations, jusqu'à un million de kilomètres de distance de la Terre, on considère celle-ci comme l'astre central, et la Lune, le Soleil et les autres corps sont alors des perturbateurs. Puis à partir d'un million de kilomètres, on change de référence, le Soleil devient l'astre central pour les calculs, et la Terre un élément perturbateur. De même, lorsqu'on s'approche à une distance de

Illustration N° 2 : vitesse et accélération



moins de cinquante mille kilomètres de la Lune, dans cette méthode, la Lune est prise comme astre central pour les calculs de trajectoire. Mais les sphères d'attraction n'ont aucune réalité physique.

Les moyens informatiques modernes permettent aujourd'hui de traiter tous les cas que les astronomes laissaient autrefois prudemment dans l'ombre, et pour l'astronautique, ce sont souvent les plus intéressants.

Ce sont en particulier les cas où deux corps du système solaire ont une influence respective à peu près équivalente sur les objets en orbite. Et dans ces cas limites, les trajectoires peuvent prendre la forme d'un haricot, d'un huit, d'un noeud papillon, ou d'une pelote de ficelle avec laquelle on aurait laissé s'amuser un jeune chat. Nous sommes très loin des ellipses de Kepler.

C'est en jouant sur les possibilités offertes par les systèmes à plusieurs corps qu'on peut effectuer des captures, utiliser économiquement les *rebonds gravitationnels* pour, par exemple, tourner autour de Vénus avant d'aller voir la Comète de Halley, ou faire du slalom entre les satellites de Jupiter avec la sonde Galileo.

Le Système Solaire est semblable à un gigantesque billard souple dans lequel le Soleil et les planètes auraient creusé des puits mouvants plus ou moins profonds selon leur masse, autour et entre lesquels satellites et sondes se déplaceraient en suivant un mouvement imposé par les pentes et les creux. La navigation dans le système solaire reste un art, et les astronautes ingénieux ne cessent d'imaginer des stratégies toujours plus astucieuses pour parcourir la banlieue de l'étoile Soleil.

PARTIR

Dans le grand billard des trajectoires cosmiques nous avons le handicap de commencer le voyage à partir du fond d'un puits, et il faut commencer par en sortir.

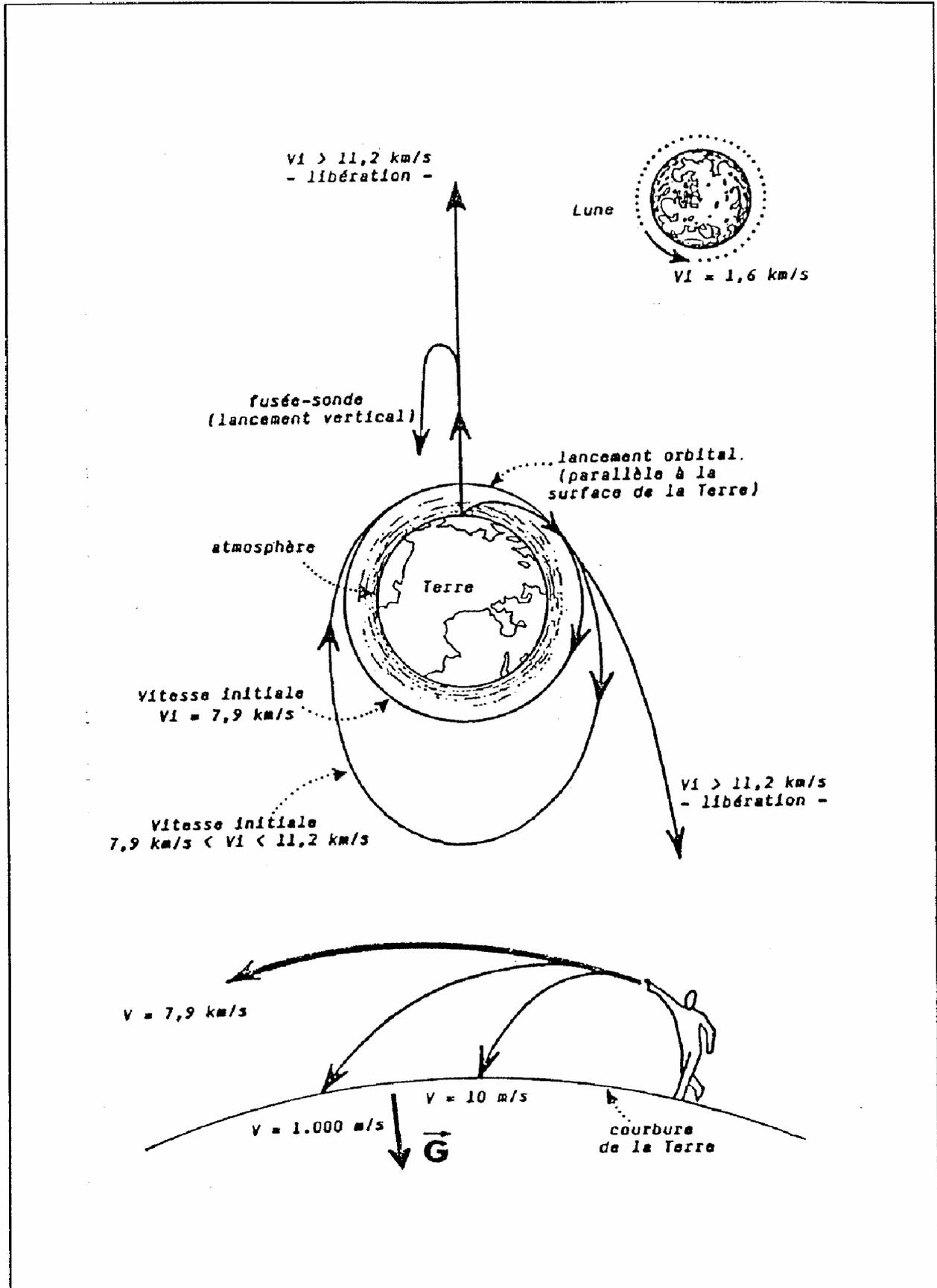
Quand nous faisons un petit bond, nous échappons un instant à la pesanteur. En sautant à pieds joints vers le ciel, par la détente de nos jarrets, nous donnons à notre corps une petite vitesse verticale de quelques mètres par seconde. Tant que nous sommes en appui sur le sol, la réaction de celui-ci équilibre l'attraction de la Terre, mais dès que nous avons décollé, cette dernière attraction ralentit notre vitesse, au taux de 9,8 mètres par seconde pour chaque seconde qui passe. En une petite fraction de seconde, notre vitesse s'annule, puis devient négative,

et environ une demi-seconde après le départ, nous touchons à nouveau le sol : le voyage est terminé.

Il a fallu attendre l'avènement des grands propulseurs à moteur fusée et la possibilité d'accélérer rapidement jusqu'à des vitesses de plusieurs kilomètres par seconde pour que nous puissions enfin nous arracher à la Terre. En décollant verticalement avec des vitesses allant jusqu'à une dizaine de kilomètres par seconde, nous commencerions, comme dans notre petit saut, à nous éloigner de la Terre, mais à ces vitesses considérables ($1 \text{ km/s} = 3\,600 \text{ km/h}$), le temps que notre vitesse décroisse en raison de l'attraction terrestre, nous serions déjà à des distances de la Terre où cette attraction serait devenue plus faible, puisqu'elle décroît comme le carré de la distance et nous pourrions nous élever à des centaines ou des milliers de kilomètres d'altitude avant de retomber vers le sol de notre planète. C'est ce qui se passe avec les fusées sondes. Si la vitesse de départ est égale ou supérieure à la vitesse critique de $11,2 \text{ km/s}$, dite *vitesse de libération* la vitesse reste positive quel que soit l'éloignement atteint, et l'on quitte alors définitivement la Planète Terre.

Il y a une autre méthode pour quitter la surface de la Terre de manière permanente, et qui est plus économique : c'est de se lancer parallèlement à la surface du sol. Dans ce cas, l'attraction de la Terre se manifeste différemment sur la trajectoire de l'objet lancé. Une accélération parallèle à une trajectoire donnée a pour effet de modifier la vitesse le long de cette trajectoire. Une accélération perpendiculaire à une trajectoire ne modifie pas la valeur de la vitesse, mais a pour effet d'incurver la trajectoire dans la direction de l'accélération subie, et de lui donner une courbure proportionnelle à l'accélération et inversement proportionnelle au carré de la vitesse. Si on lance à faible vitesse un objet droit devant soi, l'objet ne va pas en ligne droite : attiré par la Terre, il suit une trajectoire courbe qui l'amène à rencontrer le sol à quelques mètres de distance. Plus la vitesse du lancer sera importante, plus la trajectoire sera tendue, et plus le point de chute sera éloigné, et si l'on lance à une vitesse suffisamment importante, la courbure de la trajectoire finira par être égale ou plus faible que la courbure de la surface de la Terre elle-même. La vitesse de $7,9 \text{ km/s}$ est cette vitesse critique, dite *vitesse de satellisation*, à laquelle un objet va décrire une orbite quasi-circulaire à basse altitude. Plus la vitesse augmentera, et plus la trajectoire s'allongera. Elle deviendra elliptique, avec une apogée qui s'éloignera de plus en plus de la Terre, jusqu'à la vitesse de lancement de $11,2 \text{ km/s}$, que nous retrouvons, et au-delà de laquelle non seulement il n'y a plus de chute, mais également plus de retour vers la Terre.

Illustration N° 3 : mise sur orbite



Tous les objets, tous les satellites mis en orbite autour de la Terre, sont lancés par des engins équipés de moteurs fusées à des vitesses horizontales comprises entre la vitesse de satellisation minimale et la vitesse de libération. Fondamentalement, la mise sur orbite n'est pas une question d'altitude, mais de vitesse horizontale en fin de lancement, parallèlement à la surface de la Terre.

Il existe des petits systèmes de lancement, comme Pegasus, qui sont emportés par des avions le plus haut possible, là où l'air est déjà raréfié, avant de se projeter à la vitesse cosmique sur une trajectoire très inclinée. Mais on voit la majorité des fusées et des navettes décoller à la verticale et non pas à l'horizontale. La raison en est simple : à une vitesse de 8 km/s, dans les couches basses de l'atmosphère, la résistance de l'air serait telle qu'il faudrait affronter un véritable mur. Les lanceurs ont une forme en fuseau, qu'il s'agisse de fusées ou de fuselages, adaptée à la traversée des couches denses de l'atmosphère. Ils commencent par monter presque verticalement pour gagner rapidement une altitude de l'ordre de la centaine de kilomètres où l'air est suffisamment raréfié pour permettre les grandes vitesses, puis ils s'inclinent à l'horizontale pour prendre la vitesse orbitale. A cause de l'atmosphère, les orbites les plus basses possibles autour de la Terre sont à des altitudes qui ne peuvent être inférieures à cent kilomètres au-dessus du sol.

Par contre, autour de la Lune, sans atmosphère, il n'y a pas de limite inférieure d'altitude orbitale, et lors du vol préparatoire des missions Apollo, le module de descente est passé en orbite basse lunaire à quelques kilomètres seulement au-dessus de la surface du sol lunaire. La Lune offre d'autres avantages par rapport à la Terre en matière de mise sur orbite, puisque plus petite, moins massive, elle exerce une attraction plus faible, et les vitesses de satellisation et de libération y sont respectivement de 1,7 km/s et 2,4 km/s seulement. Ceci est capital pour l'avenir de nos activités dans le système solaire.

Ce sont les fusées à réaction qui ont permis d'atteindre la vitesse critique de 7,9 km/s, de faire le bond grâce auquel on peut s'arracher de la Terre. Pour s'élever, pour évoluer, pour atteindre cette vitesse critique à laquelle ne nous convie aucune force naturelle, il faut se propulser, se pousser de l'avant, en prenant appui sur quelque chose. Dans le cas de la propulsion au sol, sur lequel on s'accroche par frottement, dans le cas de la progression dans un milieu fluide au moyen d'une hélice, ce quelque chose sur quoi on s'appuie est le milieu ambiant dont on utilise la résistance ou l'inertie. Au contraire, dans la propulsion par réaction, ce sur quoi on prend appui est la masse de matière qui est éjectée du propulseur lui-même. A la quantité de mouvement que l'on donne à cette masse éjectée correspond une quantité de mouvement opposée, et à

l'action d'éjection correspond une force de réaction en sens opposé. Elle imprime à l'engin une accélération propre, d'autant plus grande que la masse restante sera faible. L'engin purement à réaction n'a besoin d'aucun support extérieur pour se propulser, et peut continuer à accélérer aussi longtemps qu'il peut éjecter de la masse. Un engin à réaction peut atteindre les vitesses de 8 km/s ou plus, alors même que la vitesse relative à laquelle il éjecte sa masse d'appui ne dépasse guère 4 km/s dans les meilleurs cas actuels. Il arrive un moment où la fusée et les gaz éjectés vont dans la même direction par rapport à un observateur resté fixe au point de départ, mais l'engin continue à s'appuyer sur ces gaz en cours d'éjection pour aller encore plus vite de l'avant.

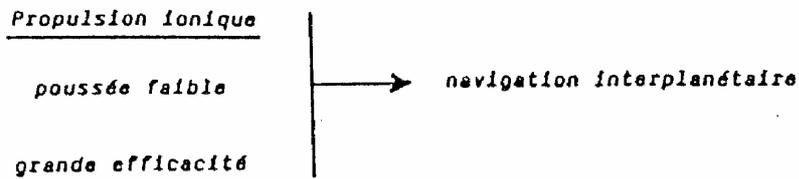
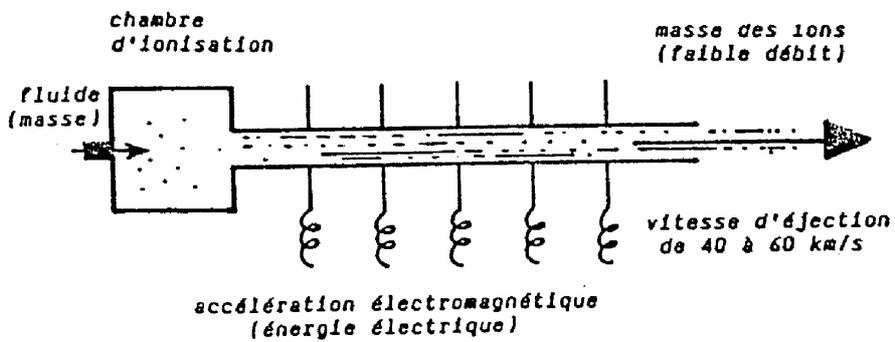
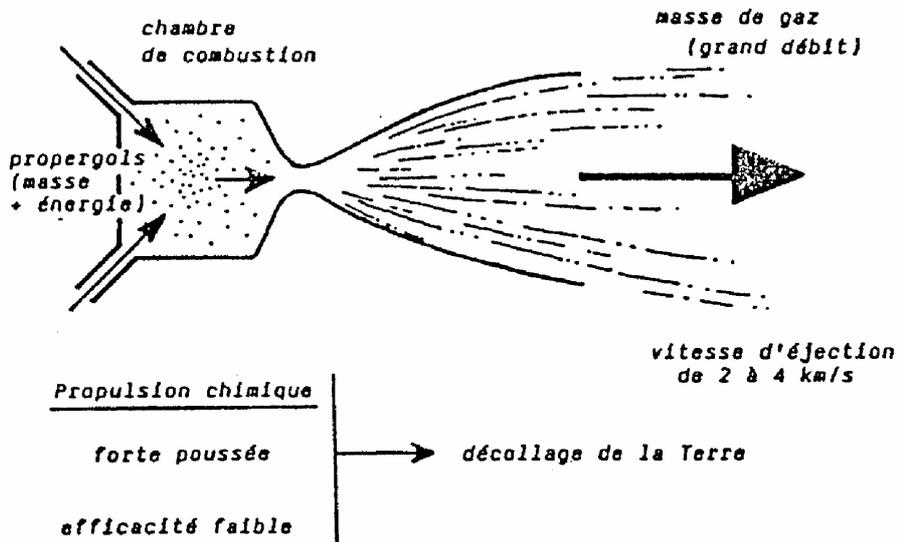
Pour se propulser par réaction il faut donc disposer de deux éléments essentiels et les maîtriser : il faut une masse sur laquelle on peut prendre appui en l'éjectant dans la direction opposée à celle vers laquelle on veut progresser, et il faut de l'énergie pour procéder à cette éjection. La force de propulsion, quant à elle, est proportionnelle d'une part au débit, c'est-à-dire à la quantité de matière éjectée par unité de temps, et d'autre part à la vitesse à laquelle s'effectue cette éjection.

Dans le cas des moteurs fusées à combustion classiques, les deux éléments indispensables de la propulsion par réaction sont obtenus simultanément au cours de la combustion des *ergols*. La réaction chimique produit à la fois une masse de gaz brûlés qui vont pouvoir être expulsés, et un dégagement de chaleur énergétique qui en élevant la pression des gaz dans la chambre de combustion, donne l'énergie nécessaire pour leur éjection à travers la tuyère.

Le grand avantage des moteurs à réaction chimiques fonctionnant par combustion de propergols est de permettre des débits considérables. Au décollage, une fusée Ariane-4 brûle jusqu'à deux tonnes de carburants par seconde, introduits dans la chambre de combustion par des turbo-pompes puissantes. Le grand inconvénient de la propulsion chimique est qu'on ne peut pas utiliser plus d'énergie pour l'éjection que celle qui est déjà au départ contenue dans les liaisons moléculaires des carburants. On est ainsi limité à des vitesses d'éjection de l'ordre de 1,5 km/s pour les moteurs à poudre, de 2,5 km/s pour les mélanges hydrazine et peroxyde d'azote utilisés par les deux premiers étages d'Ariane-4, et 4 km/s environ pour les mélanges hydrogène et oxygène du troisième étage des Ariane-4 ou du moteur principal d'Ariane-5.

Il existe d'autres types de moteurs à réaction, où masse éjectée et énergie d'éjection sont apportées séparément. Dans les catapultes à réaction, des masses solides compactes sont éjectées à cadence régulière par des moyens mécaniques, ou mieux, électromagnétiques,

Illustration N° 4 : propulsion par réaction



$$\text{Poussée} = \text{Débit} \times \text{Vitesse d'éjection}$$

en faisant appel à des techniques dérivées de celles des moteurs électriques linéaires.

Dans les propulseurs à réaction ioniques, la masse à éjecter est préparée sous forme de *plasma*, ce quatrième état de la matière au-delà du solide, du liquide et du gaz, dans lequel les atomes se retrouvent sous forme d'ions porteurs d'une charge électrique. Il est alors possible d'avoir prise à distance sur ces ions grâce à des champs électromagnétiques tout au long d'un canon d'éjection, et de leur communiquer ainsi des énergies et donc des vitesses qui sont importantes. Par ce moyen, on peut assez facilement atteindre des vitesses d'éjection de l'ordre de 40 à 60 km/s, 10 à 15 fois plus grandes que dans les meilleurs réacteurs à combustion.

Plus vite encore, on peut envisager le mouvement de réaction sous le choc et le rebond des particules de lumière, les photons. La masse des grains de lumière est nulle, mais à la vitesse relativiste de 300 000 km/s ils ont néanmoins une quantité de mouvement propre. La propulsion photonique offre des poussées très faibles, mais que l'on obtient sans aucune consommation d'ergols.

Intermédiaires entre la propulsion chimique et la propulsion photonique, les propulseurs ioniques peuvent facilement être 10 à 15 fois plus efficaces que les meilleurs moteurs fusées classiques puisque pour une même force propulsive, leur consommation en carburant sera divisée par ce même facteur. Leur seul défaut reste d'avoir des débits beaucoup plus faibles que les moteurs chimiques, et donc, à masse propulsée égale, des accélérations également beaucoup plus faibles. Ce qui veut dire que pour atteindre les écarts de vitesse, les delta-V, demandés par la navigation astronautique, ils doivent fonctionner pendant beaucoup plus longtemps. Cette durée n'offre aucun inconvénient lorsqu'un engin est en train de se mouvoir librement dans l'espace interplanétaire, et les moteurs ioniques ont un grand avenir dans la propulsion cosmique.

Par contre, au décollage de la Terre, on ne dispose que de quelques minutes seulement pour atteindre la vitesse critique de satellisation, ce qui nécessite des accélérations puissantes. Pendant longtemps encore, il est probable que l'on continuera de s'arracher à la Terre au moyen de puissants moteurs fonctionnant par réaction sur des produits de combustion, qui continueront à élever les engins dans un crachement de gigantesques flammes.

OUVERTURES

Le 4 octobre 1957, le monde s'était réveillé frappé de stupeur : un satellite, une lune artificielle, lancée par l'homme, tournait autour de la

Terre. Pour la première fois dans l'histoire de l'humanité, le vieil adage selon lequel tout ce qui monte redescend était pris en défaut.

Mis à part Tsiolkovsky, qui dès le début des années 1900 faisait des calculs réalistes, mis à part Goddard, Oberth, von Braun, Korolev, qui avaient progressé à pas de géant pour préparer les outils de cet exploit, mis à part Alexandre Ananoff et Arthur Clarke, qui en prévoyaient les applications depuis des années, qui d'autre sur Terre avait sérieusement pensé que la frontière du ciel, que l'on croyait inviolable à jamais, serait un jour ouverte ? Le fait était là, la barrière du ciel était franchie, l'homme allait sortir du fond de son puits gravitationnel, les espaces du système solaire étaient désormais physiquement ouverts. Quatre ans après les premiers engins exploratoires, le 12 avril 1961, Youri Gagarine franchissant le pas lui aussi, devenait le premier homme à être sorti de la Terre.

La porte du ciel ouverte, la conquête de l'espace commençait. Avec un plus d'un quart de siècle de recul, nous pouvons voir qu'elle s'est déroulée et continue à se dérouler comme la conquête de tous les nouveaux territoires.

Nous sommes dans la situation d'un petit village où les gens auraient vécu, travaillé, se seraient aimés et se seraient battus, tout en regardant au loin une grande colline qui dominerait le village, mais où personne ne serait jamais allé parce qu'une falaise infranchissable en aurait interdit l'accès.

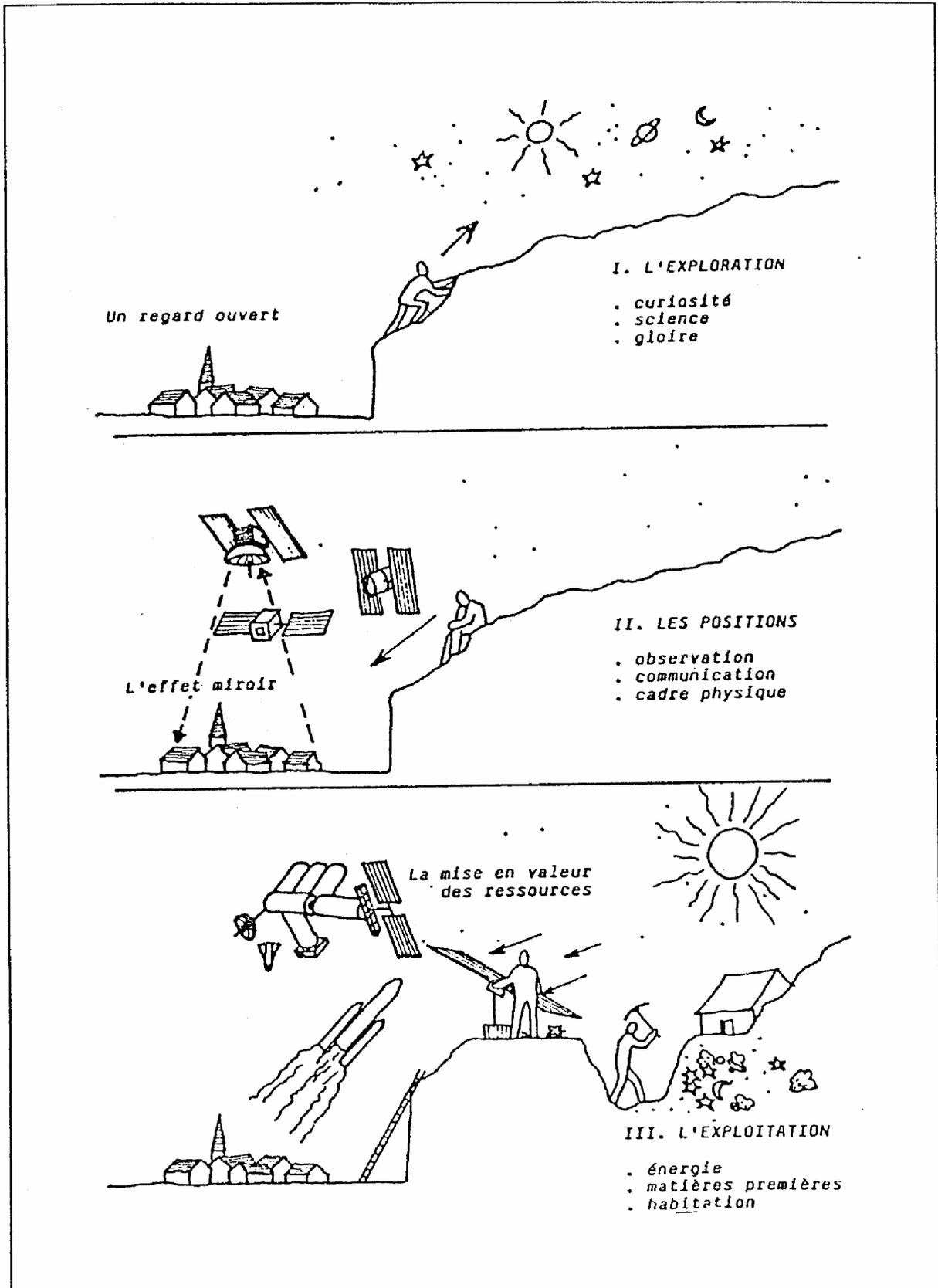
Puisque personne n'a jamais encore foulé le sol de la colline - sait-on même s'il y a un sol ! - l'imagination populaire l'a peuplée de toute une mythologie fantastique, avec des elfes, des fées, et autres dragons, sur lesquels les hommes projettent leurs fantasmes et leurs rêves.

Jusqu'au jour où enfin quelqu'un sait découvrir, à force de génie et d'industrie, l'échelle qui permet d'atteindre le sommet de la falaise. Et passés les premiers moments d'éblouissement et la célébration de l'exploit, on imagine aisément la succession des événements :

D'abord, il y a un temps pour l'exploration, pour la simple curiosité et pour le plaisir des yeux, pour développer une connaissance que l'on peut qualifier de scientifique, mais également pour faire une démonstration de prestige, pour la gloire d'être les premiers à fouler les nouveaux sentiers ou à gravir les sommets. Cette phase d'exploration est celle d'un regard nouveau, dirigé vers l'extérieur.

Puis le regard se retourne vers le point de départ, et découvre alors qu'il dispose de nouveaux points de vues, privilégiés, sur un monde que

Illustration N° 5 : les phases de la conquête



l'on croyait déjà bien connaître. Des points de vues pour regarder, écouter, pour retransmettre des signaux, pour observer, localiser, et compter les biens et les ressources des uns et des autres, et également pour surveiller, prévenir ou secourir les accidents, contrôler les mouvements des amis ou des ennemis. Les militaires en particulier ont toujours aimé les positions élevées qu'ils considèrent comme des endroits stratégiques.

Ensuite, passé le temps des simples regards, vient le temps de retrousser les manches, de prendre des pelles et des pioches, des haches, des scies et des marteaux, et de mettre en exploitation les ressources naturelles offertes par les nouveaux territoires. C'est le moment de partir à la recherche des trésors laissés par les petits nains ou le Père Noël qui entre temps ont déménagé pour d'autres ailleurs, et c'est aussi le temps de maîtriser le flot des énergies. Des chantiers et des campements s'installent, jusqu'au jour où l'on voit apparaître un, puis deux, puis de nombreux villages nouveaux, fruits de l'expansion humaine dans un territoire autrefois considéré comme à jamais inaccessible.

Ce schéma est celui de toutes les nouvelles conquêtes, et nous le voyons se dérouler une nouvelle fois pour la conquête du plus grand des domaines qui nous soient ouverts à ce jour, celui du système solaire.

LIMITES

Il convient maintenant de préciser les limites de ces nouveaux territoires qui sont devenus nôtres, car le mot *espace* est l'un des plus forts de la langue française, aux significations les plus variées.

L'espace dont nous parlons, celui que nous sommes en train de conquérir, c'est celui de la banlieue de l'étoile Soleil, un domaine grand de quelques milliards de kilomètres, mais guère plus. Le système solaire est un grain de poussière aux dimensions de la Galaxie, et entre les dernières grandes planètes du Soleil et les étoiles extérieures les plus proches, il y a une nouvelle barrière aujourd'hui infranchissable et qui le restera peut-être longtemps : au-delà des dernières planètes, le vide interstellaire est mille fois plus vide que le vide interplanétaire, et les étoiles les plus proches sont cent mille fois plus loin de nous que les orbites de Jupiter ou de Saturne. Décrocher la Lune, nous l'avons fait : plus de quatre cents kilogrammes de roches lunaires ont été rapportées sur la Terre par les cosmonautes ou par les sondes automatiques. Le système solaire est entré dans notre vécu, mais la conquête des autres étoiles reste un rêve utopique : avant que nous ne touchions à Andromède, le vent solaire aura le temps de souffler bien des comètes.

Deuxième partie :

CONQUETES ET TERRITOIRES

*Tous ceux qui ont été nourris
par la lecture de Spirou et
qui connaissent Champignac
savent bien que, quand
un nouveau domaine est
devenu accessible, la main de
l'homme ne résiste jamais
à l'envie d'y mettre le pied.*

EXPLORATION

Depuis 1957, plus de six mille engins et véhicules ont quitté la Terre. Dans un premier temps, nous avons vu se déployer tous les aspects de l'exploration, les grandes premières scientifiques et techniques, les images de la face cachée de la Lune ou de la surface des planètes, l'homme et les voitures sur la Lune, les robots sur Vénus et sur Mars, la découverte des volcans sulfureux de Io, la traversée des anneaux de Saturne, d'Uranus et de Neptune, l'astronomie infrarouge, ultraviolette et gamma, les premiers survols de comètes et d'astéroïdes.

Une moisson de renseignements colossale a complètement transformé notre vision du système solaire, même si nous n'y avons pas trouvé les traces d'une autre vie, comme nous l'avions espéré. Nous avons eu des surprises : Vénus s'est révélée être un enfer torride, nous avons découvert sur Mars les traces d'anciennes rivières et le plus grand volcan du monde, Jupiter et les autres planètes extérieures nous ont montré des essaims de satellites d'une complexité formidable.

Mais à peine plus d'une centaine d'engins ont atteint ou dépassé la distance de la Lune. Tous les autres sont restés sur des orbites proches de la Terre, satellites expérimentaux ou scientifiques, engins pour la préparation et la réalisation des vols habités, satellites utilitaires pour l'observation de la notre planète sous toutes ses formes et pour les communications civiles et militaires.

POSITIONS

Au début des années 60, après des premiers essais de réflexion passive des ondes sur des ballons lancés en orbite, le célèbre satellite Telstar relaya activement dans l'espace et pour la première fois des communications son et image entre deux points de la Terre, inaugurant ainsi, après la simple exploration, la deuxième phase de la conquête de l'espace, celle d'une utilisation pratique des positions privilégiées qu'offrent les orbites qui survolent la Terre.

Aujourd'hui, un certain nombre de satellites de communication, en particulier militaires, tournent encore en orbite basse, mais la position de choix est l'occupation d'un créneau sur l'orbite géostationnaire, qui à 36 000 kilomètres d'altitude, fait une magnifique ceinture imaginaire au-dessus de l'équateur de notre planète.

Quant aux orbites basses, en dessous de 1 000 kilomètres d'altitude, elles restent le domaine privilégié des satellites d'observation.

REGARDS

En orbite basse, un satellite fait le tour de la Terre en une heure et demie environ ! Quel avantage colossal pour mener une observation systématique de notre planète. Si l'orbite du satellite se situe dans un plan qui passe par les régions polaires, alors la Terre, qui tourne sur elle-même, défile entièrement en 12 heures sous les traces du satellite.

En première approximation, l'attraction de la Terre sur le satellite est assimilable à l'attraction par un point situé au centre de la Terre, où serait concentrée toute la masse de la planète. Le rayon vecteur qui relie ce point central au satellite et la direction du vecteur vitesse de ce satellite déterminent un plan qui contient la trajectoire du satellite. En première approximation également, ce plan est fixe par rapport au système de référence des étoiles. Un satellite sur orbite polaire balaye pendant trois quarts d'heure une bande de quelques milliers de kilomètres de large dans le sens nord-sud, puis pendant les trois quarts d'heure suivants, une bande située pratiquement à l'opposé sur le globe terrestre, dans le sens sud-nord. Lorsque l'orbite suivante commence, la Terre a tourné entre temps, et le satellite commence à balayer une bande voisine.

Si on regarde de plus près les mouvements orbitaux, la Terre n'est ni parfaitement sphérique, ni parfaitement homogène, et son attraction sur un satellite ne peut être ramenée à l'attraction d'un point central. Toutes les irrégularités sont causes de perturbations qui plus ou moins rapidement font évoluer l'orbite. La première application est scientifique :

en suivant avec précision toutes les perturbations des satellites *géodésiques*, par télémétrie laser, on peut améliorer notre connaissance des formes et des mouvements de la Terre. La deuxième application est pratique. Sur une orbite légèrement inclinée par rapport à l'axe des pôles, le renflement équatorial de la Terre a pour effet de faire tourner lentement le plan de l'orbite du satellite autour de cet axe des pôles.

En choisissant judicieusement l'inclinaison de l'orbite, on peut ajuster le rythme de la rotation pour qu'elle soit exactement d'un tour en trois cents soixante cinq jours. Le plan de l'orbite du satellite, en évoluant par rapport au Soleil au même rythme que la Terre, garde une attitude relative constante par rapport à notre étoile, et on dit que l'orbite est *héliosynchrone*, ce qui est par exemple le cas pour les satellites d'observation *SPOT* et *ERS*. Toute l'année, tel satellite héliosynchrone descendra un méridien du nord au sud à 10 heures locales, et remontera du sud au nord à 22 heures locales, alors que tel autre satellite survolera la Terre en permanence à midi ou à minuit, en temps local pour les zones survolées. Cette constance d'attitude facilite les comparaisons entre les clichés de la Terre pris à différentes dates, qui sont donc tous pris sous un même angle d'éclairage par le Soleil.

Toutes ces observations servent utilement la cartographie de notre planète, la recherche de ressources naturelles, l'évaluation et le suivi des récoltes, la planification urbaine, sans compter l'observation à des fins militaires, grosse utilisatrice de satellites, tant du côté américain que du côté de l'ex-URSS, en attendant les futurs satellites militaires européens.

Le balayage systématique de la Terre permet aussi une collecte rapide de données diverses grâce au système *ARGOS*. Ce système fait appel à des petites balises émettrices et à tout un réseau de satellites relais pour permettre le suivi de phénomènes naturels, la localisation d'équipements mobiles ou embarqués, à peu de frais, et avec des délais de seulement quelques heures. Dérivé du système *ARGOS*, le système mondial d'alerte et de secours *SARSAT-COSPAS* permet de déclencher très rapidement les opérations de sauvetage des navires, des avions, ou des expéditions en difficulté, et a permis depuis sa mise en service, de sauver plusieurs centaines de vies humaines grâce à cette rapidité qui augmente considérablement les chances de survie.

Quant au système de navigation *GPS* (Global Positioning System), basé sur un autre réseau de satellites, il est en passe de remplacer complètement le sextant traditionnel et les autres systèmes de radio-navigation sur tous les navires du monde.

MIROIRS

Lorsqu'on s'éloigne de l'orbite basse, les communications deviennent plus difficiles, la qualité de définition des observations diminue, mais comme on est plus loin, la zone observée à un instant donné grandit considérablement. On peut examiner ce qui se passe quand un satellite se trouve sur des orbites de plus en plus hautes.

L'attraction terrestre est plus faible, puisqu'elle varie inversement avec le carré de la distance. La courbure de la trajectoire est également plus faible, puisque le rayon est plus grand, et donc la vitesse nécessaire pour décrire cette orbite, qui dépend de l'attraction et de la courbure, est elle aussi plus faible.

La circonférence est plus longue, la vitesse est plus faible, il en résulte que le temps nécessaire pour décrire une orbite augmente rapidement en fonction de la distance à la Terre. En orbite basse, à 7 000 km environ du centre de la Terre, la vitesse orbitale est d'environ 8 km/s, et l'orbite est décrite en une heure et demie. A 380 000 km de la Terre, la Lune parcourt son orbite à la vitesse de 1 km/s, et il lui faut 29 jours pour faire le tour.

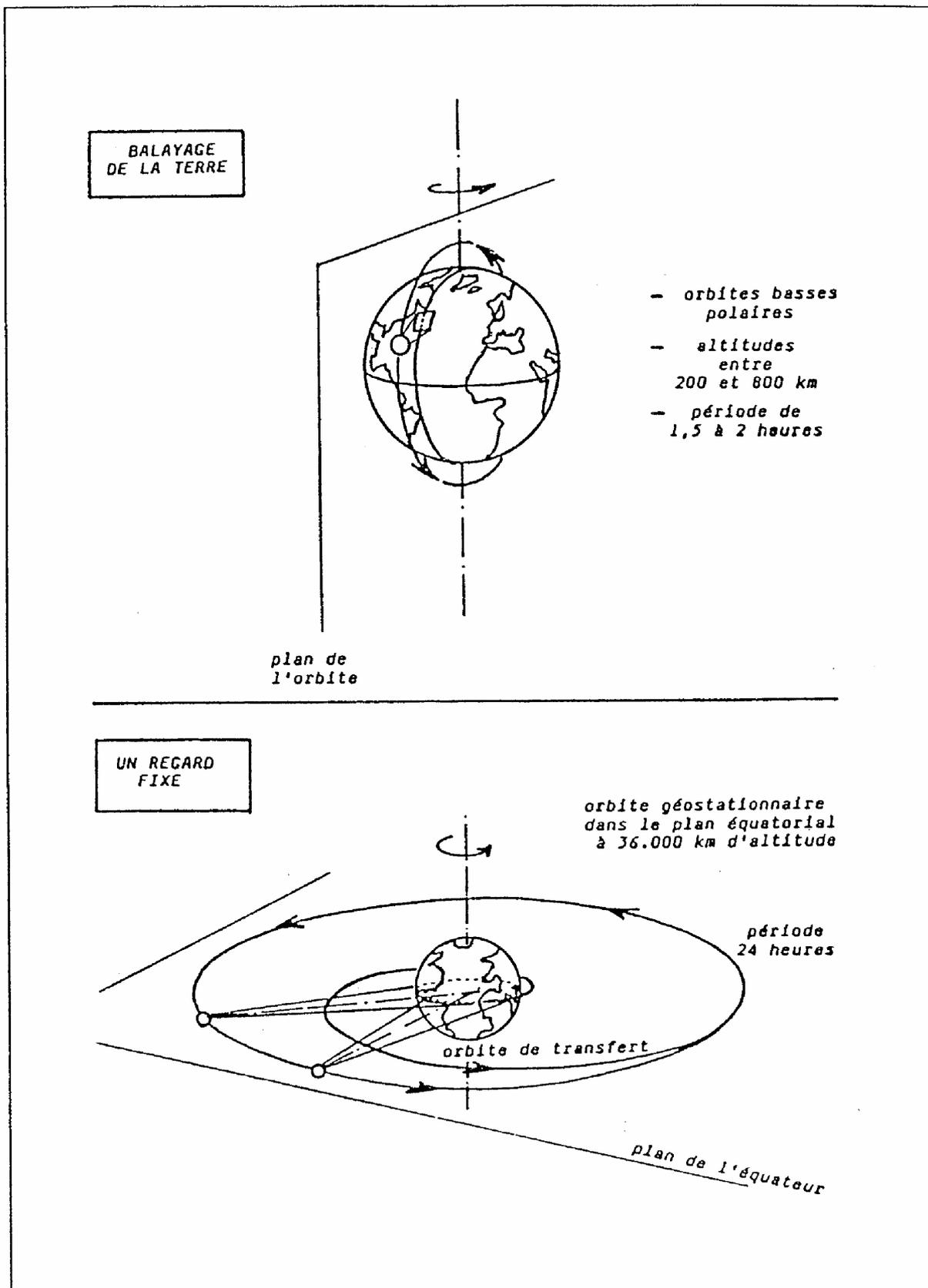
Entre les deux, à 36 000 km d'altitude, soit 42 000 km du centre de la Terre, la vitesse orbitale circulaire est de 3 km/s, valeur remarquable, puisque pour décrire les 264 000 km de l'orbite, il faut exactement 24 heures. Un satellite tournant à cette altitude est donc *géosynchrone*, et tourne au même rythme que la Terre.

Il n'est pas nécessairement géostationnaire pour autant. On peut imaginer un satellite hypothétique tournant à 42 000 km du centre de la Terre dans un plan passant par l'axe des pôles. Il passerait au-dessus du pôle Nord. 12 heures plus tard, il survolerait le pôle Sud. 24 heures plus tard, il serait à nouveau au-dessus du pôle Nord. Et la Terre ayant exactement fait un tour sur elle-même entre temps, le satellite repasserait au-dessus des mêmes points, de la même trace, à chaque orbite.

Pour qu'un satellite apparaisse stationnaire par rapport à la Terre, il faut non seulement qu'il soit géosynchrone, mais aussi que son orbite soit dans le plan de l'équateur. Il y a donc une seule orbite géostationnaire, sorte de ceinture autour de l'équateur, sur laquelle se suivent à intervalles déterminés tous les satellites qui veulent bénéficier de cette situation privilégiée.

De l'orbite géostationnaire, on peut regarder en permanence près du tiers de la surface de la Terre. Météosat et plusieurs autres satellites géostationnaires répartis autour de la Terre permettent d'observer

Illustration N° 6 : observation et communication



l'atmosphère et son évolution. Ces satellites météorologiques sont la clé du système qui permet aujourd'hui de prédire avec une bonne précision le temps qu'il fera plusieurs jours à l'avance.

Si on peut voir, on peut aussi écouter, transmettre, relayer. Les occupants les plus importants et les mieux connus de l'orbite géostationnaire sont les satellites de communication, pour relayer le téléphone, la télévision, la télématique, ou la radiodiffusion, entre les continents et même entre les différents points d'une même région. *SYMPHONIE*, *TELECOM*, *ECS*, *OLYMPUS*, ont été et sont les plus beaux fleurons de toute une panoplie qui, éventuellement par le jeu d'un double relais, met tout point de la Terre à moins d'une demi-seconde de tout autre point. Trois organisations internationales, *INTELSAT*, *INMARSAT* et *INTERSPOUTNIK*, auxquelles participent la plupart des nations de la planète, organisent et régissent le tissu de communications qui entoure la Terre comme un cocon.

L'orbite géostationnaire offre des points de vue exceptionnels vers la Planète Terre, mais c'est un site limité et encombré. Ce n'est qu'une ligne circulaire de 260 000 km de long, que les satellites doivent se partager en faisant bon voisinage. Comme pour les émetteurs de la bande FM radio, le spectre des fréquences utilisées par les satellites est limité, et sous peine de brouillage mutuel, les satellites doivent respecter entre eux un espacement minimal de l'ordre du millier de kilomètres : il y a donc de la place pour au maximum 260 satellites environ sur l'orbite géostationnaire, et la portion qui se trouve au-dessus de l'Océan Atlantique, et qui sert au relais entre l'Europe et les Amériques, est déjà pratiquement saturée.

Deux options sont actuellement en développement pour s'accommoder de ce problème sérieux : une montée vers des fréquences radio plus élevées permettant d'élargir les bandes de transmission utilisables est possible, mais techniquement complexe. La solution la plus évidente ne passe plus par les satellites, mais par la multiplication des câbles de communication, en particulier à fibres optiques, pour les communications de point à point, ce qui libère les satellites au profit de la communication avec les mobiles, avions, navires, ou avec les sites géographiquement isolés.

Actuellement les communications transatlantiques se répartissent environ par moitié entre les câbles et les satellites. Les premiers câbles transatlantiques à fibres optiques mis en service ont chacun la capacité de trois satellites de communication. Ceux-ci vont perdre leur rôle de relais principal pour être le recours du câble en cas de panne de ce dernier.

Cela ne signifie pas la fin des satellites de communication géostationnaires. Simplement, leurs rôles vont se diversifier et s'orienter vers des applications plus spécialisées. En même temps, ces satellites seront vraisemblablement plus gros, interconnectés directement les uns aux autres par rayon laser, et ils comporteront à bord de nombreuses fonctions de commutation actuellement assurées par des installations au sol. Entre autres conséquences probables et remarquables, la montre-bracelet servant aussi de téléphone intercontinental que l'on a vue dans les bandes dessinées de science-fiction est peut-être pour le tournant du siècle, c'est-à-dire dans quelques années à peine.

RESSOURCES

Il y a guère plus d'un siècle, soit trois fois le temps écoulé depuis le lancement du premier spoutnik, la Californie connut une période mémorable de ruée vers l'or, peu de temps après l'ouverture de la route du Far-West :

L'homme, chaque fois qu'il a eu accès à un nouveau territoire, après avoir satisfait sa curiosité, et s'être installé aux points stratégiques, a toujours très vite cherché à en exploiter les richesses naturelles, qu'il s'agisse de minerais précieux, de sources d'énergie, ou de terres à cultiver.

Mais que peut offrir l'espace ? Qu'y a-t-il à mettre en valeur dans cet immense domaine réputé quasiment vide, hostile, et encore accessible seulement au prix de grands efforts technologiques et financiers ?

Dans les médias, on a parlé régulièrement de médicaments nouveaux isolés par électrophorèse, qui doivent révolutionner tout un secteur de l'industrie pharmaceutique. On a parlé des micro-billes fabriquées avec une précision remarquable, et des cristaux spéciaux ou des alliages exotiques élaborés dans des fours sophistiqués à bord des stations ou des vaisseaux spatiaux.

Il s'agit là de produits à très grande valeur ajoutée, promis certainement à un avenir brillant qui justifie les investissements. Il y a là une utilisation des conditions physiques particulières, telles que le vide poussé, ou surtout la quasi-absence de pesanteur pendant des périodes prolongées, mais on ne peut pas véritablement parler d'exploitation des ressources de l'espace.

Nous sommes encore dans la deuxième phase de la conquête, celle de l'utilisation des caractéristiques stratégiques ou particulières liées à l'emplacement du site lui-même, et non à ce que l'on y trouve. Utiliser

une montagne pour se faire bronzer en faisant du ski est une activité fondamentalement différente de celle qui consiste à aménager des barrages hydroélectriques ou à extraire de la pierre de carrière.

Il faut un certain temps pour percevoir les réelles richesses que nous offre l'espace, car elles sont à la fois subtiles et colossales. Nous sommes sortis de la Terre, les portes du système solaire nous sont grandes ouvertes, mais nous sommes encore trop éblouis par l'exploit pour y voir de façon claire. Il nous faut un temps d'accommodation.

Certains esprits particulièrement clairvoyants, comme celui de Constantin Tsiolkovsky, le plus grand de tous les précurseurs de la conquête spatiale, ont entrevu dès le début de notre siècle toutes les richesses que l'espace allait pouvoir nous offrir. Depuis plus de vingt ans, dans la plupart des congrès d'astronautique, des spécialistes élaborent des scénarios pour l'exploitation de ces ressources. Mais c'est aujourd'hui seulement, plus de trente ans après le vol de Youri Gagarine, que le grand public commence à prendre conscience du potentiel colossal auquel nous avons désormais accès.

RICHESSES

La richesse, au sens le plus fondamental, peut se définir comme la maîtrise des ressources qui garantissent la survie.

A l'époque de la préhistoire, la bonne fortune, c'était "avoir fait son trou", avoir découvert une grotte confortable, sèche et bien protégée, à proximité d'un point d'eau. Au Néolithique, après l'invention de l'agriculture et de l'élevage, "avoir des terres au soleil" devint le signe évident de la richesse.

Pendant une centaine de siècles, sur un demi-millier de générations, les civilisations et les empires se développèrent, jusqu'à ce tournant colossal, il y a deux siècles, du début de l'ère industrielle. A partir d'une meilleure compréhension des lois de la nature, d'une meilleure connaissance des structures de la matière, lorsque l'alchimie devint la chimie, il devint possible de transformer les matières premières pour composer des aciers, des alliages, et des composés nouveaux qui allaient permettre la machine à vapeur, les trains, les grands navires, l'industrie chimique, l'électricité... Les écoles des mines furent parmi les premières écoles d'ingénieurs à s'ouvrir dans une France et dans un monde industriel en pleine construction. La richesse, c'était de découvrir le charbon ou les sources de minerai, c'était de "trouver le bon filon".

Aujourd'hui, c'est-à-dire depuis une cinquantaine d'années, de nombreux secrets de la matière ont été maîtrisés par la science et la technique. Tous les matériaux, pratiquement, peuvent être synthétisés. Les matières plastiques qui dans les années cinquante étaient à la fois symbole de bon marché et de mauvaise qualité, sont aujourd'hui dans tous les domaines les matériaux les plus performants, les mieux adaptés. Des éléments qui n'existaient pas dans la nature ont même été élaborés au sein des réactions nucléaires, et du plomb a été transformé en or. Au prix fort, c'est sûr, au prix de l'énergie qui a été nécessaire à cette transformation. Une énergie dont la disponibilité se mesure en watts, en kilowatts, ou en mégawatts.

Le besoin d'énergie est aujourd'hui au centre de toutes nos activités, de notre développement actuel et futur. Sous les diverses formes à travers lesquelles nous l'utilisons, l'énergie est omniprésente, et le moindre doute sur sa disponibilité suffit pour déclencher une crise mondiale. La richesse, de nos jours, c'est la maîtrise de l'énergie.

ENERGIE

Lorsqu'en été sur la plage ou sur une terrasse nous étalons notre corps au Soleil, ou même quand à une saison moins clémente, un rayon de ce Soleil vient à percer les nuages et que nous tendons vers lui notre visage et le creux de nos mains, nous sentons une douce chaleur nous pénétrer, en absorbant l'énergie infrarouge émise par notre étoile. D'un point de vue plus technique, cette énergie, concentrée à l'aide de miroirs, a permis à Archimède de mettre à feu une flotte d'envahisseurs. Domestiquée à Odeillo dans le grand four solaire, ou plus couramment et plus simplement à l'aide de cellules *photovoltaïques*, l'énergie solaire à l'état brut permet la fusion des matériaux les plus réfractaires, et elle peut être le moteur tous les travaux que l'on veut bien imaginer, après transformation dans cette autre forme d'énergie qu'est l'électricité.

Energie dite nouvelle, du moins dans sa mise en oeuvre, ou douce, parce que nous sommes loin, à cent cinquante millions de kilomètres des colossales réactions nucléaires qui se produisent au sein de notre étoile, l'énergie solaire a eu ses chantres et continue de susciter l'intérêt. Mais elle reste encore marginale par rapport aux sources majeures d'énergie que sont le charbon, les hydrocarbures, l'hydroélectricité, et l'électricité d'origine nucléaire.

Si le coût de production de l'électricité solaire est très faible, par contre, les investissements à puissance équivalente sont beaucoup plus lourds que pour les autres formes de production, et le resteront tant que nous n'aurons pas trouvé le moyen de fabriquer des cellules

photovoltaïques à très bon marché et en très grande quantité, ce qui demande à la fois un effort technologique et un effort culturel.

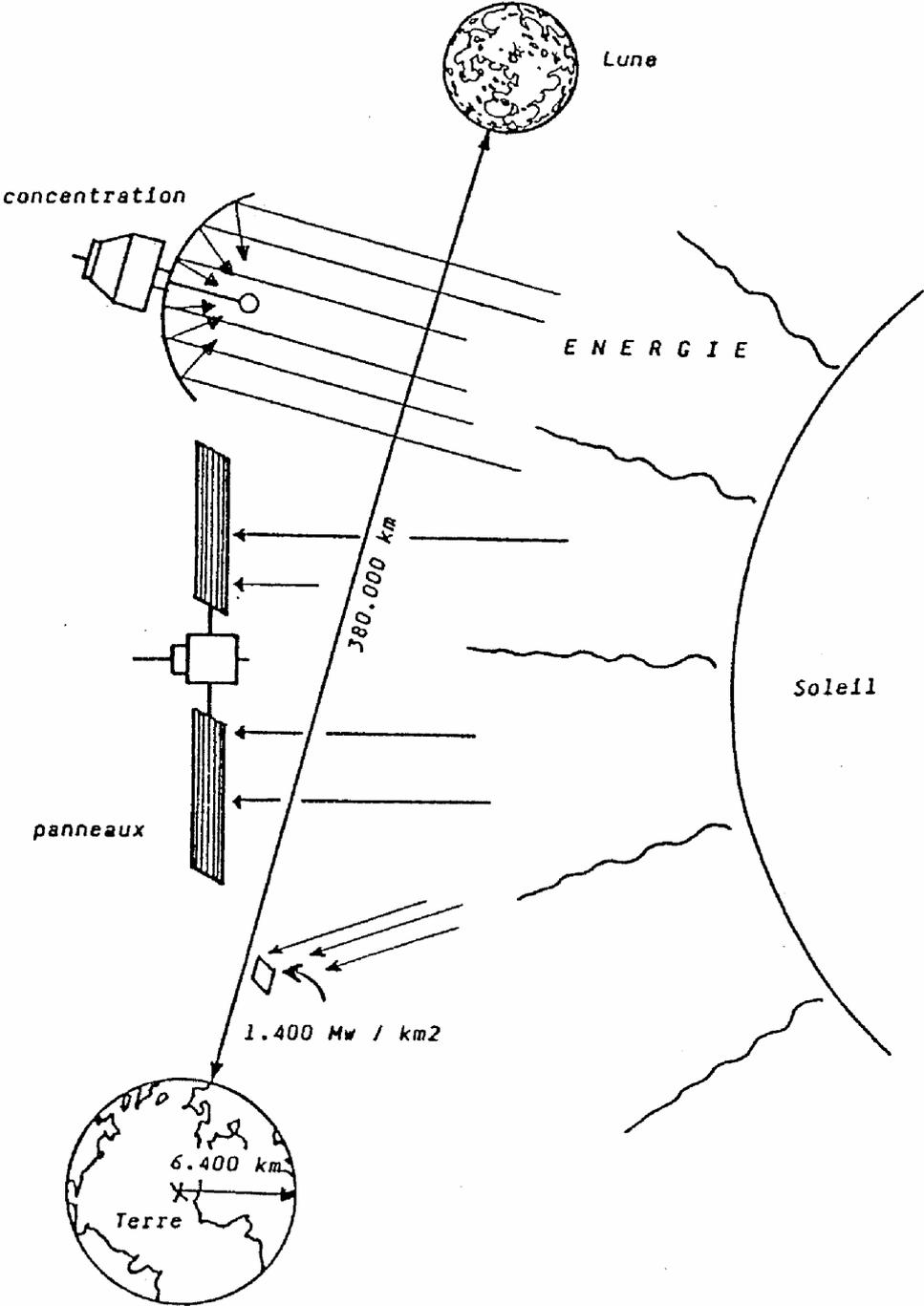
De plus, la récupération de l'énergie solaire n'est pas sans problèmes : d'abord, la Terre tourne sur elle-même, et en moyenne, les sites ne sont éclairés que la moitié du temps. Parce que la Terre tourne, les systèmes d'exploitation de l'énergie solaire demandent des mécanismes souvent complexes et coûteux pour suivre efficacement la direction apparente du Soleil. Et puis il y a les nuages, qui diminuent l'intensité reçue. Même dans les meilleures conditions, l'énergie solaire est peu concentrée, 1 400 watts au mètre carré environ, dont 10 à 20 % seulement sont utilisables, à cause du faible rendement des capteurs : il faut plusieurs mètres carrés d'installation pour brancher un fer à repasser. Si on veut capter une puissance importante, utilisable industriellement, on est conduit à construire des installations de grande superficie, qui d'une part occupent du terrain, en compétition avec les cultures et l'habitat, et d'autre part sont sensibles aux vents violents et aux intempéries. Enfin, toutes les installations de moyenne ou de grande puissance réalisées à ce jour l'ont été sur une planète massive, où elles sont soumises aux contraintes d'une pesanteur importante, et chaque kilowatt installé a demandé des tonnes de béton et d'acier pour les infrastructures.

Malgré tous ces inconvénients, l'énergie solaire offre suffisamment de promesses pour que l'on continue à faire des études et à réaliser des prototypes, et dans de nombreux cas particuliers, à construire des installations opérationnelles.

Prenons alors un peu de recul, pour réexaminer l'énergie solaire à partir d'un autre point de vue. Eloignons-nous de quarante mille, cent mille, ou un million de kilomètres. Nous sommes dans la banlieue de la Terre, et nous regardons cette boule bleue sur laquelle nous avons tant de mal à mettre en oeuvre l'énergie solaire. Tournons-nous maintenant vers cette étoile brillante, rayonnante, qui est au centre de notre système, et imaginons que dans l'espace, nous puissions construire une centrale électrique orbitale pour capter l'énergie qui émane du Soleil.

Aux courtes périodes d'éclipse près, les capteurs fonctionneront 24 heures sur 24, sans nuages pour intercepter le rayonnement, sans tempêtes dévastatrices, avec des besoins minimaux de contrôle d'orientation. En l'absence de pesanteur, dans un milieu homogène, les structures seront très légères, susceptibles d'être déployées sur des superficies immenses par des moyens largement automatisés, sans interférence avec quelque plan d'occupation des sols que ce soit. Et si sur Terre, en matière d'énergie solaire, le mètre carré est l'unité de référence, dans l'espace, le kilomètre carré apparaît être une mesure plus appropriée. Chaque kilomètre carré déployé dans le voisinage de la

Illustration N° 7 : énergie solaire



L'équivalent d'une centrale nucléaire pour chaque kilomètre carré déployé dans l'espace.

Terre reçoit 1 400 mégawatts d'énergie. Nous sommes alors dans des ordres de grandeur comparables avec ceux de la production des centrales nucléaires, et le potentiel l'énergie solaire devient alors tout-à-fait considérable.

Est-il possible de réaliser effectivement de telles installations ? L'idée de centrales solaires orbitales a été développée sérieusement pour la première fois en 1969 par Peter Glaser, qui a imaginé des *sunsats*, d'immenses panneaux solaires orbitaux de 30 kilomètres de long sur 10 kilomètres de large, capables de produire jusqu'à 50 mégawatts de puissance électrique chacun.

Sur un projet de référence plus modeste, d'un kilomètre sur trois, le Département de l'Energie des Etats-Unis, avec une cinquantaine de grandes entreprises, a entrepris des études poussées entre 1978 et 1981. Ces études ont conclu à la faisabilité technique, mais avec une rentabilité insuffisante pour le moment. Le projet, dont la presse spécialisée s'est largement fait l'écho, comprenait la construction de la centrale à partir d'éléments satellisés depuis la Terre, et le renvoi de l'énergie captée vers la Terre par un faisceau de micro-ondes, avec une grande antenne réceptrice au sol pour récupérer l'énergie produite par ce satellite de puissance.

Les grandes études ont été provisoirement abandonnées, bien que des travaux ultérieurs aient montré qu'en utilisant des matériaux lunaires, la construction des centrales orbitales pourrait être beaucoup plus économique que dans les estimations initiales. Mais une veille technologique, coordonnée en particulier par EDF et par la SEE a permis de faire émerger des concepts intermédiaires tels que les systèmes à base de réflecteurs orbitaux.

Pour le moment, il n'y a donc pas de grands projets opérationnels, ni mêmes expérimentaux, pour une collecte majeure de l'énergie solaire dans l'espace. Mais au fil de cette réflexion et de ces études, nous avons découvert quelle est la raison essentielle pour notre présence et nos travaux dans l'espace. Au-delà des satisfactions que nous donne l'exploration, et des bénéfices que procure l'utilisation de positions remarquables, nous avons commencé à conquérir le système solaire pour accéder de façon majeure à la plus grande source de la plus grande des richesses, l'énergie.

LA LUNE

Les soirs où elle est pleine, lorsqu'elle brille dans le ciel clair, la Lune remplit nos nuits par sa présence. Elle fait rêver les poètes et les

amoureux, éveille les charmes les plus mystérieux et suscite les craintes les plus profondes.

Mais laissons pour un instant, le poète devenir géomètre. Vue à bout de bras tendu, la lune apparaît-elle avec la taille d'une pièce de un franc, d'une petite orange ou d'une balle de tennis ? C'est une question que vous pouvez vous amuser à poser à vos amis. Peu de personnes sont capables de répondre instantanément avec assurance. La Lune semble, dans notre mémoire, être un objet de taille importante dans le ciel. Pourtant, à bout de bras, on peut la masquer avec l'ongle du petit doigt.

Nous avons en général une très mauvaise appréciation de la géométrie et des dimensions du monde extra-terrestre qui nous entoure. A cause de ce flou, nous avons tendance à rejeter la Lune et les astres de notre système solaire hors de notre monde sensible pour les laisser dans le domaine du fantastique, voire des fantômes purs.

La Lune est en moyenne à 380 000 kilomètres de nous, à 380 000 kilomètres de Paris, de Marseille, de Nantes ou de Sainte Rose. Que représente cette distance ? Quatre ou cinq fois le kilométrage qui s'affiche au compteur d'un grand nombre de voitures. Tous ceux qui sont des conducteurs par profession et qui ont eu le temps d'accumuler un peu d'expérience ont parcouru au volant plusieurs fois la distance qui sépare la Terre de la Lune.

De la Terre à la Lune, il y a moins de vingt fois la distance de Paris à Nouméa, et lorsque dans quelques années nous disposerons de véhicules spécialement conçus pour le transport inter-orbital, le trajet se fera en quelques heures, le temps d'un Paris-Brest en train. Si aujourd'hui le trajet semble encore long, il faut se souvenir qu'à l'époque de Christophe Colomb, il fallait trois mois pour atteindre ce qui ne s'appelait pas encore l'Amérique, au terme d'une opération dont le montage avait été loin d'être simple. Mais douze hommes ont déjà marché et travaillé sur la Lune. Si on compte les missions préparatoires, le pilote accompagnateur, et l'équipage du vol Apollo 13, qui avait failli tourner au drame, ce sont vingt-sept personnes en tout qui ont déjà fait le voyage à plusieurs centaines de milliers de kilomètres de la Terre.

Les astronautes ont rapporté près de quatre cents kilogrammes d'échantillons de roches, auxquels il faut ajouter les quelques dizaines de kilogrammes prélevés par les sondes automatiques soviétiques. Vouloir décrocher la Lune, ou tout au moins des morceaux, n'est plus une utopie, cela a été fait, et c'est désormais faisable chaque fois que nous le voudrons.

Nous n'avons pas trouvé de petits hommes verts sur la Lune, ni de bactéries, ni d'autres formes biologiques. Les roches et les poussières qui ont été rapportées sont presque banales, des basaltes, des sables, très proches de ceux que nous pouvons trouver dans l'écorce de la Terre ou autour de nos volcans. Est-ce donc matériellement là le résultat de tout cet effort gigantesque, quatre cents kilogrammes de presque vulgaires cailloux ? Bien sûr ils ont aujourd'hui la valeur de la rareté, qui en fait des pierres précieuses et les apparente à des bijoux, mais ce n'est pas cela qui est fondamental pour l'avenir de l'humanité.

MINERAIS

Ces basaltes de la Lune, les chimistes nous diront que ce sont essentiellement des silicates d'alumine, avec une composition d'environ 40% d'oxygène, 20% d'aluminium, 20% de silicium, et des proportions plus faibles d'autres métaux, comme le fer et le titane, et de quelques autres éléments. Ils sont très proches des cailloux d'origine magmatique que l'on peut ramasser sur la Terre.

Sur Terre, nous pensons rarement à tout cet oxygène qui est contenu dans les roches, parce que nous respirons celui qui est déjà sous forme gazeuse dans l'atmosphère, sans que nous ayons à l'extraire de quoi que ce soit.

Le fer est utilisé depuis vingt-cinq siècles, l'aluminium est connu depuis à peine plus d'une centaine d'années, mais est employé à présent très largement dans la construction, et on le trouve dans toutes les cuisines. Le silicium, a été le premier des semi-conducteurs, qui ont donné naissance à toute l'électronique moderne, sans compter les capteurs solaires pour transformer l'énergie des photons en courant électrique. Le titane est encore un métal réservé à des utilisations stratégiques ou très particulières telles que la coque des sous-marins ou le fuselage du Concorde, parce qu'il est deux fois moins dense que l'acier, et beaucoup plus résistant, mais aussi beaucoup plus cher. Tous ces éléments métalliques sont abondamment répandus sur la surface de notre globe, mais sur Terre, on ne les extrait pas de simples cailloux, bien que ce soit théoriquement possible. On va chercher ce que l'on appelle des minerais, c'est-à-dire des roches où le jeu de l'érosion et des dépôts hydrogéologiques ont concentré en des filons ou des gisements enrichis ces éléments sous forme de composés dont il est relativement facile de les extraire.

Depuis un ou deux siècles, nous savons que tous les corps, toute la matière qui existe sur notre planète, sont des combinaisons d'à peine une centaine d'éléments simples, que l'on retrouve classés dans le fameux

tableau de Mendéléïev. Le travail de l'industrie consiste à prendre dans la nature des matières dites premières, à en séparer les éléments les plus simples possible sous des formes les plus homogènes possible, pour les recombinaison ensuite sous forme de produits dont la composition est rigoureusement contrôlée, avant d'utiliser ces matériaux secondaires pour la fabrication de tous les objets qui nous entourent, du plus simple au plus complexe.

Dans les matières premières, les éléments sont liés entre eux par des liaisons mécaniques entre les cristaux et les molécules, ou des liaisons plus proprement chimiques au sein des molécules elles-mêmes. Ce sont ces liaisons qu'il faut briser, de manière plus ou moins violente, pour séparer les éléments, et pour cela, il faut de l'énergie.

De l'énergie mécanique brute pour le concassage en éléments fins, de l'énergie thermique pour la fusion ou la distillation, de l'énergie électrique pour les opérations d'électrolyse. Il faut des produits auxiliaires pour provoquer des réactions chimiques, et ces produits auxiliaires, il faut de l'énergie pour les extraire et les préparer. Naturellement, on a choisi comme minerais les composés que l'on a pu trouver où les concentrations étaient les plus fortes, mais surtout, où les diverses liaisons étaient les plus faciles à briser, compte tenu des moyens techniques dont on disposait.

Il s'est créé ainsi des *filiales* de production dans l'industrie chimique, qui sont souvent le fruit d'une évolution historique. Mais tout chimiste qualifié peut extraire de l'aluminium et du fer à partir de n'importe quelle roche magmatique quelle qu'en soit l'origine. Il ne le fait pas, parce que cela demande la mise en jeu de beaucoup plus d'énergie qu'il n'en faut avec les minerais traditionnels, et que dans les conditions matérielles et économiques qui sont actuellement celles de la surface de notre planète, cela ne serait pas rentable.

Sur Terre, non seulement il faut de l'énergie pour trier les minerais et en séparer les éléments, mais il en faut aussi énormément pour extraire ces minerais et les transporter dans un environnement de pesanteur importante. Quand on sait que la production annuelle mondiale de fer et d'acier est de l'ordre de 700 millions de tonnes, celle de l'aluminium de l'ordre de 5 millions de tonnes, et que cela ne représente qu'une fraction des masses de minerai qu'il faut manipuler, on voit que le transport n'est pas un facteur négligeable. C'est pour cela que les industries d'extraction et de transformation des matières premières sont implantées de préférence là où un gisement de minerai de fer voisine un bassin houiller, là où une carrière de bauxite se trouve à proximité d'une usine hydroélectrique, ou encore, près d'un port où le pétrole et les autres matières premières peuvent facilement être acheminés. La dépendance

vis-à-vis des besoins en énergie est encore la clé qui détermine les options.

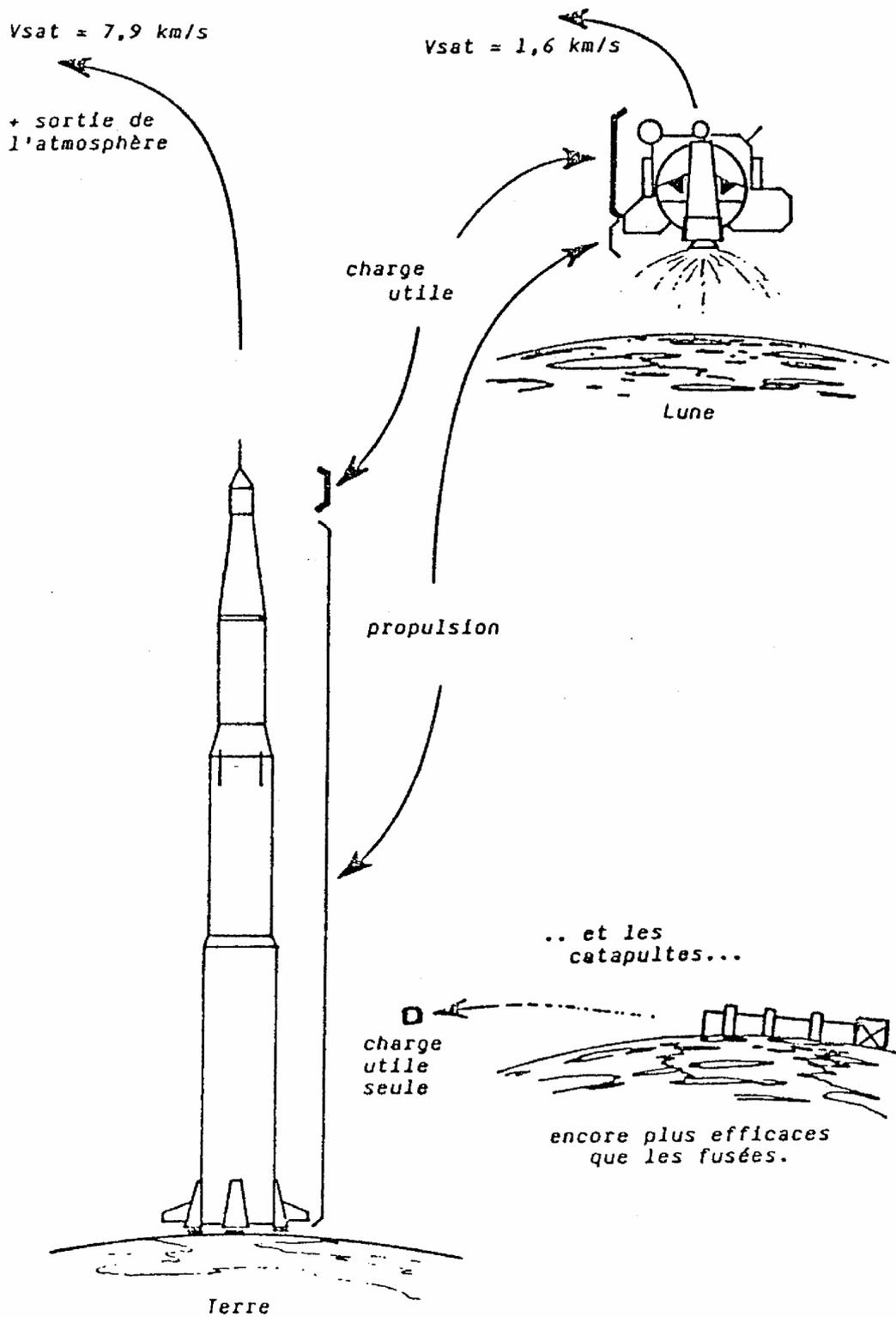
Si maintenant nous revenons aux perspectives que nous offre la deuxième génération de la conquête de l'espace, celle où nous abordons l'exploitation des ressources intrinsèques du système solaire, la première chose que nous devons remarquer, et à laquelle nous devons accorder le meilleur de notre réflexion, c'est que l'énergie est là, dans l'espace, continuellement et colossalement déversée par l'étoile Soleil, prête à y être captée et utilisée dès que nous le voudrons bien.

PARTIR (bis)

Il y a cependant un problème majeur : sortir de notre planète reste une opération lourde, c'est un mot qui convient bien, et coûteuse. Il est impensable d'envoyer de manière massive des minerais terrestres dans l'espace pour les y traiter, au coût de plusieurs dizaines de milliers de francs pour chaque kilogramme envoyé en orbite terrestre, même si ces coûts sont appelés à diminuer considérablement dans les années qui viennent. C'est aussi impensable que d'imaginer un développement industriel de l'Amérique du Nord pour lequel il aurait fallu que chaque planche, chaque clou, chaque tonne de sable, soient systématiquement expédiés depuis l'Europe, au prix d'une longue et coûteuse traversée de l'Océan Atlantique. Les premiers pionniers ont effectivement emporté avec eux des outils et des machines, des semences et du bétail, mais ensuite, tout le développement s'est pratiquement fait en utilisant les ressources qui ont été trouvées sur place.

La Lune, à moins de 400 000 kilomètres des zones industrielles des régions de France et d'Europe, offre en quantité dans son sol tous les éléments que nous pouvons désirer, sauf peut-être l'hydrogène. Notre satellite - mais on pourrait aussi dire notre petite planète soeur, puisque nous tournons avec elle autour de notre centre de masse commun - est quatre fois plus petit que la Terre en diamètre, et quarante fois moins massif, sa surface a une courbure plus importante pour se dérober sous la chute des corps qui gravitent autour d'elle, et l'attraction de la gravité y est plus faible. Il ne demande qu'une vitesse de 1,6 km/s pour une mise sur orbite basse à partir de sa surface, ce qu'il faut comparer avec les 7,9 km/s nécessaires au départ de la Terre. Comme d'une part, l'énergie nécessaire est fonction du carré de la vitesse, et que d'autre part, il n'y a pas d'atmosphère sur la Lune, donc pas de nécessité de monter d'abord à une altitude importante avant d'accélérer à la vitesse orbitale, le résultat global est qu'il faut de l'ordre de cent fois moins d'énergie pour satelliser une masse donnée autour de la Lune que pour satelliser la même masse autour de la Terre.

Illustration N°8 : partir de la Lune



Il y a eu une illustration frappante de cette différence avec les vols Apollo. Il fallait une fusée géante de quelques cent dix mètres de haut pour extraire de la Terre les quelques mètres et les quelques tonnes du train spatial composé du module de commande, du module de service, et des deux parties du module lunaire. Au retour, la partie supérieure du module lunaire décollait à l'aide d'un petit moteur-fusée, que l'on distinguait à peine sous la structure, alimenté par des réservoirs si petits qu'ils pouvaient servir de siège aux astronautes.

Décollant de la Lune, le troisième étage d'une Ariane pourrait à lui seul satelliser autour de la Lune une masse aussi importante que celle qui est emportée par une Ariane complète au départ de la Terre, tout en gardant une réserve de carburant suffisante pour venir se reposer en douceur sur la Lune à la manière de la fusée de Tintin ou des projets de fusée mono-étage Delta-clipper.

Mais ce n'est pas tout. Comme la Lune n'a pas d'atmosphère et donc pas de résistance atmosphérique, il est possible dès le sol, de communiquer la vitesse orbitale à une charge utile grâce à une catapulte, dont l'essentiel de la masse fonctionnelle restera immobile, alors qu'une fusée doit pousser à chaque instant de la phase de propulsion non seulement la charge utile, mais aussi les moteurs eux-mêmes, et toute la masse du carburant qui n'a pas encore été utilisé. Le facteur de comparaison entre les énergies nécessaires pour des satellisations au départ de la Terre ou de la Lune n'est plus alors de l'ordre de la centaine, mais de l'ordre de plusieurs milliers. Autant il est difficile de quitter la surface de la Terre, autant il est facile de se retrouver dans l'espace libre en partant de la Lune. Vu de la Terre, le transport spatial est un très gros problème. Le même problème de transport, vu de la Lune ou de l'espace même, se simplifie considérablement après le changement de repère.

GENIE CHIMIQUE

Revenons maintenant au développement industriel. Grâce à l'énergie pratiquement illimitée dont on peut disposer dans l'espace, n'importe quelle matière première peut donc faire office de minerai du moment qu'elle contient les éléments recherchés. Coïncidence heureuse, il se trouve aussi que la Lune offre des matériaux très facilement accessibles. Les ingrédients de base pour un développement colossal et pour une industrialisation massive dans l'espace sont donc réunis. L'essentiel des produits de cette industrialisation pourra facilement revenir sur la Terre, puisque grâce à l'atmosphère qui fait office de frein, le retour sur Terre, contrairement au départ, n'est pas un problème majeur, et surtout, ne demande pratiquement pas de dépense d'énergie.

Il est temps de ne plus considérer la Lune comme le symbole de l'inaccessible, mais au contraire comme un territoire nouveau qui s'offre à nous, un peu aride, certes, mais à peine plus distant que les Iles Kerguelen, et qui n'attend que nous pour une mise en valeur de toutes ses ressources.

A l'Ecole de Chimie de Paris, à l'Institut du Génie Chimique à Toulouse, à la Direction de la Recherche de l'entreprise Bouygues, comme dans de nombreux autres centres de recherche à travers le monde, des scientifiques, des chercheurs, se sont posés la question, et travaillent à mettre au point des méthodes, des techniques pour transformer les minéraux lunaires, préparant ainsi les jours proches où nous retournerons sur la Lune non plus en touristes, mais pour une mise en valeur industrielle de la première source de matériaux extra-terrestres la plus proche, la plus accessible pour le moment, dans ce système solaire qui a encore bien d'autres bonnes surprises à nous offrir.

ASTEROIDES

Près de cinquante mille petites planètes ont été déjà découvertes dans notre système solaire, et plus de trois mille d'entre elles sont suivies de manière régulière par les astronomes.

Nous sommes là bien loin des sept planètes mythologiques de l'antiquité, ou des neuf ou dix planètes entre lesquelles la grande presse avide de mystères semble aujourd'hui encore hésiter. Il faut abandonner l'idée d'un système solaire tout simple et une fois pour toutes réglé comme un mouvement d'horlogerie jusqu'à la fin des temps, et il nous faut remonter aux origines et aux processus de formation pour mieux comprendre ce qui se passe et de quoi se compose véritablement ce monde qui entoure l'étoile Soleil.

Il y a plus de cinq milliards d'années, un nuage d'hydrogène galactique s'est condensé en tournant sur lui-même jusqu'à ce qu'en son centre les températures et les pressions atteignent des valeurs critiques suffisantes pour déclencher les réactions nucléaires. L'étoile qui est le foyer de notre monde était née.

Une étoile débordante d'énergie, animée de réactions violentes, qui rejetait dans l'espace environnant une petite partie de sa matière originelle, et des quantités considérables d'éléments plus lourds qu'elle synthétisait en son cœur. Ce phénomène continue encore aujourd'hui, et les vents solaires déversent plus ou moins régulièrement sur nous des protons et des ions plus lourds, qui sont projetés à des centaines de milliers de kilomètres à l'heure par les éruptions de la chromosphère.

Un nuage de matière diffuse, d'un diamètre de quelques milliards de kilomètres entourait le Soleil, formant une sorte de soupe légère, tourbillonnant en une lentille aux limites mal définies, dans laquelle venait à l'occasion se plonger un ballet de comètes venues du fond de l'espace. Comme des grumeaux se forment dans la soupe, les grains microscopiques de matière constituant ce nuage se sont peu à peu agglutinés les uns aux autres à la suite d'innombrables collisions pour former des milliards de météorites, les plus grosses balayant les plus petites sur leur passage, et continuant ainsi à grandir jusqu'à atteindre des dimensions de plusieurs kilomètres. Les forces de gravitation ont commencé à jouer de manière discrète entre ces corps, et les résonances aidant, un certain nombre d'orbites ayant entre elles des relations harmoniques se sont trouvées privilégiées, ce qui a conduit à la formation des grosses planètes que nous connaissons, avec leur cohorte de satellites.

Un milliard d'années après sa naissance, le système solaire avait dans l'ensemble la physionomie que nous lui connaissons aujourd'hui. Mais dans les détails, c'est une autre histoire. Par l'effet des collisions, des accrétions, des éclatements, par le jeu des perturbations mutuelles, des pressions lumineuses, et par les rebonds gravitationnels aléatoires au moment des passages occasionnels à proximité de grosses planètes, tout ou presque peut arriver aux petits corps de notre système. Ils peuvent apparaître, disparaître, passer d'une orbite apparemment stable à une toute autre orbite, sans qu'aucune loi prévisible autre que celles du chaos ne gouverne globalement ce ballet cosmique.

Si la masse totale des petits corps qui circulent encore à travers le système solaire est relativement faible, environ un vingtième seulement de la masse de la Terre au total, par contre, on les trouve partout. La plupart d'entre eux tournent assez sagement dans une zone s'étendant entre les orbites de Mars et de Jupiter, pour peut-être remplacer une grosse planète manquante, dans ce qu'on appelle les ceintures d'astéroïdes. Mais certains ont des orbites perpendiculaires au plan de l'écliptique, ou mêmes rétrogrades, c'est-à-dire tournant autour du Soleil en sens inverse de la majorité des planètes, et d'autres vont traîner bien au-delà de Saturne ou en deçà de Mercure. D'autres encore, et ceux-là nous intéressent au plus haut point, les astéroïdes du groupe Apollo-Amor, ont des orbites proches de celle de la Terre, ce qui dans certains cas les rend extraordinairement accessibles et industriellement désirables.

MINERAIS (bis)

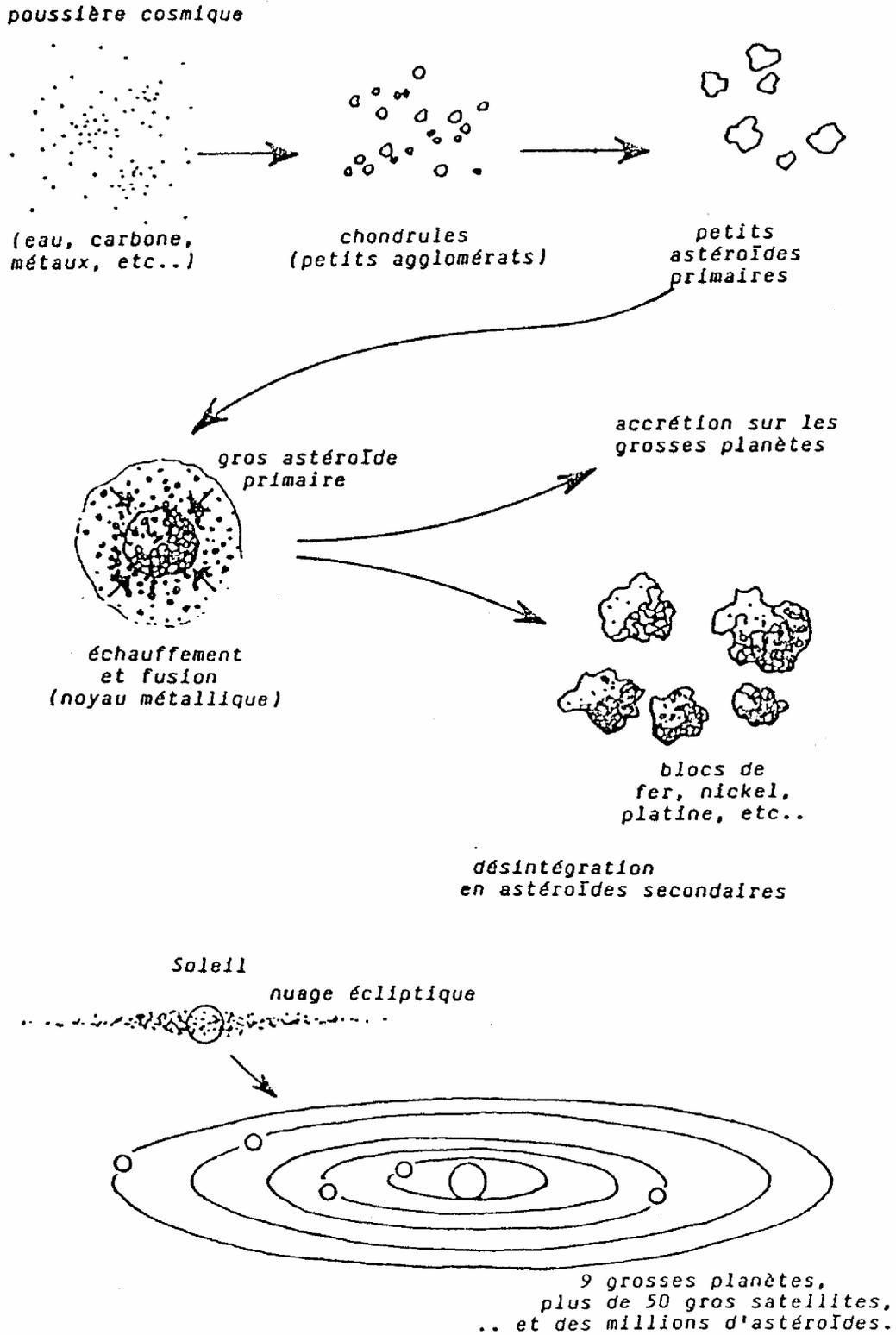
Les plus petits corps d'origine primitive sont plus ou moins homogènes et se composent des constituants de base de l'environnement solaire : de l'eau (jusqu'à vingt pour cent dans certains astéroïdes), des composés carbonés, des métaux, etc. Ils se présentent généralement sous forme de chondrites, c'est-à-dire d'agglomérats de structure granuleuse. Ces amas peuvent se développer par accrétion progressive jusqu'à ce que la petite planète qui en résulte atteigne quelques dizaines de kilomètres de diamètre, et ensuite de nouvelles structures apparaissent.

Dans un choc l'énergie cinétique se transforme en chaleur. Il suffit de taper sur un clou avec un marteau et de toucher ensuite la tête du clou pour s'en rendre compte. Les collisions ont continuellement contribué à élever la température des astéroïdes, du moins localement, amenant une fusion et des transformations autour des points d'impact. Mais la principale cause d'échauffement et de transformation des corps du système solaire est la radioactivité naturelle de certains éléments, qui s'accompagne d'un dégagement de chaleur. Cette chaleur ne peut s'évacuer vers le reste de l'univers que par rayonnement à partir de la surface.

Or un transfert de chaleur dépend essentiellement de deux facteurs : la superficie de la zone d'échange, et la différence de température entre le côté chaud et le côté froid. La production de chaleur par radioactivité est proportionnelle à la masse totale de matériaux présents. Plus les dimensions augmentent, et plus on voit augmenter la masse, et donc la production de chaleur, qui se trouve derrière chaque élément de la surface par où se fait l'évacuation de cette chaleur. En conséquence, la température interne doit s'élever pour que puisse s'établir un équilibre entre la production de chaleur et son élimination.

A partir d'une taille de l'ordre d'une dizaine de kilomètres, l'élévation de température est telle qu'elle provoque la fusion des roches internes. La petite planète se retrouve à l'état liquide ou pâteux. Sous l'effet des forces de gravitation internes, elle tend à prendre une forme quasi-sphérique. Et surtout une différenciation interne par stratification s'opère, due aux différences de densité des différents composants. Si une vinaigrette congelée à l'état solide dans un réfrigérateur peut garder longtemps son aspect homogène, par contre, dès qu'elle se retrouve à l'état liquide, on voit lentement les composants se séparer, l'huile plus légère remontant à la surface, tandis que le vinaigre, plus dense, se rassemble vers le fond du récipient, dans la direction vers laquelle

Illustration N°9 : formation des astéroïdes



s'exerce l'attraction gravitationnelle. De même dans un gros astéroïde dont l'intérieur a fondu, un noyau central se forme, réunissant les métaux les plus lourds, tandis que les matières plus terreuses, plus légères, se retrouvent pour former les enveloppes extérieures, à l'image des structures de la Terre, de Mars, ou de Vénus.

Si par hasard, et à l'échelle de l'histoire du système solaire, ce hasard peut être relativement fréquent, une collision importante survient, ou bien si un passage à très faible proximité d'une grosse planète se produit, entraînant des tensions internes supérieures aux forces de cohésion, l'astéroïde peut se briser en plusieurs parties, et on peut alors se retrouver avec un essaim d'astéroïdes secondaires. Au fil des perturbations et du temps, cet essaim peut se disperser, et ces astéroïdes secondaires peuvent finir par se retrouver sur des orbites complètement indépendantes. Certains de ces astéroïdes de deuxième génération, ceux qui sont issus du noyau de l'astéroïde primaire, peuvent être essentiellement des blocs de métal, formés de fer, de nickel, d'or, de platine, d'iridium, et de tous les autres métaux précieux.

L'observation astronomique, et en particulier spectroscopique, nous a permis de reconstituer cette histoire. Il y a une excellente corrélation entre les petites planètes que nous observons à travers nos instruments, et les météorites, que l'on pourrait appeler les micro-planètes, que nous pouvons ramasser après qu'elles soient tombées sur le berceau de l'humanité. Chaque jour, la Terre balaye dans l'espace quelques milliers de tonnes de météorites et de poussières cosmiques, dont la plupart se consomment au cours de leur entrée dans l'atmosphère, en nous donnant le magnifique spectacle des étoiles filantes.

Il y a tout juste deux siècles, un paysan anglais, ayant eu connaissance de la grande réputation du pionnier de la chimie moderne qu'était Antoine Lavoisier, lui envoya pour analyse et commentaires une pierre mystérieuse qu'il avait vue tomber du ciel dans son champ. Le grand savant n'identifia qu'un vulgaire bloc de fer, et se fâcha, croyant avoir été victime d'un mauvais plaisant. Aujourd'hui, les matériaux de l'espace ont perdu beaucoup de leur mystère passé. Ils sont passablement bien identifiés. Nous savons qu'il n'y a pas de matériaux vraiment exotiques sur la Lune ou dans les astéroïdes. Nous savons aussi que ce sont ces matériaux qui constituent nos grands minerais du futur, et que les nouvelles perspectives ouvertes par l'exploration de notre espace solaire vont bouleverser les données techniques et économiques de l'exploitation des matières premières.

Troisième Partie :

AMENAGEMENTS POUR UN NOUVEAU MONDE

Deux générations après le premier Spoutnik et le vol de Youri Gagarine, nous entrons dans l'ère de la colonisation massive du Système Solaire.

PERCEPTIONS

Les ressources essentielles de l'espace, énergie et matières premières, sont à portée de notre main. Encore faudrait-il que nous prenions pleinement conscience du potentiel qui nous est offert. C'est une affaire qui prend du temps, des années, car individuellement et collectivement, notre système nerveux a besoin d'un délai important pour s'adapter aux situations nouvelles. C'est un phénomène bien classique d'accoutumance.

Imaginons que nous sommes dans une pièce fermée, ne disposant vers l'extérieur que de quelques fenêtres plus ou moins voilées et plus ou moins troubles, et que tout d'un coup, la porte s'ouvre vers le grand soleil de l'extérieur. La première chose qui nous arrive est un éblouissement, qui nous arrête sur le seuil. Ce n'est que lorsque l'éblouissement se dissipe, et que l'oeil s'habitue à la clarté, que nous pouvons commencer à distinguer le paysage et à nous repérer de manière efficace.

Pendant les premières années de la conquête de l'espace, nous avons été stupéfaits, c'est-à-dire frappés et rendus immobiles, à l'annonce de chaque nouvelle *première* technique ou scientifique qui nous avions accomplie dans l'espace. Nous étions éblouis par l'exploit, ravis, mais incapables de voir au-delà, et de l'intégrer dans un panorama cohérent.

C'est peut-être moins vrai aujourd'hui. Mais nos amis américains ont ressenti un grand vide après les années Apollo, vide que les Navettes n'ont pas comblé, et l'Amérique est encore loin d'avoir officiellement une politique spatiale cohérente, même si quelques personnes remarquables y ont des visions à long terme puissantes et bien structurées. Du côté de nos amis de l'est, la grande vision officielle existe. Elle découle

naturellement du credo dans le progrès de l'humanité qui est une composante de l'âme russe et qui a longtemps été le fil conducteur des projets soviétiques. Elle entraîne une progression régulière et même sereine vers un grand futur cosmique de présence de l'homme dans le système solaire tout entier. A cet égard, certains textes écrits par Youri Gagarine à la fin des années 60 sur la psychologie et le cosmos restent encore significatifs. Mais les citoyens russes ordinaires, particulièrement dans l'état de crise qui a suivi l'éclatement de l'URSS sont-ils bien intimement convaincus de la réalité du nouveau monde, au delà du sentiment temporaire de gloire qu'apportent les exploits successifs ?

En Europe, lorsqu'en février 1984, le Président de la Communauté Européenne, qui à l'époque était le Président de la République Française, a annoncé à La Haye le projet de station spatiale européenne, la nouvelle est tombée dans le vide des médias. Pendant 48 heures, aucun journaliste n'a su par quel bout prendre cette information. Elle sortait du champ clos des déclarations politiques habituelles. Il a fallu à la presse plusieurs jours, plusieurs semaines, plusieurs mois, pour saisir, et là encore souvent superficiellement, la portée de l'événement.

La *Guerre des Etoiles* était peut-être une continuation de la guerre froide. Peut-être aurait-elle pu conduire à une vraie guerre, dans un contexte que nous osons à peine imaginer. Mais peut-être la Guerre des Etoiles était-elle aussi une mise en scène destinée, en embouchant les trompettes, à faire lever les yeux des citoyens tant américains que soviétiques vers les nouveaux terrains de jeu et d'enjeu des habitants de la planète Terre, tout en donnant dans un contexte militaire plus ou moins bien adapté la possibilité d'un coup d'accélérateur pour le développement des technologies utiles à la mise en valeur du système solaire.

L'Europe, un peu en dehors de l'opposition dualiste qui a permis de faire marcher les foules américaines et soviétiques, avait présenté le programme Eurêka, peut-être plus volontariste, fondé sur un challenge positif, et qui affichait plus franchement ses objectifs. La maîtrise des technologies spatiales était l'une des composantes majeures de ce programme. Des soucis d'organisation industrielle et des objectifs mal compris ont peut-être retardé le décollage attendu.

La porte du système solaire est ouverte, les ressources colossales nous attendent, au-delà du développement des activités d'exploration ou de l'utilisation des positions stratégiques. Le voyage dans l'espace est facile. Le passage difficile reste la sortie de la planète Terre. La première chose à faire en vue de l'exploitation des ressources de notre nouveau monde est certainement l'aménagement de ce passage délicat.

TETE DE PONT

En janvier 1985, un événement capital pour l'avenir des européens s'est produit à Rome pendant la réunion des ministres de tous les Etats membres de l'Agence Spatiale Européenne. La décision, aussi importante, sinon plus, que le fut en 1973 celle de lancer le programme Ariane, a été prise de doter l'Europe d'une infrastructure majeure d'accès au domaine spatial. Les programmes de lanceur lourd Ariane-5 et de station spatiale Columbus ont été mis en marche. Et le troisième volet d'une trilogie de base, l'indispensable moyen d'accès de l'homme à l'espace, voyait le jour sous la forme du projet d'avion spatial Hermès.

La difficulté de l'accès à l'espace depuis la surface de la Terre, c'est la nécessité d'accélérer jusqu'à une vitesse de 8 km/s au moins en quelques minutes seulement, tout en traversant une atmosphère dense où, près du sol, dans chaque mètre cube de vent, il y a plus d'un kilogramme de matière à déplacer.

Actuellement, et selon toute probabilité cela restera vrai pour au moins le quart de siècle à venir, les moteurs fusée sont les seuls engins capables de fournir une poussée suffisante, et partant, une accélération, pour mettre en orbite autour de la Terre des masses importantes de plusieurs tonnes ou de plusieurs dizaines de tonnes.

Les propulseurs à poudre, avec des vitesses d'éjection de l'ordre de deux kilomètres par seconde, sont moins chers à concevoir et à réaliser, mais les moteurs cryogéniques, fonctionnant à l'oxygène et à l'hydrogène liquide, pour cracher de la vapeur d'eau à plus de 4 km/s, sont plus efficaces. Ariane-5, fusée à un étage et demi, aura des propulseurs latéraux à poudre pour l'aider à sortir des couches basses de l'atmosphère, autour d'un moteur principal cryogénique qui lui permettra d'atteindre la vitesse orbitale minimale. Chaque Ariane-5 aura la capacité d'envoyer en orbite basse une masse de l'ordre de 20 tonnes. Les premières fusées de cette génération seront prêtes à partir vers 1997.

Ensuite peut-être, de nouveaux systèmes seront étudiés et mis au point, en utilisant des matériaux et des équipements plus performants que ceux dont nous disposons aujourd'hui, tels par exemple le système de transport Sänger d'avion orbital à deux étages, ou les systèmes à moteur *aérobie* qui, comme les avions, puisent l'oxygène dont ils ont besoin dans l'air ambiant pendant la traversée de l'atmosphère.

Plus efficace encore, car les ailes ne sont pas indispensables au voyage vers l'espace, loin s'en faut, on verra peut-être les grands lanceurs mono-étages, qui décolleront verticalement et se poseront de même, comme des super-capsules. Les essais de l'engin DC-X, au cours de l'été

1993, sont la préfiguration de ce nouveau moyen d'accès à l'orbite terrestre.

Le franchissement d'un passage difficile demande une préparation, un effort particulier, un conditionnement spécial, permettant la traversée dans les meilleures conditions de sécurité et d'efficacité. Une fois le passage franchi, les conditions changent, et le contenu prime à nouveau sur le conteneur. Lorsque le navire a franchi l'océan, un port et des docks attendent la marchandise pour le tri et le redéploiement. Et lorsqu'un avion atterrit, un aérogare attend le voyageur pour lui permettre de réorganiser ses bagages et lui proposer de multiples services.

La tête de pont à l'issue du voyage de la fusée venue du sol de la Terre, c'est la station spatiale en orbite basse. Elle comprend des modules d'habitation, où l'on peut vivre plus à l'aise que dans une cabine exigüe, où l'on peut préparer des repas qui soient autre chose que des simples sandwiches, où l'on peut dormir autrement que recroquevillé sur un fauteuil, et satisfaire de manière confortable aux besoins élémentaires de l'hygiène. La station comporte tous les sous-systèmes de service nécessaires à la production d'énergie, à l'évacuation des calories, aux communications avec les centres terrestres et avec les engins spatiaux. La station comporte enfin des structures permettant le déploiement et la mise en oeuvre des autres systèmes spatiaux, et le transfert des charges utiles vers les éventuels remorqueurs interorbitaux, qui seront mieux adaptés que les fusées au transport dans l'espace lui-même. Ces fonctions de havre et de relais sont la justification fondamentale d'une station spatiale en orbite basse.

La fonction secondaire, mais qui dans l'avenir proche, sera certainement la première à être exploitée, c'est de tirer profit des conditions de quasi-impesanteur qui régneront dans les premières stations, pour leur associer des laboratoires d'étude ou de petites unités industrielles pour la production de matériaux spéciaux, médicaments, cristaux, etc.

En 1985, on pensait que Columbus, la première station spatiale européenne, aurait été construite de manière progressive, avec d'abord un module d'habitat et de recherche qui aurait été rattaché en 1992 à la station spatiale américaine, avant que vers 1995, des modules semblables soient associés à des modules de service de conception européenne qui leur auraient assuré une autonomie complète.

La station américaine Freedom, hâtivement qualifiée d'internationale, qui était envisagée à la même époque aurait tourné sur une orbite inclinée à 28,5 degrés, ce qui veut dire que la latitude maximale qu'elle aurait pu survoler aurait été précisément 28,5 degrés. C'était peut-être bien pour

les Etats-Unis, mais un peu court pour l'Europe dont tous les territoires se trouvent à une latitude plus élevée. Cette station n'aurait fait qu'approcher de temps en temps le sud de la Méditerranée, mais il n'aurait jamais été possible d'observer Paris, Munich, ou les tempêtes de la Mer du Nord depuis ses hublots. Les citoyens d'Europe, copropriétaires légitimes, n'auraient jamais eu la fierté de pouvoir regarder dans le crépuscule cette station défilant comme une étoile magnifique. Elle aurait été loin d'offrir tous les avantages que l'Europe pouvait en attendre. Après la turbulence qui a affecté tous les projets depuis le début des années 90, il est probable que les futures stations spatiales seront lancées sur des orbites inclinées à 60 degrés environ, ce qui leur permettra de balayer régulièrement toute l'Europe et l'essentiel des terres habitées de notre planète au fil des rotations croisées de la station et de la planète Terre.

Le troisième élément de l'infrastructure orbitale de base, après le lanceur lourd et la station spatiale, c'est le système qui permettra l'envoi des cosmonautes vers la station et leur retour à la surface de la Terre. Le retour des cosmonautes seulement, car s'il est concevable, et cela a été fait, de ramener sur Terre des satellites et des engins orbitaux, c'est une démarche économiquement aberrante au regard des coûts importants de la mise sur orbite. Elle peut se justifier en partie aujourd'hui par le manque ou l'insuffisance d'infrastructure orbitale de service, mais dans une dizaine d'années, il n'y aura pratiquement plus aucune raison valable de ramener du matériel sophistiqué sur Terre une fois mis sur orbite.

Par contre, il est évident qu'il faut ramener les cosmonautes au sol. Les navettes, avions spatiaux et autres capsules pourront servir d'habitat temporaire et de laboratoire, mais leur fonction essentielle sera de transporter des hommes vers les orbites basses, et de les ramener sains et saufs à la surface de la Terre. Il faudra combiner les avantages des systèmes mis en oeuvre par les américains et par les soviétiques, tout en évitant certains de leurs inconvénients.

La navette américaine a l'avantage de pouvoir manoeuvrer lors de sa rentrée dans l'atmosphère. Elle offre une forme aérodynamique qui permet un freinage et une rentrée en douceur. Mais elle a le gros inconvénient de nécessiter l'envoi de 60 tonnes de poids mort à chaque voyage. Un autre inconvénient est la nécessité d'utiliser une piste d'aviation très longue, spécialement préparée. Le troisième inconvénient, plus grave, est d'imposer la cohabitation des charges utiles commerciales ou scientifiques avec les membres d'un équipage pour lesquels les besoins d'environnement et de sécurité sont beaucoup plus stricts que ceux qui sont nécessaires lorsqu'une charge utile voyage seule sur un vol non habité. L'impact négatif de cette cohabitation forcée sur la conception technique et sur les coûts des charges utiles est considérable.

Chez les soviétiques et maintenant chez les russes, l'envoi des charges utiles et des équipages est découplé, grâce au système Soyuz-Progress de cabines habitées et de vaisseaux automatiques de transfert du matériel. Cette souplesse d'utilisation rend le système très efficace. Avec des manoeuvres orbitales appropriées, la précision d'atterrissage est au moins aussi bonne que celle d'une navette, sans la nécessité d'une infrastructure lourde. L'inconvénient, c'est que la forme sphérique de la capsule entraîne au cours de la rentrée une accélération légèrement plus importante que celle de la navette, avec un maximum qui approche 5 g pendant quelques secondes. Mais c'est très supportable pour des êtres humains en bonne santé.

Chaque vol soviétique et maintenant russe demande la mise en oeuvre d'un nouvel engin, mais il s'agit d'un vaisseau relativement simple et léger. On ne lui demande que quelques dizaines de minutes ou quelques heures au maximum de service au départ, et quelques heures de préparation suivies d'une dizaine de minutes de service au retour. Entre le départ et le retour, le Soyuz peut rester plusieurs mois en orbite, en situation d'attente.

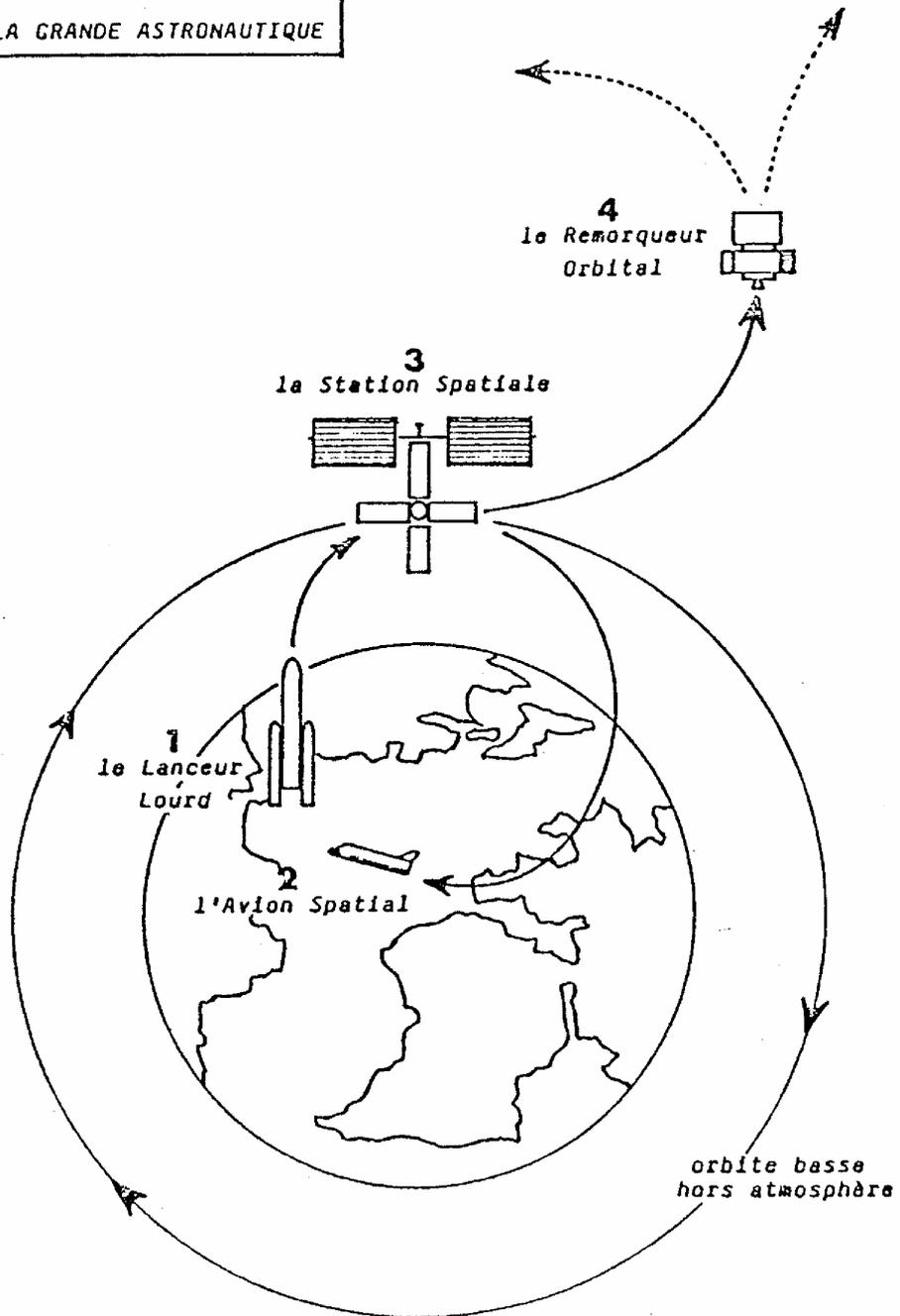
La navette américaine est beaucoup plus complexe. Ses structures, son équipement électronique, ses aménagements de servitude, sont installés à demeure, et sont réutilisés à chaque vol. Mais la navette est loin d'être aussi totalement réutilisable qu'on a pu le lire dans les pages publicitaires de la NASA. Chaque vol demande un entretien considérable et des remplacements d'organes, y compris de moteurs complets, et l'opération est loin d'être gratuite, pour une autonomie dans l'espace qui ne dépasse guère la dizaine de jours.

Le système de transport européen, avec Ariane-5 et Hermes, aurait été plus souple que le système américain, et pratiquement aussi efficace que le système russe. Ariane-5 sera aussi bien adaptée à l'envoi de satellites opérationnels qu'à l'expédition des structures modulaires sur lesquelles vont se développer les bases de la grande astronautique. Lors des lancements automatiques, elle n'aura pas besoin d'emporter toute une avionique inutile en dehors des vols habités, ni d'ailes qui au départ d'un vol spatial, la phase la plus difficile du vol, sont plus gênantes qu'autre chose. Et elle sera libérée des contraintes liées à la présence des hommes. Parallèlement, elle sera capable de lancer une capsule ou un autre moyen de transport habité avec une capacité équivalente à celle de la navette américaine, pour une masse beaucoup plus faible.

Bientôt seuls compteront le transport de base, la traversée de l'atmosphère et l'accélération à 8 km/s sur une trajectoire de rendez-vous.

Illustration N°10 : relais en orbite basse

LES 4 " MOUSQUETAIRES "
DE LA GRANDE ASTRONAUTIQUE



Lorsque les stations spatiales seront opérationnelles, et c'est déjà le cas chez les russes, des équipements comme Spacelab et les aménagements scientifiques de la navette n'auront plus de raison d'être. Tout se passera à l'intérieur et autour de la station, les engins de transport restant en attente comme une voiture qu'on laisse le matin au parking de l'usine ou du bureau en attendant de la reprendre le soir pour rentrer à la maison.

Depuis près de vingt ans déjà, les soviétiques ont disposé de stations spatiales d'abord élémentaires puis de complexité croissante jusqu'à la station Mir. Elles n'ont jusqu'ici servi que de laboratoire, technologique et scientifique. Mais avec la construction de complexes plus évolués, les stations spatiales en orbite basse, russes et autres, vont pouvoir commencer à jouer leur rôle essentiel, de tête de pont, de relais.

Tout d'abord des relais vers les orbites basses elles-mêmes, avec le déploiement et l'entretien de satellites scientifiques destinés soit à voler de leurs propres ailes, soit à voler de concert avec la station. En effet, une station spatiale en elle-même est loin d'être le meilleur endroit pour conduire les délicates expériences scientifiques en micro-gravité ou les observations d'astronomie. La présence d'hommes en mouvement à bord conduit constamment à des micro-irrégularités d'attitude, et à une qualité d'impesanteur qui est loin d'être parfaite. Actuellement, on utilise le temps de sommeil des cosmonautes, pendant lequel ces perturbations sont minimales, pour effectuer par exemple les expériences de cristallisation. Dans un avenir proche, des petits laboratoires autonomes volant à quelques centaines de mètres ou quelques kilomètres de la station, seront beaucoup plus efficaces, et les cosmonautes pourront facilement y venir pour des visites techniques ou pour contrôler des opérations.

Les stations en orbite basse serviront de relais vers l'orbite géostationnaire pour le déploiement des grands satellites de communication, avec leurs antennes qui atteindront bientôt des dizaines, voire des centaines de mètres de diamètre, ou des futurs postes d'observation également en orbite géostationnaire, ceux qui en permanence auront l'oeil sur une région donnée de notre planète, comme le font déjà les Météosats, mais avec une résolution et des capacités d'analyse beaucoup plus fines. On pourra commencer dès la prochaine décennie à assembler tous ces satellites en orbite basse, dans une station ou à côté d'elle. Ils seront testés, ajustés et qualifiés par des spécialistes qui résideront sur la station ou qui y viendront pour le temps d'une opération. Puis ils seront lentement remorqués vers l'orbite géostationnaire au cours d'une opération qui durera plusieurs jours ou plusieurs semaines, par des remorqueurs inter-orbitaux, une nouvelle classe d'engins spatiaux, qui va bientôt montrer le bout de son nez chez les américains comme complément de la navette, et qui est appelée à se développer considérablement dans les années 90.

TRANSPORTS

Comme nous l'avons vu lors de la description générale de notre nouveau monde, il y a fondamentalement deux besoins de transport très différents à satisfaire pour voyager dans l'espace.

D'un côté, il y a l'opération de sortie depuis la surface d'une planète, et bien sûr plus particulièrement de la nôtre, avec toutes les contraintes que nous connaissons, une force de gravité importante qui entraîne une vitesse de libération élevée, et une atmosphère dense au-dessus de laquelle il faut d'abord s'élever. Cette mise en orbite initiale demande des moyens puissants, au sens premier de la puissance, c'est-à-dire capables de libérer une énergie importante dans un temps très court.

De l'autre côté, la frontière entre les deux côtés étant la *coquille* des orbites basses, il y a le voyage spatial proprement dit, où les engins se déplacent sur des orbites libres, et où à priori rien de catastrophique ne peut arriver même en l'absence de propulsion, ce qui laisse pour manoeuvrer tout le temps que l'on veut bien y consacrer.

Disposant donc d'heures, voire de jours, pour effectuer les manoeuvres, on peut alors envisager l'emploi de propulseurs de faible puissance, mais qui fonctionneront pendant de longues durées, avec une efficacité globale bien supérieure à celle des fusées à propulsion chimique utilisées actuellement. Et des manoeuvres, il y en a besoin dans l'espace, pour de multiples fonctions.

De petits impulseurs ioniques, de très faible puissance, sont déjà utilisés comme moteurs de contrôle d'attitude sur un certain nombre de satellites de communication, d'observation de la Terre, ou de satellites scientifiques. On cherche à garder aux satellites une orientation déterminée par rapport au Soleil, pour l'éclairage des panneaux générateurs d'électricité, et également on s'efforce de maintenir un pointage précis par rapport à tel point de la Terre ou telle direction de l'espace pour les besoins opérationnels. Les satellites sont soumis à toutes sortes d'influences perturbatrices, la traînée dans l'atmosphère résiduelle, la pression de radiation, le gradient de gravité qui tend à aligner le plus grand axe du satellite dans la direction du centre de la Terre, le champ magnétique, etc. En général, des roues à inertie servent à assurer la stabilisation fine, mais lorsque la roue vient à tourner trop vite, ou trop lentement, il faut alors effectuer une manoeuvre de compensation. Elle se fait au moyen d'impulsions données par de petits propulseurs à gaz, ou maintenant, par de petits propulseurs ioniques, dans lesquels un champ électrique expulse les atomes excités, et qui sont beaucoup plus économiques en terme de masse de fluide utilisé.

Un autre besoin concerne les satellites en orbite géostationnaire. Ils sont d'abord mis sur une orbite basse, ou sur une orbite de transfert par leur lanceur. Ensuite, il faut dans le premier cas commencer par mettre le satellite sur orbite de transfert, et dans les deux cas, finir par circulariser sa trajectoire à 42 000 km du centre de la Terre, dans le plan de l'équateur. C'est cette contrainte du plan de l'orbite qui donne un avantage notable aux centres de lancement équatoriaux dans ce cas particulier des lancements vers l'orbite géostationnaire la différence étant minimale dans les autres cas. Après le lancement initial, il faut pour la mise à poste rajouter 1,5 km/s à la vitesse du satellite dans le cas d'Ariane, ou près de 4 km/s en deux fois dans le cas de la navette américaine. Les mises en orbite géostationnaire par les soviétiques, et maintenant les russes, sont encore plus complexes, puisqu'ils lancent à partir d'une latitude élevée, et pour éviter une pénalisation excessive lors du changement de plan qui doit ramener l'orbite du satellite dans le plan équatorial, ils utilisent une orbite de transfert avec un apogée de l'ordre de 100 000 km, y font le changement de plan à faible vitesse, donc avec un minimum de dépense d'énergie, puis, dans le plan de l'équateur, redescendent le satellite à 42 000 km par deux manoeuvres successives.

Quelle que soit la manière dont se fait le lancement initial, les accroissements de vitesse nécessaires pour la mise à poste sont donnés par des moteurs à poudre, ou des moteurs à propergols liquides, intégrés au satellite, et dont la masse est souvent aussi importante que celle du satellite proprement dit.

Le Soleil, la Lune, les irrégularités de forme de la Terre, exercent une influence sur l'orbite des satellites, et entraînent des perturbations qu'il faut corriger en modifiant la vitesse du satellite. Quelquefois, il y a des modifications volontaires lorsqu'il faut déplacer un satellite géostationnaire d'un poste à un autre, par exemple, pour l'amener d'un point à la verticale de l'Atlantique à un autre point à la verticale de l'Océan Indien.

Les corrections de vitesse sont là aussi faites avec des moteurs qui sont intégrés au satellite, et qui sont alimentés par des carburants lancés en même temps que le satellite. Lorsque les réservoirs sont vides, le satellite ne peut plus être contrôlé, et c'est actuellement la fin irrémédiable de sa vie, même si ses autres sous-systèmes sont en parfait état de marche.

Au delà des problèmes de satellites, il y a les manoeuvres et les corrections de trajectoire des sondes qui sont parties explorer la Lune ou les profondeurs lointaines du système solaire. Il n'est pas possible, même avec la meilleure technique du monde, de viser directement un objectif lointain. Une sonde est envoyée dans une direction approximative, aussi

bonne que possible, souvent à une fraction de degré près, vers son objectif. Mais on ne peut connaître précisément à l'avance toutes les perturbations auxquelles la sonde sera soumise, et même une erreur de quelques dixièmes de degré d'angle au départ, à une distance de plusieurs centaines de millions de kilomètres, donnerait des incertitudes de l'ordre du million de kilomètres, beaucoup trop importantes pour des approches précises de l'objectif. Les sondes sont donc suivies depuis la Terre pour déterminer avec précision leur trajectoires réelles, et à mi-parcours, des ordres de correction de trajectoire sont envoyés. Des petits moteurs fusées s'allument pendant quelques instants pour ajouter dans la direction voulue les quelques mètres par seconde qui modifient la vitesse de l'engin et lui permettent une meilleure approche de son but. Lorsqu'elle s'approche de celui-ci, la sonde met en action des moyens de repérage et de navigation autonomes, et l'ordinateur de bord commande les dernières corrections de trajectoire pour effectuer un rendez-vous ou un survol précis.

Aujourd'hui, toutes les manoeuvres dans l'espace se font avec des moteurs intégrés aux engins, en particulier pour les manoeuvres importantes dans l'environnement proche de la Terre. Ces moteurs, fonctionnant avec de la poudre, ou des propergols liquides, sont puissants, mais nous le savons, peu performants par rapport aux moteurs ioniques. Par manque d'une infrastructure orbitale appropriée, il est difficile qu'il en soit autrement pour le temps présent.

A partir de la fin des années 90, les conditions vont changer considérablement. Avec la disponibilité des bases techniques que seront les stations orbitales évoluées, avec la présence permanente de techniciens bien équipés à bord de ces stations, la mise en place des remorqueurs inter-orbitaux deviendra possible. Dans tous les centres spatiaux de la planète, de petites équipes étudient déjà ces engins, dont les moteurs ioniques seront alimentés en énergie soit par de grands panneaux solaires, soit par des réacteurs nucléaires, plus compacts.

Ces remorqueurs, dont les formes n'auront plus besoin d'être fuselées, puisqu'ils n'auront jamais à traverser les couches denses de l'atmosphère, serviront à ravitailler les satellites en carburants, ou à les ramener économiquement jusqu'aux laboratoires ou ateliers d'une station orbitale pour des réparations ou un entretien éventuels, augmentant ainsi considérablement la durée de vie et la rentabilité de ces satellites.

La mise à poste des satellites géostationnaires, mais peut-être aussi de tous les satellites, quelle que soit leur orbite d'affectation, pourra se faire à l'aide de ces remorqueurs, après un déploiement initial et une vérification opérationnelle à proximité d'une station. L'efficacité des propulseurs ioniques étant 10 à 15 fois meilleure que celle des fusées à

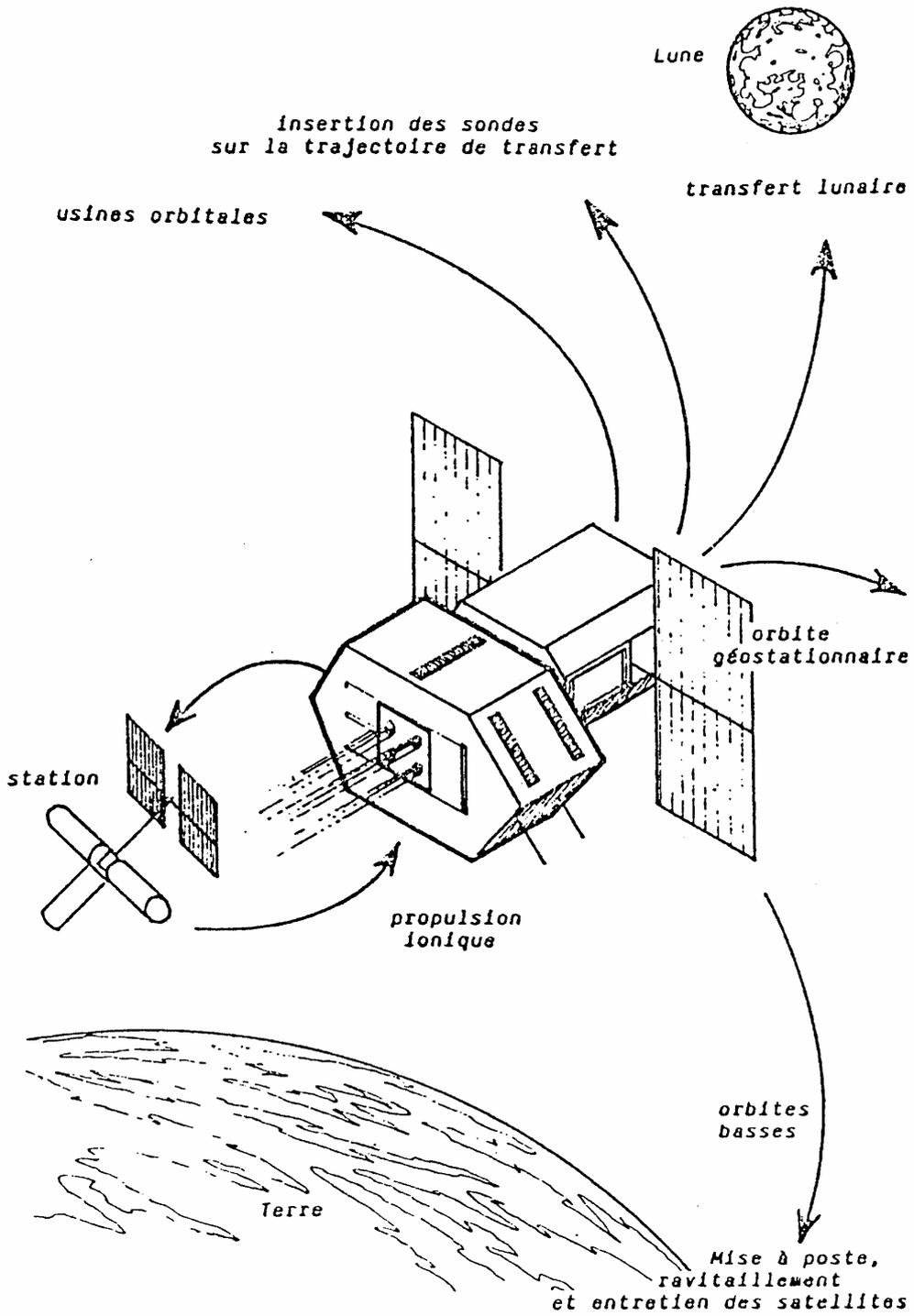
propergols, les demandes en *delta-V*, c'est-à-dire les accroissements de vitesse, nécessaires pour faire un *virage* spatial et changer de plan d'orbite, aujourd'hui prohibitives à cause des masses importantes de carburant embarqué qu'elles nécessitent, ne seront plus qu'un facteur d'ordre secondaire, plus que largement compensé par la sécurité technologique qu'apportera le contrôle effectué à bord des stations, véritables centres de réception en orbite. L'expérience montre que trop souvent encore, les satellites et les sondes sont soumis aux aléas du bon déploiement automatique d'un sous-système qu'il avait fallu compacter pour le lancement.

La haute atmosphère, vue depuis l'espace, pourra même faciliter un certain nombre de manoeuvres. Des engins totalement spatiaux, mais munis de plans aérodynamiques, pourront descendre dans cette haute atmosphère, à des altitudes de l'ordre de la centaine de kilomètres, et s'appuyer sur elle pour effectuer des virages avec un minimum de perte d'énergie, tout en gardant une vitesse quasi-orbitale, avant de remonter hors de l'atmosphère, à plusieurs centaines de kilomètres d'altitude, en ayant changé de plan d'orbite, en ayant évolué par exemple d'une orbite de station inclinée à 60 degrés jusqu'à une orbite polaire. D'une manière un peu différente, après la mise à poste d'un satellite en orbite géostationnaire, un remorqueur pourra, après s'être remis en orbite de transfert, faire des économies d'énergie remarquables pour le retour en orbite basse, en déployant des ballons de grand diamètre et en effectuant un ou plusieurs passages en haute altitude dans l'atmosphère, où par aéro-freinage il diminuera sa vitesse pour se retrouver en orbite basse près de sa station d'attache, avec une utilisation minimale des moteurs.

A peine plus loin que l'orbite géostationnaire en termes de temps et d'énergie, il y a la Lune. Dès le tournant du siècle, lorsque nous allons retourner sur la Lune pour nous y établir de manière permanente, les remorqueurs orbitaux feront la navette entre la station terrestre en orbite basse, et une orbite d'attente autour de la Lune, sur laquelle on trouvera peut-être même à relativement court terme une station en orbite basse lunaire faisant fonction de relais vers des bases implantées au milieu des *mers* ou sur le bord des cratères.

Enfin, mais ce n'est sûrement pas tout, les remorqueurs pourront servir à lancer des sondes vers les autres planètes, vers les astéroïdes, ou vers les profondeurs du système solaire. Après avoir communiqué à la sonde la vitesse de transfert initiale nécessaire pour se diriger vers

Illustration N°11 : remorqueur spatial



son objectif, le remorqueur se retournera, ralentira, et peut-être d'ailleurs aidé par des manoeuvres d'aéro-freinage dans la haute atmosphère terrestre, reviendra à sa station d'attache, prêt à lancer d'autres sondes ou d'autres satellites.

Au début du siècle prochain, la production d'oxygène lunaire permettra d'alimenter économiquement les remorqueurs spatiaux. On peut même penser que la maîtrise de l'énergie colossale que le rayonnement du Soleil met à notre disposition en orbite permettra la préparation massive de carburants nouveaux d'origine lunaire, à base par exemple d'oxygène liquide et de poudre d'aluminium. Dans une débauche d'énergie, les moteurs ioniques laisseront peut-être à nouveau une place aux puissants moteurs-fusées à propergols, pour des voyages à accélération puis décélération fortes et continues. Aujourd'hui on utilise des trajectoires économiques où l'on se contente d'une impulsion pour la mise sur orbite de transfert au départ, et d'une autre impulsion pour la mise sur orbite finale à l'arrivée, le vol lui-même étant balistique, c'est-à-dire sans propulsion. Dans une vingtaine d'années, avec les nouveaux propergols, au lieu des 3 jours nécessaires à un Terre-Lune en vol balistique, il ne faudra plus qu'une dizaine d'heures. On pourra faire Terre-Lune aller et retour dans la journée. La banlieue...

LA LUNE (bis)

La Lune, nous y voici à nouveau. Au début des années 2000, quand les hommes, c'est-à-dire les américains, les russes, les japonais peut-être, les européens pourquoi pas, bref, les terriens, poseront à nouveau les pieds sur la Lune, il se sera passé une trentaine d'années depuis le vol historique de juillet 1969 où Neil Armstrong fit un grand bond pour l'humanité.

En 1911 et 1912, Amundsen et Scott, à quelques semaines l'un de l'autre, atteignirent le pôle Sud à l'issue de voyages épiques. Puis personne ne retourna au pôle Sud pendant 45 ans, jusqu'en 1957, année géophysique internationale, qui vit une coordination mondiale d'efforts sans précédent. Aujourd'hui, 3 000 personnes vivent en permanence en Antarctique, sur des bases bien aménagées et régulièrement ravitaillées. Bien soutenues par cette infrastructure, des équipes vont régulièrement au pôle Sud, le vrai, le géographique, ou l'autre, le magnétique, qui passe son temps à se déplacer.

En 1957, c'est aussi dans le cadre de l'année géophysique internationale que les soviétiques ont lancé Spoutnik-1 un certain 4 octobre, devançant le projet américains Vanguard. Dépité, agacé, l'aigle américain se rebiffa, et quelques années plus tard, lança le défi à la Lune,

objectif symbolique, mythique. En une décennie, il fallut maîtriser la mise en orbite de charges de plusieurs tonnes, le vol habité, et le rendez-vous orbital. Après cela, que le vol se fasse en orbite basse terrestre, ou qu'il aille jusqu'à la Lune, la différence était relativement faible d'un point de vue technique. Après l'accomplissement de l'exploit, l'intérêt pour la Lune ayant considérablement diminué chez les américains, les derniers vols Apollo furent annulés, et une partie du matériel ainsi récupéré servit à l'expérience Skylab et à la rencontre Apollo-Soyuz.

Pendant ce temps, les soviétiques apprenaient aussi à maîtriser la mise en orbite de charges lourdes, le vol habité, et le rendez-vous spatial. Si les aléas et le calendrier leur avaient été favorables, les soviétiques auraient peut-être relevé le défi de la Lune. A quelques mois près, ils n'ont pas été loin de réussir. Mais l'histoire s'est passée autrement et ils ont ensuite choisi une démarche plus structurée, ils ont commencé à lancer des embryons de stations spatiales, puis enfin de véritables petites stations avec la série des Saliout.

Pendant ce temps là, les européens, fascinés et stupéfaits, regardaient et applaudissaient, assis dans le confort moral de vingt siècles de civilisation paysanne et humaniste. Ils restaient sans rien faire, à l'exception du travail de quelques petites équipes du CNES et de l'Agence Spatiale Européenne, qui construisaient Ariane, une fusée bientôt remarquable, et Spacelab, un laboratoire orbital magnifique mais impotent, dépendant du bon vouloir d'un transporteur étranger souvent retors auquel il n'était pas toujours facile ni prudent de faire confiance.

Le vol sur la Lune en 1969 était un bel exploit, mais techniquement prématuré, économiquement démesuré, si ce n'est que la fierté n'a pas de prix. Il était bâti comme un raid, et réalisé sans aucun support logistique au passage des étapes intermédiaires.

A la fin du siècle, le retour sur la Lune sera solidement appuyé sur une infrastructure en orbite basse terrestre, avec des moyens de transports interorbitaux mieux adaptés que ne l'était le matériel des vols Apollo. Il se fera non plus vers une Lune mythique, mais bien vers cette boule concrète de sable et de rochers, grande comme un continent terrestre, et sur laquelle, à 380 000 km, on voit se projeter l'ombre de la Terre les soirs d'éclipse.

En 1990, une sonde japonaise, Muses-A, a repris le chemin de la compagne de nos nuits et de nos jours, libérant un petit satellite qui s'est mis en orbite autour de la Lune auprès de laquelle il a tourné pendant plus d'un an. Bientôt, une sonde soviétique se mettra en orbite autour de la Lune pour en faire la cartographie systématique et faire par télédétection un premier relevé exhaustif des caractéristiques minérales de sa surface.

Vraisemblablement, d'autres sondes suivront. A nouveau des robots se poseront sur la Lune et s'y promèneront pour en poursuivre l'exploration, et quand, dans une dizaine d'années environ, les hommes retourneront sur la Lune, ce sera avec des projets opérationnels, et l'intention d'établir des bases permanentes.

En dehors de la connaissance scientifique plus poussée de l'histoire du système solaire et de la Lune elle-même que pourra permettre la reprise de l'exploration, notre satellite aura très vite une utilité opérationnelle.

D'abord pour les astronomes. Sur Terre, l'atmosphère est un filtre qui ne laisse passer pour l'observation qu'un spectre limité de fréquences, et encore, c'est un filtre turbulent qui rend difficile une vision nette, même au sommet des montagnes où vont se percher les observatoires.

En 1986, le Télescope Spatial a été lancé en orbite pour s'affranchir de cette atmosphère, et tous les astronomes en attendaient des résultats remarquables. En dépit d'une légère myopie due à un défaut de fabrication, le Télescope Spatial a tenu l'essentiel de ses promesses. Lancé par les européens, le satellite Hipparcos a, malgré une entrée dans l'existence difficile, récolté une moisson scientifique de premier ordre. Mais il est extrêmement difficile et complexe de maintenir la stabilité de tels satellites dont la masse n'est que de quelques tonnes. L'inertie est faible, et les perturbations qui agissent sur le satellite ont vite fait d'introduire des dérives de pointage, qu'il faut corriger activement sans pour cela introduire ni chocs ni vibrations, ce qui n'est pas facile.

La masse de la Lune lui confère une stabilité d'assise pratiquement équivalente à celle que l'on peut trouver sur la Terre, même s'il lui arrive d'avoir une activité sismique occasionnelle. On retrouve l'avantage des implantations terrestres. Et avec l'absence d'atmosphère, on garde les avantages des installations orbitales. La première base lunaire sera probablement une base astronomique.

Parce que la Lune est en dessous d'une distance critique dans sa relation avec la Terre, elle s'est stabilisée en tournant toujours la même partie de sa structure vers la Terre, comme si elle était ancrée par un fil invisible. Vue de la Terre, la Lune présente une face visible et une face cachée, aux limites pratiquement invariantes à des petits mouvements de balancement près, de libration, autour de la position moyenne d'équilibre.

Entre la Terre et la face cachée, il y a toute la masse de notre satellite, qui fait écran, en particulier pour les fréquences radio. Comme il n'y a pas d'atmosphère qui pourrait permettre aux ondes de suivre la courbure par des rebonds successifs comme elles le font autour de la

Terre, la face cachée de la Lune est du point de vue radioélectrique un endroit remarquablement silencieux, infiniment plus que la surface de la Terre, où en permanence une multitude de fréquences se superposent et se croisent pour former un bruit de fond important. La face cachée de la Lune sera un lieu privilégié pour l'implantation d'observatoires de radio-astronomie, qui nous permettront de repartir d'un nouvel élan pour la recherche de planètes extra-solaires, de nouvelles galaxies et autres trous noirs ou blancs.

Dès qu'il y aura une ou des équipes sur la Lune, temporairement d'abord, puis de manière permanente grâce à des relèves régulières, il y aura des habitats. Ceux-ci, au début, seront vraisemblablement des adaptations de modules de stations spatiales en ce qui concerne les structures primaires, les systèmes de sas d'accès, ou les équipements de support de vie.

Mais on retrouvera une pesanteur, même si elle n'est qu'un sixième environ de la pesanteur terrestre. On pourra verser le café dans les tasses sans risquer de le voir s'envoler en une multitude de petites boules, et poser des manuels sur une table sans avoir à les attacher avec des bandes de velcro ou des élastiques. Et quand un objet échappera à l'attention d'un travailleur lunaire, il n'aura pas à chercher partout pour le retrouver, comme doit le faire un astronaute dans une station orbitale.

Un petit générateur nucléaire ou des panneaux solaires pourvoient aux besoins en énergie. Mais dans ce dernier cas, il faudra prévoir des moyens relativement importants de stockage de cette énergie, car à la surface de la Lune, 14 *jours* d'obscurité succèdent aux 14 *jours* d'éclairement par le Soleil, en comptant en jours terrestres, qui resteront probablement l'unité de base de mesure du temps passé.

A une seconde de temps de transmission de la Terre, les colons lunaires seront en permanence en communication avec des bases terrestres et avec des stations orbitales, et la vie se déroulera probablement au rythme de Houston, de Baïkonour, ou de Darmstadt, là où se trouve, et où se trouvera peut-être encore le centre de contrôle européen.

Le sol lunaire, entassé sur quelques mètres d'épaisseur par dessus des structures à demi-enfouies, offrira par sa masse et son épaisseur une protection contre les radiations cosmiques potentiellement dangereuses, puisqu'elles ne seront plus arrêtées par une atmosphère comme elle le sont sur la Terre. Cette masse-écran permettra aussi d'assurer une régulation thermique pour protéger les colons contre les écarts de températures qui se produisent à la surface de la Lune entre le jour et la nuit lunaire, et qui peuvent atteindre près de 200 degrés. En plein Soleil,

il fait plus chaud sur la Lune que sur les déserts les plus torrides de la planète Terre, et la nuit, la température superficielle descend beaucoup plus bas que tout ce qu'a jamais pu connaître le coeur de la Sibérie. Pour les promenades extérieures au clair de Terre, un simple scaphandre ne suffira pas, et une combinaison spatiale thermiquement régulée sera de rigueur, semblable à celle qu'utilisent les cosmonautes pour leurs sorties hors de leur vaisseau.

La Lune présente une face visible invariante quand on la regarde depuis la Terre. Par effet réciproque, pour les habitants des bases situées sur cette face visible, la Terre apparaîtra toujours dans la même direction de l'espace, par rapport aux repères du sol lunaire, accrochée comme un luminaire bleuté dans le ciel de la Lune. Il y aura une pleine terre, une nouvelle terre, et des croissants de terre, mais ils évolueront apparemment sur place au fil du temps.

Après l'astronomie ou peut-être en même temps, parce que la Lune est si proche et le voyage si facile depuis les orbites terrestres, viendront les premières expériences d'exploitation des ressources de la Lune.

L'extraction d'oxygène, présent à 40% dans le sol lunaire, sera vraisemblablement le premier objectif. Pour la régénération de l'atmosphère dans les habitats, les besoins resteront certainement limités par suite d'un recyclage chimique ou biologique. L'oxygène sera surtout *exporté* pour servir de carburant, de masse de réaction dans les systèmes de transport circumterrestres, qu'ils soient ioniques ou chimiques.

Au-delà de cette première *industrie*, sans doute assez rapidement, il y aura l'extraction du silicium, également très abondant dans le sol lunaire, pour la fabrication des cellules solaires destinées à tous les générateurs orbitaux. Vraisemblablement ces cellules auront des taux de conversion de l'énergie moins performants que ce que permettra l'état de l'art de la technique terrestre, mais elles seront tellement plus économiques d'un point de vue spatial, que le jeu en vaudra certainement l'étincelle. Les centrales électriques orbitales, en particulier, demanderont d'immenses panneaux, avec des dimensions qui atteindront des centaines de mètres et même des kilomètres, et s'il fallait les construire avec des éléments venus de la Terre, le coût du transport serait extrêmement élevé. Les cellules photovoltaïques viendront de la Lune, et peut-être aussi le matériau des structures porteuses, avec l'extraction du fer, de l'aluminium, ou des autres métaux qui entrent également dans la composition du sol lunaire.

Il y a depuis quelques années une mode de l'*hélium-3* qui, apporté par le vent solaire, s'est incrusté dans les couches superficielles du sol lunaire. L'hélium-3 pourrait théoriquement être un carburant idéal, propre,

pour de futurs réacteurs de fusion nucléaire contrôlée. Mais les équations montrent que pour faire fonctionner ces réacteurs il faudrait approcher les limites structurelles de la matière, et l'utilisation de l'hélium-3 ne peut actuellement qu'être une hypothèse très lointaine.

Sur la Lune même, sans avoir besoin de faire appel à des procédés de séparation, on peut raisonnablement penser que la fabrication de céramiques et de produits vitreux par fusion du sol lunaire permettra le développement des habitats par l'adjonction de modules de fabrication indigène. Il faut imaginer aussi le développement d'une petite agriculture lunaire sous des serres pressurisées, pour subvenir à l'essentiel des besoins alimentaires des équipes en place, grâce à un recyclage des produits biologiques.

Il est donc probable que dans les années 2000 à 2020 va se développer une petite industrie lunaire, soutenue par la présence de quelques dizaines d'hommes. L'objectif essentiel sera d'apporter des éléments de soutien matériel au développement et au fonctionnement des grandes infrastructures orbitales, à partir du moment où des besoins importants commenceront à se faire sentir en terme de masse, dans des conditions énergétiques très avantageuses par rapport à la fourniture des mêmes éléments au départ de la Terre.

Plus loin, dans un quart de siècle et plus, on peut encore assez clairement envisager, avec l'installation de grandes usines et de centrales électriques en orbite autour de la Terre, une extraction de minerais lunaires non plus par tonnes ou dizaines de tonnes, mais par milliers puis par millions de tonnes, pour construire ces centrales et alimenter ces usines dont les retombées matérielles finales seront alors bien sûr destinées à un retour sur Terre au bénéfice de tous ceux, la quasi-totalité des terriens, qui seront restés à la surface de la planète. Il y a des projets de catapultes électromagnétiques pour mettre les minerais sur orbite à partir du sol lunaire, avec un maximum d'automatisation, et en dépensant un minimum d'énergie. Le volume des affaires entraînera alors le développement de véritables petites *villes* à la surface de la Lune, avec quelques centaines d'habitants en permanence. Les enfants d'aujourd'hui seront les artisans et les ingénieurs de ces développements grandioses. Là, nous arrivons aux limites de ce que nous permettent les visions technologiques actuelles. Il y aura certainement d'autres suites, d'une ampleur colossale, mais c'est aux petits-enfants et arrière-petits-enfants de l'espace qu'elles appartiendront.

La Lune est bien près de la Terre, à quelques heures ou quelques jours au plus. Mais à moins d'un miracle, elle manque singulièrement d'un élément bien utile, l'hydrogène. Le miracle serait que près des pôles lunaires, au fond de cratères qui ne voient jamais la lumière et la chaleur

du Soleil, il reste des traces d'un noyau de comète qui se serait écrasé sur la Lune. Ce genre événement n'est pas impossible et sur la Terre même, il s'est probablement produit en Sibérie en 1908, entraînant une déflagration gigantesque due à l'évaporation explosive lors de l'entrée dans l'atmosphère. Au fond des cratères polaires, à des températures vraisemblablement proches du zéro absolu, il n'y a pas de dégazage qui nous permettrait de repérer de la vapeur d'eau avec nos spectromètres, et la question restera entière, sans doute jusqu'au jour où des géologues lunaires iront voir sur place.

Indépendamment de l'hélium-3, les atomes d'hydrogène soufflés par le vent solaire lors des éruptions de la chromosphère, la couche externe du Soleil, s'incrustent aussi dans les molécules des poussières de la surface lunaire, et y restent prisonniers. On pourrait penser les utiliser pour fabriquer de l'eau, mais la proportion d'hydrogène ainsi retenue n'atteint qu'à peine quelques parties par million dans les meilleurs des cas. Il serait possible de l'extraire en faisant dégazer par chauffage les couches superficielles du sol lunaire. Cela entraînerait la manipulation de masses énormes de sol, plusieurs milliers de tonnes pour chaque kilogramme d'hydrogène récupéré, et il est loin d'être sûr que l'opération pourrait devenir rentable. Pendant de nombreuses années encore, l'hydrogène dont on aura besoin en orbite, et même sur la Lune, devra être expédié depuis la Terre.

A long terme, certains visionnaires ont imaginé des bombardiers d'eau pour alimenter la Lune : des voiliers solaires géants avec des envergures de plusieurs dizaines de kilomètres iraient à la rencontre de noyaux de comètes pour en arracher des blocs de quelques centaines ou milliers de tonnes de glace, puis navigueraient pour se placer sur une orbite de collision avec la Lune. Quelques jours avant l'impact, les bombardiers d'eau libéreraient leur charge qui irait s'écraser sur des zones prédéterminées de la Lune où il suffirait d'envoyer des bulldozers pour récupérer la glace, tandis que les voiliers soudain allégés feraient une manoeuvre d'évitement avant de repartir pour un autre voyage. C'est encore une vision très lointaine, et au début du siècle prochain, il faudra sans doute se contenter de méthodes plus classiques.

ASTEROIDES (bis)

De l'hydrogène, de l'eau, il y en a en quantité, sous forme de glace, sur la planète Mars. La surface de cet astre magnifique garde encore la trace des rivières et des fleuves qui coulaient à sa surface il y a quelques milliards d'années, quand le Soleil rayonnait beaucoup plus de chaleur qu'il ne le fait aujourd'hui. L'exploration de Mars, qui a repris au début des années 90, nous réservera certainement beaucoup de surprises, malgré

les échecs initiaux des missions Phobos et Mars Observer. Mais si l'on pense à une exploitation, du point de vue du transport spatial, Mars est comme la Terre, au fond d'un puits de gravité, avec sensiblement les mêmes problèmes de mise en orbite.

Pourquoi retourner au fond d'un trou, d'un puits de gravitation, alors que l'on dispose dans l'espace libre de toutes les facilités de déplacement et de navigation. Mars sera donc un but d'exploration passionnant, mais pour l'exploitation des ressources, le système solaire a beaucoup mieux à offrir à l'humanité.

Des centaines de milliers d'astéroïdes orbitent dans toute la banlieue de l'étoile Soleil. Déjà, Gaspra et Ida, deux de ces petites planètes, ont été observées en cours de route par des sondes aux destinations plus lointaines, mais nous ne connaissons l'essentiel des petits corps que par le biais de nos télescopes et de nos spectromètres. La spectrométrie, si elle ne nous permet pas de déterminer avec précision leur forme et leur taille exacte, nous renseigne bien par contre sur leur composition : de l'eau, des composés carbonés, du fer, du nickel, des métaux précieux. La ceinture principale des astéroïdes est loin, entre Mars et Jupiter, et il faudra peut-être attendre les voiliers solaires pour envisager une exploration systématique. D'autres astéroïdes, plus petits, peut-être moins intéressants d'un point de vue purement scientifique que ceux qui ont déjà été visités, ceux qui se trouvent sur des orbites beaucoup plus proches de la Terre nous concerneront directement en tant que ressources !

Voilà donc notre autre grand réservoir de matières premières en orbite. Une vingtaine d'astéroïdes intéressants ont été détectés, dont deux au moins qui au prix de manoeuvres astucieuses utilisant les rebonds gravitationnels, sont accessibles depuis une orbite haute terrestre pour un *delta-V*, un accroissement de vitesse, inférieur à un demi-kilomètre par seconde. C'est-à-dire pratiquement rien comparé aux 8 kilomètres par seconde nécessaires au décollage depuis la Terre, ou même aux énergies nécessaires pour une approche de la Lune. Le prix à payer est d'une autre nature, cependant. C'est la durée des opérations. La Lune est comme attachée à la Terre, et au cours d'une année, c'est l'ensemble du couple Terre-Lune qui fait une révolution autour du Soleil, sans que les deux planètes-soeurs ne s'éloignent l'une de l'autre. Les astéroïdes sont sur des orbites *héliocentriques* propres, et le temps de vol pour les atteindre, même s'il y a peu d'énergie à dépenser, se mesure en mois, pour ne pas dire en années. Les distances à parcourir ne sont plus de l'ordre du million, mais du milliard de kilomètres.

C'est parce que le temps de rotation d'une mission est faible que la Lune sera utilisée la première. Mais les astéroïdes seront le dessert de la mise en valeur du système solaire. Aujourd'hui, quelques observatoires,

au CERGA, près de Nice, ou au Mont Palomar, en Californie, sont à la recherche de ces astéroïdes de choix, aux orbites proches de celle de la Terre. Lorsque le Télescope Spatial aura servi pour les expériences les plus fondamentales auxquelles il est d'abord destiné, lorsque bientôt il y aura des observatoires sur la Lune, la chasse aux astéroïdes se poursuivra de plus belle.

Le repérage n'est pas facile, car si le nombre d'astéroïdes augmente à mesure que leur taille diminue, leur luminosité, et donc la chance de les apercevoir, diminue avec leur taille. C'est sans doute avec de grands télescopes infrarouges que l'on aura les meilleures chances, et les découvertes se feront plus nombreuses au fil de la mise en service de ces télescopes, en orbite, ou sur la Lune.

Il y a fondamentalement deux manières d'envisager l'exploitation des astéroïdes. D'une part, on peut envoyer des usines, automatiques, ou pilotées par une petite équipe de cosmonautes au long cours. C'est une solution peu propice au développement et à l'évolution des techniques, à cause des durées importantes de transit du matériel.

L'autre approche, beaucoup plus prometteuse, et qui permettra une utilisation beaucoup plus complète de la masse des matériaux bruts, consiste à remorquer un astéroïde pour modifier son orbite et le ramener à demeure dans le système Terre-Lune. Quelques tonnes puis quelques milliers de tonnes, puis quelques millions de tonnes pourraient ainsi être ramenés en orbite haute autour de la Terre, et devenir plus accessibles que la Lune elle-même, puisque des masses aussi faibles d'un point de vue astronomique n'ont pas d'attraction gravitationnelle propre. On peut donc s'en approcher jusqu'à prendre contact, ou bien s'en séparer, en faisant les mêmes manoeuvres de rendez-vous que pour des vaisseaux spatiaux en espace libre.

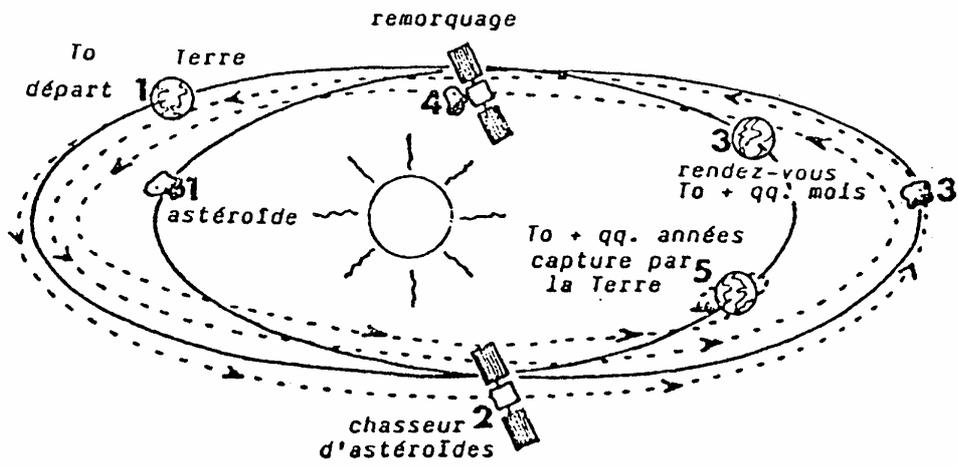
Un millier de tonnes, en gros, c'est dix mètres de diamètre, et un million de tonnes, cent mètres. Des objets astronomiques de si petite taille seraient absolument indétectables aux distances de plusieurs dizaines ou centaines de millions de kilomètres où il nous faudrait les repérer. Il faudra donc s'attaquer à des astéroïdes de plus grande dimension, de l'ordre de un ou plusieurs kilomètres, et en détacher des morceaux de la taille qui nous conviendra au moyen d'explosifs, par des opérations qui, adaptées au cosmos, ressembleront à l'abattage des carrières que l'on pratique sur la Terre.

Pour ramener vers la Terre les premiers gros échantillons, les premières dizaines de tonnes, les remorqueurs interorbitaux pourront faire l'affaire, si on choisit comme cible un astéroïde particulièrement accessible. Par exemple, pour rapporter un morceau de l'astéroïde 1982-

DB, qui comme son nom l'indique est le deuxième (B) astéroïde découvert pendant la quatrième (D) quinzaine de l'année 1982, la somme des impulsions à fournir ne dépasse pas 200 m/s, c'est-à-dire la vitesse d'un avion de ligne. Accélérer une masse jusqu'à cette vitesse n'est pas un grand problème, et, par exemple, un troisième étage d'Ariane-4 serait dans ces conditions capable de manipuler plus d'une centaine de tonnes de matériaux. Avec des remorqueurs ioniques, nous atteindrons des capacités de l'ordre du millier de tonnes à chaque voyage. Si l'on n'est pas trop pressé, le transport pourra être fait par des voiliers solaires géants. L'ennui, si on peut dire, c'est que dans tous les cas, le voyage durera plusieurs années, à comparer aux quelques jours avec lesquels se mesureront les opérations lunaires.

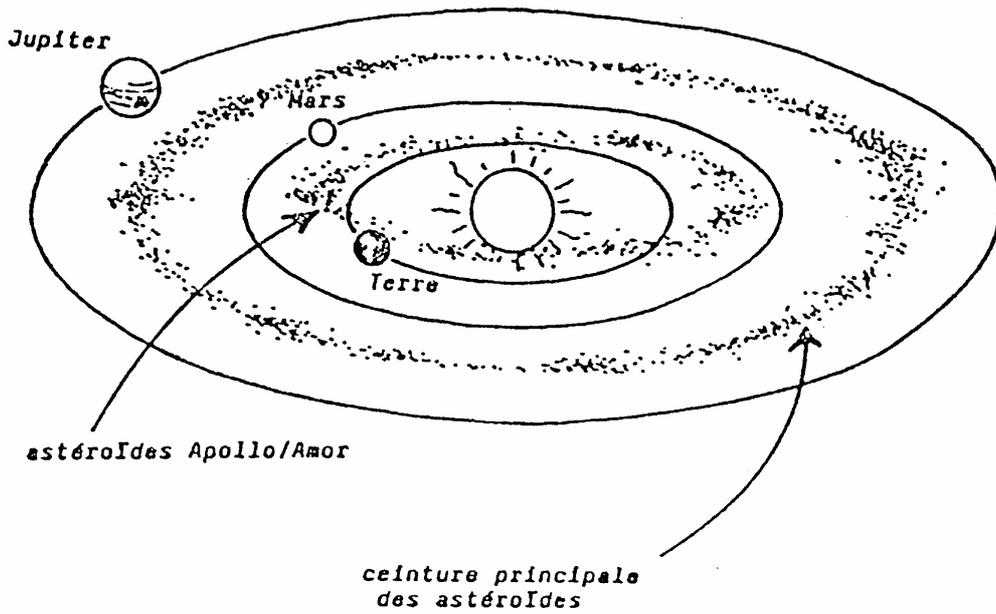
Avec mille tonnes, on peut faire bien des recherches, et même des expériences industrielles pilotes. Pour rapporter les millions de tonnes nécessaires à l'alimentation d'une industrie lourde véritable, il faudra imaginer d'autres systèmes de transport, spécifiques du remorquage des astéroïdes, en prélevant sur le morceau d'astéroïde lui-même la masse de réaction nécessaire à la propulsion, tandis que l'énergie utilisée pour éjecter cette masse sera fournie par des panneaux solaires. On peut imaginer un *aigle* spatial immense, déployant des ailes solaires de plusieurs kilomètres carrés de surface, venant au terme d'un voyage d'approche qui aura duré près d'un an, se poster à proximité d'un gros astéroïde. Des engins automatiques iront se poser à la surface de l'astéroïde pour le forer et y poser des explosifs. Et lorsqu'un bloc d'une centaine de mètres de diamètre aura été détaché, il sera enfermé dans un grand sac pour que les miettes ne se perdent pas en cours de route.

Illustration N° 12 : chasse aux astéroïdes



LES ETAPES DE LA CAPTURE

LA ZONE DE CHASSE : APOLLO/AMOR



Le grand aigle commencera alors le long voyage du retour, qui durera plusieurs années, le temps de lentement modifier l'orbite du morceau d'astéroïde jusqu'à ce qu'elle se rapproche de l'orbite de la Terre, et que se fasse la poursuite de rendez-vous, pour une capture en orbite haute, à un ou deux millions de kilomètres autour de la Terre. Pendant toutes ces années, au fil du temps, l'aigle *grignotera* le morceau d'astéroïde pour en détacher des petits blocs d'une masse de quelques kilogrammes chacun, avant d'éjecter ces petits blocs à plusieurs kilomètres par seconde au moyen d'une catapulte électromagnétique, et d'assurer ainsi par réaction la propulsion de l'ensemble. A l'arrivée, il ne restera plus qu'une fraction du grand bloc initial, le reste ayant été mangé pour les besoins du voyage. Mais l'avantage du système est d'être pratiquement autonome, et de ne demander aucun approvisionnement en carburants d'origine extérieure pendant la phase majeure de l'opération.

La construction du grand aigle chasseur d'astéroïdes ressemblera beaucoup à celle des centrales orbitales servant à la collecte de l'énergie solaire, pour laquelle de nombreuses études ont déjà été faites. Les catapultes électromagnétiques existent aujourd'hui à l'état de prototypes, pour des applications militaires, dans le but de réaliser des canons hypervéloces, et des projectiles de plusieurs centaines de grammes ont déjà été éjectés à des vitesses de plusieurs kilomètres par seconde.

D'ici une autre génération peut-être, les premiers remorqueurs d'astéroïdes partiront en chasse, après quoi le haut environnement de la Terre commencera à se peupler de micro-lunes. Elles ne seront guère plus grandes que les satellites artificiels qui existeront à cette époque, mais beaucoup plus massives. Mais ces micro-lunes seront éphémères, destinées à servir d'aliments à la grande industrie orbitale.

USINES ET CENTRALES ELECTRIQUES

Le royaume de la richesse première, celui de l'énergie, n'est pas sur Terre, ni sur la Lune, ni sur les autres planètes : il se trouve dans l'espace interplanétaire, dans l'exposition permanente et sans entrave au rayonnement du Soleil.

Lorsque les infrastructures permettant de passer de la Terre en orbite seront bien établies, lorsque les transports interorbitaux efficaces seront en service, lorsque des bases lunaires seront suffisamment développées pour permettre l'extraction de matières premières, et avant même que les astéroïdes soient à portée de la main, viendra le temps des grandes usines orbitales et des retours énergétiques et matériels massifs pour des investissements qui auront duré une génération.

La première justification économique pour implanter des installations majeures dans l'espace sera sans doute la construction des centrales électriques orbitales, avec un certain nombre d'étapes intermédiaires, telles que des grands réflecteurs passifs en orbite géostationnaire pour relayer la transmission d'énergie par faisceaux micro-ondes entre des déserts où le gisement solaire est de bonne qualité et les grandes mégapoles où l'énergie sera utilisée.

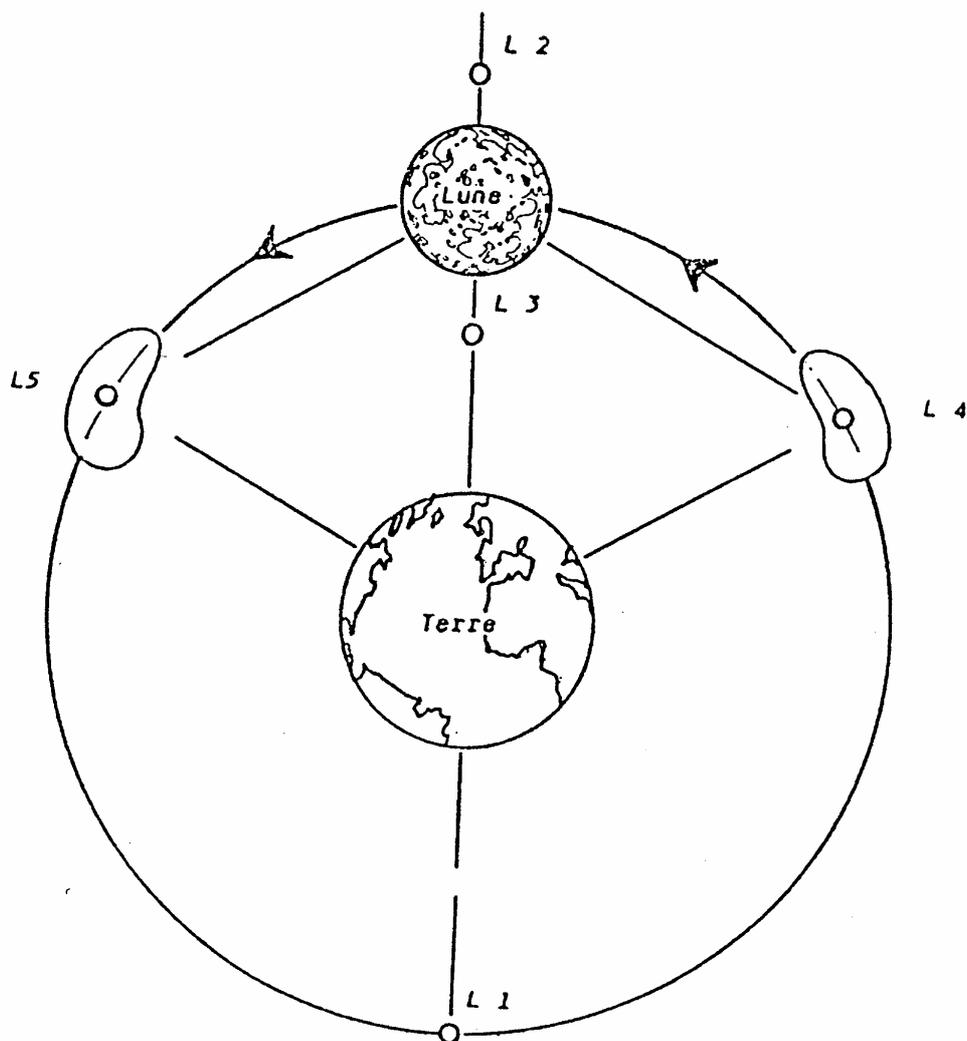
Ensuite, les grandes usines orbitale d'élaboration de matériaux comprendront vraisemblablement trois grandes parties : une centrale d'énergie, un centre de traitement, un habitat. Vraisemblablement, elles seront situées là où se croiseront les flux de navigation, sur des orbites lunaires, sur des orbites terrestres très hautes, peut-être aux *points de Lagrange* du système Terre-Lune, ces points où la distribution des attractions est telle que les objets gardent une position relative constante au cours de leur révolution.

Il existe cinq points de Lagrange associés à chaque système de deux corps célestes tels que la Terre et la Lune, ou le Soleil et la Terre, ou encore le Soleil et Jupiter. En général, il y a donc un corps principal, que l'on prend comme centre de repère, et un corps secondaire que l'on considère comme orbitant autour du premier. Trois des points de Lagrange se trouvent dans l'alignement des deux corps de base, et les deux derniers, L4 et L5, sont dans le plan de l'orbite, aux sommets des deux triangles équilatéraux que l'on peut former avec les corps de base.

Lagrange avait mathématiquement prévu l'existence de ces points de stabilité exceptionnelle, ces sortes de Mers des Sargasses de l'espace interplanétaire. Au début de notre siècle, cette existence fut vérifiée lorsqu'on trouva un jour une petite planète, puis deux, puis une vingtaine d'autres, qui tournaient en deux groupes sur la même orbite que la grande Jupiter, la précédant ou la suivant d'une soixantaine de degrés dans sa course autour du Soleil. On les baptisa de noms de héros de l'antiquité, avec un groupe de planètes *troyennes* et un groupe de planètes *grecques*, peut-être parce qu'elles se poursuivaient les unes les autres.

Pendant plusieurs années, au début des années 80, une sonde spatiale, ISEE-3 a été *ancrée* au point de Lagrange situé entre la Terre et le Soleil, équipée de tout un ensemble d'instruments pour l'étude du plasma des vents solaires. En 1982, la NASA remit en route les moteurs de cette sonde, et par un jeu remarquable de rebonds gravitationnels autour de la Terre et de la Lune, l'envoya telle une balle de pelote basque à la rencontre de la comète de Giacobini-Zinner, dont elle a traversé la queue en septembre 1985.

Illustration N°13 : points de Lagrange



*Les objets "ancrés" aux points de Lagrange
tournent au même rythme que la Terre et la Lune.*

Les points de Lagrange sont des hauts-lieux rêvés, pour un être humain qui n'a de cesse, après avoir brisé ses barrières et franchi ses limites, de retrouver une nouvelle stabilité et des représentations simples sur lesquelles il peut appuyer sa pensée. Si en plus, comme c'est le cas pour L4 et L5, les données sont favorables du point de vue énergétique pour la navigation interplanétaire, qu'y aura-t-il de mieux ? Dans la réalité physique et dynamique, les Points de Lagrange L4 et L5 ne sont pas des points au sens mathématique. Ils se présentent plutôt comme le fond aplati d'un confluent de vallées dans l'espace Terre-Lune et ce sont des zones qui peuvent s'étendre en fait sur des dizaines de milliers de kilomètres, au prix éventuel d'un léger contrôle actif de la position, d'un coût en énergie infime pour les occupants éventuels de ces zones.

Au siècle prochain, le temps que nos écoliers d'aujourd'hui aient passé leurs diplômes et acquis l'expérience d'une bonne carrière, c'est peut-être aux points L4 et L5 que certains d'entre eux s'installeront pour construire les grandes banlieues industrielles de la Planète Terre.

Il y aura des zones industrielles spatiales avec des usines alimentées par d'immenses panneaux solaires, de plusieurs kilomètres ou plusieurs dizaines de kilomètres carrés de surface, à moins peut-être, mais cela est difficile à prédire, que d'ici là on ait maîtrisé efficacement la fusion de l'atome. Il y aura des usines vers lesquelles se déplacera peu à peu une partie importante des productions lourdes qui sont à la base des industries terrestres, et tout d'abord la métallurgie. Dans une quarantaine d'années, le titane lunaire détrônera peut-être l'acier et l'aluminium comme métaux de base dans la construction métallique sur la Terre elle-même.

L'abondance de l'énergie, l'homogénéité de l'environnement, permettront de traiter de manière hautement automatisée des quantités importantes de matériaux dans des conditions économiques remarquables. Tous les effets favorables s'accumuleront dès que le fonctionnement de ces usines sera devenu indépendant d'un approvisionnement d'origine terrestre.

En dehors de l'énergie, c'est le transport qui conditionne l'économie. Et dans le transport, tout est encore une question d'énergie. C'est la quantité énorme d'énergie que nous devons fournir qui rend le départ de la Terre si cher. Au retour, par contre, il faut absorber une quantité d'énergie équivalente, mais nous n'avons pas grand effort à fournir. L'atmosphère est là pour éponger l'essentiel de l'énergie cinétique des corps en cours de rentrée. Et si transporter des êtres humains demande un certain nombre de ménagements, il n'en est pas de même pour le transport de produits métallurgiques bruts ou semi-finis.

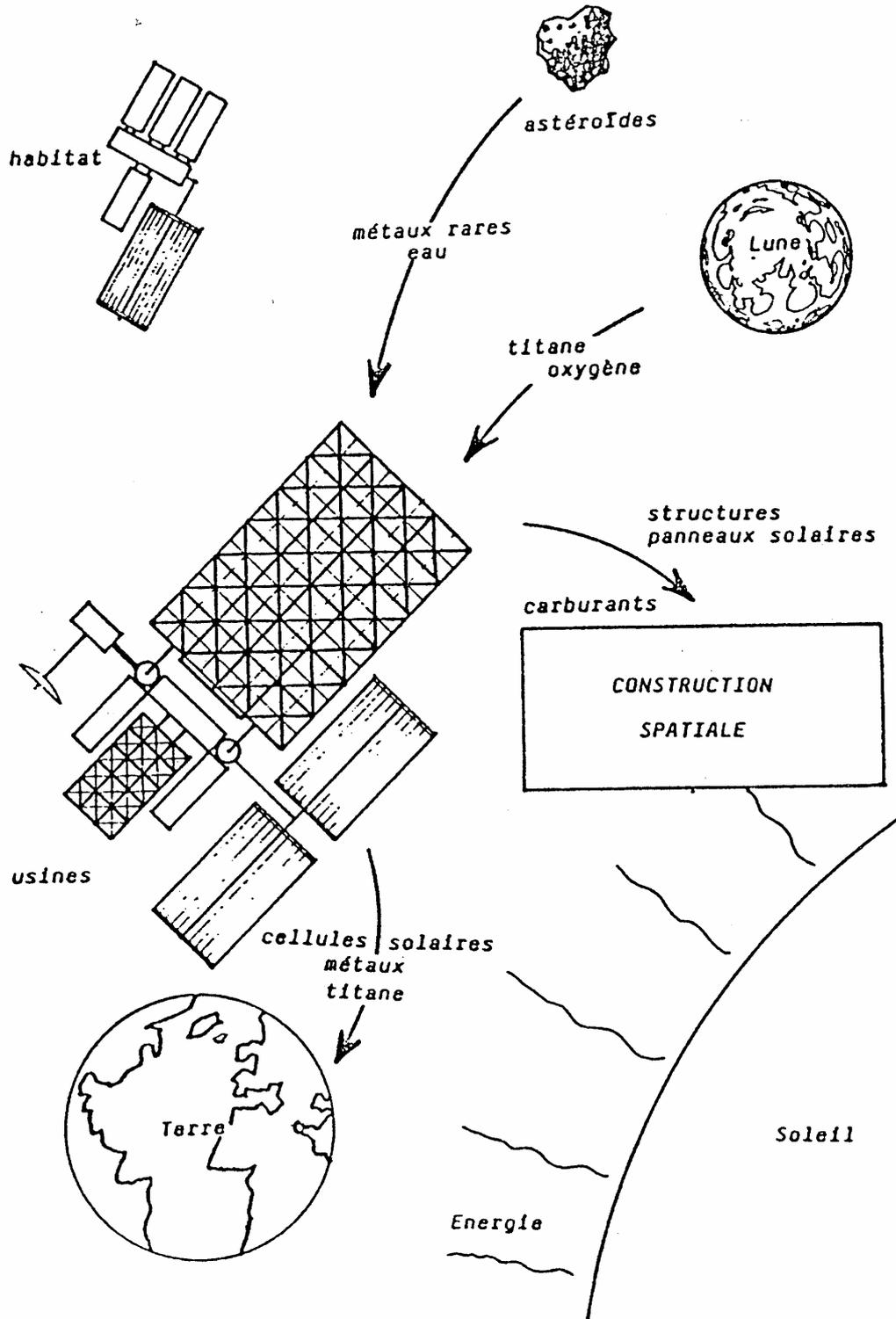
On peut imaginer des conteneurs de rentrée sommaires, construits en orbite dans les usines elles-mêmes, qui ne serviront qu'une fois. Ces *wagons de l'espace*, lancés par des remorqueurs spatiaux sur leur trajectoire de rentrée, viendront s'insérer dans des couloirs atmosphériques assignés. Au prix d'une perte minime de leur carapace, l'air les freinera dans un déluge de flammes, avant qu'ils ne viennent s'écraser à quelques centaines de mètres par seconde seulement, sur des zones de réception spécialement désignées. De la même manière qu'aujourd'hui on conçoit la carrosserie des automobiles pour qu'elle s'écrase progressivement en accordéon et amortisse ainsi le choc en cas d'accident, on pourra prévoir une structure des conteneurs de rentrée telle qu'elle amortisse le choc à l'impact sur le sol de la Terre à des valeurs de quelques centaines de *g* seulement, valeurs inconcevables pour des êtres vivants, mais que des poutres ou des blocs de métal sont parfaitement capables de supporter.

Après le temps des satellites artificiels, viendra bientôt le temps des météorites artificiels, qui nous rapporteront les produits *fabriqués dans l'espace*, au rythme du débit d'une gare de triage, milliers de tonnes après milliers de tonnes.

A côté des produits métallurgiques, il y a une autre production dont on peut envisager le retour massif sur Terre. C'est celle des cellules photovoltaïques pour la transformation de l'énergie solaire en énergie électrique. Ces mêmes cellules qui tapisseront les kilomètres carrés de panneaux en orbite, pourront trouver leur place sur les toits des usines et des maisons de la Terre, parce que les conditions économiques de fabrication dans l'espace, à partir des matériaux extra-terrestres, les auront rendues compétitives, ce qu'elles ne sont pas aujourd'hui.

Le titane et les cellules photovoltaïques sont deux exemples probables et particulièrement significatifs de productions massives dans l'espace, par milliers et millions de tonnes, au bénéfice des Terriens du ras de la planète. Ce ne seront sûrement pas les seules. Il n'est pas aujourd'hui possible de prévoir dans le détail les produits qui seront fabriqués dans une trentaine d'années. Qui en 1950 aurait prévu les micro-ordinateurs ou les magnétoscopes, les lasers de chantier, ou les poêles à frire en téflon ? Mais sans avoir besoin d'être précis, on peut quand même avoir une idée des grandes directions futures, en s'attachant aux grandes évolutions fondamentales des besoins et des disponibilités en énergie.

Illustration N°14 usines et produits



Les usines fabriqueront des produits qu'elles renverront sur la Terre, mais également, à part les équipements les plus sophistiqués, dans un quart de siècle, l'essentiel des engins et du matériel spatial sera fabriqué dans l'espace lui-même, à partir des ressources spatiales. Au lieu de servir à pousser des tonnes de métal ou de carburant, qui forment l'essentiel des charges utiles actuelles, l'énergie des lanceurs qui assureront le passage de la Terre à la station orbitale de transit pourra être consacrée au seul transport des hommes et des appareils de haute précision.

Il est d'ailleurs très probable que dès la deuxième génération des stations spatiales, dès le commencement du siècle prochain, à côté des professionnels et des pilotes, il y aura des hommes et des femmes qui feront le voyage *pour le plaisir*, en payant leur billet, soit parce qu'ils seront riches, qu'ils auront gagné à une loterie, ou parce qu'ils auront économisé pendant des années pour ce plaisir unique. Et en 2020, certaines des usines orbitales seront des *usines à touristes* d'où pendant quelques jours, on pourra voir la planète bleue dans sa splendeur totale, essayer au télescope d'y découvrir sa ville et son bloc d'immeubles, pendant qu'alternent les périodes de vie en pesanteur artificielle et les jeux en impesanteur où l'imagination se donnera libre cours.

CITES SPATIALES

Toutes les installations spatiales, usines orbitales, bases lunaires, *fermes* de satellites opérationnels, seront vraisemblablement hautement automatisées, robotisées, gérées par une multitude d'ordinateurs, reliées par un tissu complexe de liaisons hertziennes ou de faisceaux laser.

Mais les machines, qui sont une colossale extension de l'homme, ne sont pas autonomes. Il faut les concevoir, les installer, les surveiller, les réparer, même si par l'intermédiaire d'automatismes ces opérations se font indirectement. Plus ou moins près d'elles, il y a des yeux humains pour observer le champ d'action, des cerveaux faits de neurones pour intégrer les données multiples et prendre des décisions, des mains pour se poser sur les claviers des pupitres de contrôle, ou pour nouer deux bouts de ficelle dans des conditions pour lesquelles aucun robot n'a été programmé.

Bien sûr, pour gérer les programmes de notre espace futur, il continuera à y avoir sur Terre de grands centres d'étude et de contrôle, comme il y en a déjà, où des milliers de personnes bourdonneront activement dans des bureaux ou autour d'instruments de communication divers. Certains ont pu penser que cela suffirait, et en France même, vingt ans après Gagarine et Shepard, des esprits intelligents mais peut-

être trop secs se demandaient encore si la présence des hommes et des femmes dans l'espace était vraiment nécessaire. N'importe quel enfant de douze ans aurait pu leur donner la réponse. A la différence des crabes et des blattes, figés dans leur configuration et leurs habitudes depuis des millions d'années, l'espèce humaine est une espèce juvénile, exploratrice, en pleine croissance et développement. Il est bon, pour le comprendre, à côté de la technique, de regarder l'histoire. L'histoire contemporaine, non pas sur une période de quelques années, où des divisions superficielles, des combats de mots et de sabres troublent la vision d'ensemble profonde, mais sur des siècles ou sur quelques milliers d'années, c'est à dire une vision à l'échelle de l'évolution de notre planète. Chaque fois que nous avons ouvert de nouveaux domaines, de nouveaux chantiers, nous avons cherché à nous établir au plus près de l'action, parce que c'est là où se trouvait le sel de la vie.

Il y aura des hommes et des femmes de l'autre côté de la frontière, sur les stations spatiales et au-delà. D'abord, comme c'est le cas aujourd'hui, des petites équipes effectueront des missions uniques, pour des expériences ou des opérations bien spécifiques. Puis il y aura d'autres équipes qui seront affectées à demeure sur les bases en orbite basse, particulièrement à partir de la deuxième ou de la troisième génération de stations orbitales, lorsque la recherche en micro-gravité sur les matériaux et sur l'être humain lui-même aura cessé d'être une priorité et que pour des raisons de confort, on s'arrangera pour rétablir une certaine gravité à bord des stations.

Pour ces équipes, qui reviendront fréquemment sur Terre, mais dont le lieu de vie principal pendant des mois ou des années sera une station orbitale, il faudra des aménagements du cadre de vie beaucoup plus complexes que les installations malgré tout rudimentaires que l'on trouve aujourd'hui à bord de Mir ou qui sont prévues dans les autres stations du futur proche.

A côté du personnel directement opérationnel d'un point de vue technique ou scientifique, il faudra introduire et multiplier un personnel spécifique chargé de l'organisation de la vie à bord et du maintien de la station : des cuisiniers, des techniciens, des médecins, des coordonnateurs, etc... Dans vingt-cinq ans, à bord des stations de la première partie du siècle prochain, il y aura des dizaines, et peut-être des centaines de personnes à bord. Nous commencerons à voir apparaître de véritables petites cités, avec une identité sociale propre.

Si nous franchissons d'un coup quatre générations humaines, nous pouvons, comme Gerard O'Neill, l'inventeur des "colonies de l'espace", imaginer pour 2085 des quasi-planètes artificielles, véritables îles dans l'espace, avec des dimensions de plusieurs kilomètres ou plusieurs

dizaines de kilomètres, dans lesquelles vivront des dizaines ou des centaines de milliers d'hommes, de femmes, et d'enfants, devenus complètement autonomes par rapport à la Terre. C'est possible, attirant pour l'imagination, et de tels rêves font certainement beaucoup pour aider à une prise de conscience de notre futur extra-terrestre. Mais c'est trop flou, trop lointain, pour que nous puissions véritablement en parler.

Plus près, pour 2050, dans trois générations seulement, l'architecte Dominique Favreul a imaginé Pandora, une ville interplanétaire en orbite haute, pour trois mille habitants. Pandora serait une base de travail, un centre de formation, une sorte d'université dans l'espace, avec deux mille permanents, et des centaines de stagiaires, qui viendraient pour quelques semaines ou pour quelques mois apprendre toutes les arcanes de l'activité spatiale, avant de se retrouver cosmonautes au long cours, exploitants d'une usine orbitale, ou gestionnaires d'un *Club Méditerranée* de l'espace. Pandora serait composée d'une sphère de six cents mètres de diamètre, tournant lentement autour d'un axe pour établir une pesanteur confortable le long de sa bande équatoriale où serait réparti l'habitat. Le long de cette bande qui, développée, ferait deux kilomètres de long sur deux cents mètres de large, on trouverait les logements, les locaux de l'*Université de l'Espace*, et tous les services, au milieu de piscines et de jardins tropicaux. Autour de la sphère, un double tétraèdre, de deux kilomètres d'arête, stabilisé par rapport au repère inertiel des étoiles, servirait de support à des laboratoires et des ateliers en micro-gravité. Bien entendu, Pandora aurait été entièrement construite à partir des matériaux de la Lune et des astéroïdes. Pourquoi pas ? Relativement réalistes, les maquettes de Pandora sont terriblement séduisantes, mais c'est encore une démarche proche de celle de Jules Verne, et d'ici 2050, bien des choses nouvelles seront arrivées.

Le club de loisirs spatial est peut-être plus proche que nous ne le pensons. Le grand industriel de la construction japonaise, Shimizu, a déjà imaginé les plans d'un hôtel de l'espace très réaliste et très réalisable, et il entretient une équipe de chercheurs pour réfléchir à de tels projets.

Les premières cités de l'espace, celles que nous pouvons dès aujourd'hui envisager sérieusement, seront des extensions des premières stations en orbite basse, un aménagement des têtes de ponts vers notre nouveau domaine de vie et de travail. Les premières cités seront de petites villes portuaires, avec des docks, des entrepôts, des ateliers, répartis sur une grande structure ouverte déployée dans trois dimensions.

Rattaché à cet ensemble technique, on trouvera un centre de vie, composé de sphères et de cylindres, de quelques mètres ou quelques dizaines de mètres de diamètre, que l'on assemblera dans l'espace, pour offrir des volumes habitables confortables, spacieux. Cela ressemblera

plus à un navire qu'à des pavillons de banlieue, mais il y aura des chambres, un restaurant, des lieux de loisirs et de détente, une salle de sports... et surtout, tout cet ensemble de vie sera réparti à plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines de mètres autour d'un axe central, et tournera lentement, comme la roue du film *2001* ou la partie centrale du vaisseau de *2010*. Avec une vitesse de rotation de deux tours par minute, que l'homme peut supporter de manière prolongée, pour avoir le quart de la gravité terrestre par centrifugation, il faut un rayon de soixante mètres, ce qui est tout à fait concevable.

En volume, en masse, en effort de développement, la taille de ces véritables petites cités de l'espace sera intermédiaire entre celle des stations de la prochaine décennie, et celle des grandes centrales électriques orbitales qui alimenteront les mégapoles terrestres et les futures usines de l'espace. La plupart des éléments initiaux seront encore apportés de Terre, mais à mesure que les premières cités grandiront, que parallèlement les premières installations opérationnelles se déploieront sur la Lune, lorsque les premiers échantillons d'astéroïdes reviendront, une part de plus en plus grande des matériaux de structure sera d'origine extra-terrestre. Tout ce qui sera disponible sera utilisé. Il n'y aura plus de déchet dans l'espace. Tout sera reconverti, et même les résidus apparemment les moins utiles des processus d'extraction serviront de masse de blindage pour accroître la protection de la cité contre les rayonnements, jusqu'à retrouver des conditions comparables à celles que nous apporte la protection du kilogramme d'atmosphère qui recouvre chaque centimètre carré de la surface de notre globe terrestre.

Dès ces premières cités spatiales, il est vraisemblable qu'on verra apparaître une agriculture et un élevage autonomes grâce auxquels l'alimentation du bord se fera pour la plus grande partie en autarcie. Déjà, aux Etats-Unis et en Union Soviétique, des expériences de culture de légumes en écologie fermée permettent de prévoir une autonomie alimentaire à plus de 80%. Chez les soviétiques, des expériences d'élevage de cailles ont eu lieu. Avec des résultats globalement remarquables, les expériences de Biosphère-2 ont apporté une masse d'informations et de questions qui font progresser la réflexion dans ce domaine difficile. En Europe, ce genre d'études ne saurait tarder.

La végétation aura aussi un important rôle esthétique et psychologique. La petite serre qui se trouvait à bord de Saliout était l'objet d'une attention toute particulière de la part des cosmonautes soviétiques auxquels elle apportait, par son évolution, un élément vivant de référence temporelle. Les architectes, les décorateurs, les paysagistes, auront certainement un rôle important à jouer dans l'aménagement des stations spatiales, peut-être même dès leur conception, de manière à ce qu'une vie pendant des semaines et des mois soit possible dans un espace limité

sans que les habitants n'éprouvent la sensation d'être dans une cage fermée. Cet aspect est secondaire actuellement, mais deviendra important pour le bien-être et l'efficacité des premiers véritables citoyens de l'espace. La vie extra-terrestre des premiers vrais solariens sera hautement technique, mais certainement pas triste.

LA CRISE ET LA VIE

Le rêve solarien peut-il devenir une réalité, alors que - ce dont nul ne doute - notre monde vit une crise profonde ? Il y a crise lorsque la manière dont on vit la réalité ne correspond plus à l'image que l'on s'en était donnée. La crise se résout par la réconciliation de ces deux données. En général, c'est le monde qui finit par avoir raison, et la représentation intellectuelle qui s'adapte. Mais entre-temps, combien de tentatives, et à quel prix, sont souvent faites pour essayer de conformer l'organisation subtile de la vie de quelques milliards d'hommes et de l'évolution d'un écosystème planétaire, à des images souvent intellectuellement cohérentes et quelquefois idéologiquement grisantes, mais malheureusement devenues inadaptées et périmées.

Alors que trois cents cosmonautes ont déjà souligné combien ils avaient été marqués au cours de leur vol par le sentiment de fragilité de la biosphère, et par la vanité des frontières nationales, pendant ce temps des états-majors, de nombreux journalistes, et derrière eux des millions d'hommes, continuent de croire que la chose la plus importante pour l'organisation de nos vies est la division de la société en blocs antagonistes. Ils sont prêts pour ne pas entacher ce mirage, à déchaîner le feu des mitraillettes, des bombes et des roquettes, ou à planter à tout vent des brûlots nucléaires dont on sait que leur usage serait suicidaire.

On peut se demander pourquoi toute une partie de nos stratèges, civils et militaires, semblent continuer à se battre autour de la répartition des richesses de notre monde alors que la question majeure, à propos de ces richesses, semble être devenue la création, plutôt que la répartition.

Pendant le millier de générations qui se sont succédées depuis Cro Magnon, l'évolution du volume des richesses dont les hommes pouvaient disposer s'est faite lentement, et la question sociale majeure était la répartition et l'échange de ces richesses. Au fil des âges et des sociétés, des systèmes économiques divers ont été instaurés pour organiser et réguler cet échange, à commencer par l'invention de l'argent il y a quelques 25 siècles.

La création de richesses nouvelles était marginale, et par le biais d'appréciations subjectives, elle était évaluée en termes d'échange, bien

que création et échange soient deux processus de nature fondamentalement différente. Depuis une ou deux générations, dans un mouvement qui s'auto-accélère de manière quasi-explosive, la création de richesses, c'est-à-dire l'accroissement de la maîtrise que l'homme peut avoir sur les ressources potentielles qui l'entourent, n'est plus un processus marginal par rapport à l'échange des richesses déjà maîtrisées et disponibles. Cette création tend même à devenir un phénomène prépondérant. Tous les systèmes sociaux, économiques et financiers établis jusqu'à aujourd'hui craquent sous cette poussée colossale, sous cette émergence de vie à laquelle ils n'étaient pas préparés. La grande crise mondiale que nous traversons est une crise de croissance majeure, une crise d'adolescence planétaire.

Comment se fera l'adaptation, que se passera-t-il, entre mille exemples, lorsque dans trente ou quarante ans, les toits de la Terre se couvriront de cellules photovoltaïques fabriquées en orbite à partir de sable lunaire, que les centrales électriques terrestres disparaîtront peu-à-peu et que les centres de distribution de l'énergie feront place à des centres de collecte des surplus d'une production dispersée, pour alimenter les installations publiques et les usines gourmandes en puissance brute, tandis que les terres proches des villes géantes se couvriront de réseaux pour recevoir l'énergie des centrales orbitales. Est-ce que de tels changements de technologie n'introduiront pas des changements de société aussi importants que le passage du cheval à l'automobile, sans parler de la mutation informatique que nous sommes loin d'avoir pleinement intégrée ?

Peut-être aurons nous à ranger au grenier un certain nombre de certitudes de notre enfance politique. Si nous survivons à la tentation du suicide, fréquente chez les adolescents mais qui heureusement est généralement bien surmontée, un avenir extraordinaire et un présent magnifique nous sont donnés.

Les trois axes autour desquels est structuré l'univers, matière, énergie, et complexité, s'ouvrent à nous, et c'est à notre génération qu'il est donné de vivre événement colossal du passage d'un seuil qualitatif vers des niveaux de vie plus élevés. L'informatique nous apporte la pénétration du complexe. L'Espace ouvre un nouvel ordre de grandeur quant à la matière et à l'énergie que nous sommes à même de manipuler.

Nous étions des Terriens, nous voilà devenus les Solariens, habitants de la banlieue de l'Etoile Soleil. Mais comment l'exprimer, comment le vivre dans notre aventure personnelle de tous les jours, comment nous mettre en mesure de profiter de tous les avantages que nous offre cette nouvelle citoyenneté. Nous vivons une période de mutation colossale, une grande renaissance, mais quelle crise !

Dans une allégorie que mes amis préhistoriens voudront bien me pardonner, repensons aux Cro Magnon, ou plutôt même à la famille Neandertal. Ce sont des chasseurs et des cueilleurs de graines. Pour faire face aux rigueurs de l'hiver qui revient périodiquement dans cette civilisation d'un temps cyclique, ils accumulent des réserves de graines qu'ils gèrent avec le plus grand sérieux du monde, parce que leur survie en dépend. Et puis voilà que le petit dernier de la famille, celui qu'on laisse à la caverne, peut-être parce qu'il est moins bon chasseur ou moins bon marcheur que les autres, celui qui passe donc son temps à observer et à rêver, voilà qu'un jour les guerriers le trouvent répandant à pleines poignées, dans un geste auguste, le grain si durement ramassé, pour le jeter dans un sillon de terre gratté avec le bout d'un bâton. Il y a tout à parier que l'explication fut dure et douloureuse, au nom des traditions et des *réalités* économiques.

Vivre les transitions n'est pas facile, et les organiser encore moins. Les travaux mathématiques du professeur Thom sur la morphogenèse, et sa théorie des catastrophes, qui n'a rien à voir avec les grands malheurs, nous apportent des outils précieux, aussi importants que peuvent l'être dans d'autres domaines le calcul statistique ou la résolution des équations différentielles. La biologie nous apporte des modèles tout aussi précieux, sur la structure et la dynamique des transformations. Dans un grand changement, bien sûr, il faut abandonner un certain nombre de certitudes périmées, et un certain nombre de positions devenues mal pratiques, pour reprendre des modèles mieux adaptés, et des modes d'action mieux harmonisés avec la réalité vivante. Mais quels sont les éléments de stabilité, les sous-systèmes et les sur-systèmes invariants sur lesquels on peut s'appuyer au cours de la transformation ?

De Napoléon, qui a créé les départements, jusqu'à Charles De Gaulle, qui a initié les programmes nucléaires et spatiaux, la France s'est limitée aux océans, aux fleuves, et aux montagnes, parce que la référence de transport était le cheval, à avoine ou à vapeur. A l'époque des centraux téléphoniques, des turboréacteurs et de l'avion de transport régional, faut-il que la France se dissolve lentement pour faire place à une Europe géographiquement bien intégrée, au sein de laquelle les unités régionales manifesteront clairement leur identité ! Les nations pourront-elles relâcher la haute main qu'elles ont sur les activités spatiales ? Les entreprises sauront-elles intégrer les valeurs de l'Etat ? Les avionneurs de la conquête initiale sauront-ils passer le flambeau spatial aux géants de l'aménagement et de l'énergie, qui sont les maîtres de l'environnement ? Que de questions, et d'autres encore, qui ne sont pas résolues, et qui appellent un changement de paradigme. Ces questions sont plus des affaires d'organisation que de politique au sens où on l'entend généralement dans les médias. Et c'est à des problèmes similaires qu'en

son temps, alors qu'il était protestant et seulement roi de Navarre, le grand Henri IV avait su répondre par une phrase simple qui est restée historique : "Paris vaut bien une messe"...

Nous, Solariens, savons que notre nouveau domaine nous attend. Nous savons que pour le travailler et le mettre en valeur, nous pouvons désormais sortir de notre Terre natale. Mais le voyage aller coûte cher, la promesse de richesses n'est pour le moment que le fruit de nos observations et de nos études, alors que le chômage, les difficultés logement, ou la recherche d'un bien-être immédiat appelleraient toute notre attention. Il n'est pas simple de tracer un sillon et de planter la graine dans un nouveau terrain, et ce n'est que lorsque le progrès sera devenu un souvenir, qu'il sera transformé en tradition, que les guetteurs qui luttent et se dépensent pour l'avenir de notre société verront leur rôle officiellement reconnu par les nourrisseurs du quotidien.

Aujourd'hui, dans notre tribu du Cap Europe, où se trouvent globalement concentrées les plus puissantes ressources humaines et économiques de notre planète, les graines s'appellent du nom d'Ariane et de tous les projets de transport et d'infrastructure spatiale du CNES et de l'ESA, auxquels il faut ajouter le dernier mousquetaire, le remorqueur interplanétaire, celui qui n'a pas encore reçu d'âme, et qu'il serait grand temps de concevoir au sein profond de nos organismes spatiaux.

La conquête et la mise en valeur du Système Solaire pour la plus grande élévation de l'homme sont notre affaire à tous, du nord au sud, de l'est à l'ouest et de bas en haut. Dans l'organisation logistique de ce grand déploiement, l'Europe est une bonne unité de travail parmi les autres, la meilleure peut-être. Je suis certain que les grandes transformations qui nous attendent au cours des prochaines années demanderont des efforts, mais que les accouchements inévitables et nécessaires se dérouleront bien. En février 1993, l'expérience Znamia, avec sa voile solaire ouverte telle une corolle printanière sur un fond de planète bleue, était un signe précurseur visible de la transformation. J'ai confiance en la vie. Vive notre monde *solarien*, qui est notre nouveau monde. Vive l'Europe, qui est le cadre de travail avec lequel nous entrons dans cette grande aventure, entre l'individu qui doit s'épanouir, et l'humanité qui est en train de naître. Et vive la Crise, qui permet un redéploiement de nos visions. Nous vivons une époque formidable.

GLOSSAIRE

Accélération : Variation de vitesse d'un corps en mouvement. Cette variation peut jouer sur la grandeur de la vitesse ou sur sa direction. Mathématiquement, vitesse et accélération sont des vecteurs, décrits par trois coordonnées dans un espace à trois dimensions.

Aérobic (moteur) : Qui utilise l'air ambiant pour alimenter la réaction de combustion.

Astéroïde : Petite planète, dont les dimensions peuvent aller de quelques centaines de mètres à quelques centaines de kilomètres.

Attraction terrestre : Force de gravitation exercée par la Terre. Elle diminue avec le carré de la distance.

Avionique : Ensemble des équipements électroniques utilisés sur un avion.

Chondrite : Météorite pierreuse de structure granuleuse.

Etoile : Astre qui brille de sa propre lumière. L'énergie interne des étoiles provient des réactions nucléaires.

Géodésique : Qui a pour objet de définir et de mesurer la forme de la Terre.

Géostationnaire : Se dit d'un satellite géosynchrone qui gravite sur un cercle situé dans le plan de l'équateur, et de ce fait paraît immobile pour un observateur terrestre. L'orbite géostationnaire est unique, et son altitude est voisine de 35 800 km.

Géosynchrone : Se dit d'un satellite de la Terre dont la période de révolution est égale à celle de rotation de la terre (24 heures).

Gravitation : Phénomène physique en vertu duquel les corps s'attirent proportionnellement à leurs masses et en raison inverse du carré de leurs distances.

Héliosynchrone : Se dit de l'orbite d'un satellite de la Terre dont le plan fait un angle constant avec la direction du Soleil. Se dit d'un satellite qui se trouve sur une telle orbite.

Héliocentrique : Se dit d'une orbite dont le centre ou un foyer est le Soleil lui-même.

Impesanteur : Etat d'un corps soumis aux seules forces de gravitation et dont le mouvement n'est entravé ou altéré par aucune force extérieure (en chute libre). Le terme synonyme "apesanteur" est déconseillé pour éviter la confusion entre "l'apesanteur" et "la pesanteur".

Météorite : Fragment minéral qui vient de l'espace interplanétaire.

Orbite : Trajectoire décrite par un corps qui tourne de manière régulière autour d'un astre.

Orbite basse : Orbite quasi-circulaire à quelques centaines de kilomètres d'altitude autour de la Terre ou d'une autre planète.

Orbite de transfert : Orbite elliptique parcourue temporairement par un engin qui transite entre une orbite basse terrestre et l'orbite géostationnaire.

Photovoltaïque : Se dit d'un dispositif destiné à produire de l'énergie électrique par conversion directe de l'énergie lumineuse.

Planète : Astre sans lumière propre qui tourne autour du Soleil (ou d'une autre étoile).

Plasma : Etat où la matière est fortement ou totalement ionisée.

Spectrométrie : Etude du rayonnement lumineux émis ou absorbé par les différents corps.

Suborbital : Se dit d'un vol à une vitesse inférieure à la vitesse de satellisation.

Vitesse de libération : Vitesse minimale d'un engin balistique au départ d'un astre pour qu'il puisse s'éloigner indéfiniment de cet astre.

Vitesse de satellisation : Vitesse d'un corps décrivant l'orbite circulaire la plus basse possible autour d'un astre. La vitesse de satellisation est 1,4 fois plus faible (racine carrée de 2) que la vitesse de libération à partir du même astre.

BIBLIOGRAPHIE

Air et Cosmos revue hebdomadaire d'actualité aéronautique et spatiale.

L'Appel de Pocé, document pour un Institut Lunaire Européen, diffusé par Les Colonies de l'Espace et par la SFTESF.

Les Baies Sauvages de Sibérie par Evguéni Evtouchenko, aux éditions Plon.

La Conquête de l'Espace revue du Palais de la Découverte (No 19).

Dictionnaire de Spatiologie publié par le CNES et le Conseil International de la Langue Française.

L'Espace Comment Ça Marche ? vidéogramme de 52 minutes diffusé par le CNES, la SEP et le Palais de la Découverte.

L'Espace en Héritage par André Lebeau, aux éditions Odile Jacob.

L'Exploration de l'Espace par Kenneth Gatland, aux éditions Bordas.

Le Grand Atlas de l'Espace publié par Encyclopédia Universalis

Objectif Planètes par Michel Tarride, Jean-Louis Piéplu, et Sylvia Dorance, aux éditions Milan.

Les Planètes Artificielles par Wim Dannau, aux éditions Bordas.

La Psychologie et le Cosmos par Youri Gagarine et Vladimir Lebedev, aux éditions de Moscou.

SPS-91, quatre bandes dessinées lauréates du concours mondial "l'Electricité de l'Espace", éditées par la Société des Electriciens et des Electroniciens.

Le Système Solaire dans la bibliothèque "Pour la Science", diffusé par les éditions Belin.

Les Villes de l'Espace par Gerard O'Neill, aux éditions Robert Laffont.
