

A black and white collage. The top half shows a rocket launching with a large plume of smoke and fire. The bottom half shows a man in a suit sitting at a desk, writing on a document. To his left are several model rockets, one of which has 'UNITED STATES' written vertically on it. In the background, a globe is visible. The text 'Le temps est venu de retourner sur la Lune' is written across the middle in a bold, sans-serif font.

**Le temps est venu
de retourner
sur la Lune**

Nous sommes en 2006 et, depuis décembre 1972, aucun astronaute n'a foulé le sol lunaire, même si, depuis 1984, on ressort bien quelques projets des cartons, de temps à autre, comme lors de colloques annuels tels que ceux de l'IAF ou des initiatives politiques sans lendemain comme la Space Exploration Initiative du président George Bush. Néanmoins, depuis quelque temps on reparle aux USA de conquête de la Lune, mais les perspectives de budgétisation apparaissent encore incertaines et se limitent à un transfert de fonds de certains postes de la NASA vers ce programme lunaire. Il en est de même du programme Aurora de l'ESA, ambitieux au niveau des principes mais fort mal doté pour l'instant du point de vue financier. Pourtant l'Homme a toutes les raisons de conquérir l'espace, en commençant par la Lune comme base scientifique et industrielle, et comme tremplin vers les autres planètes du système solaire. Le pionnier Krafft Ehrlicke déclara un jour : « Si Dieu avait voulu que l'Homme conquiert l'espace, il nous aurait donné la Lune ». Nous montrerons dans cet article toute la justesse de cette vision.

LES CRITÈRES APPLIQUÉS AUX DÉCISIONS SONT EN RETARD SUR L'ÉVOLUTION DES TECHNIQUES

L'IMPORTANCE DU SPATIAL

A l'heure où nos sociétés industrielles connaissent des problèmes inquiétants qui les amènent à s'interroger sur leurs finalités et la validité des choix qui leur servent de fil conducteur, où un grand nombre de pays du Tiers monde sont confrontés à des conditions qui empêchent leur décollage économique et l'obtention d'un niveau de vie qui assure à leur population un minimum de dignité, il est étonnant de constater combien les mentalités de nos contemporains et les critères appliqués à leurs décisions sont en retard sur l'évolution des techniques. Ils ignorent les opportunités que cette évolution pourrait offrir à un système économique et social en crise. Plus encore pour ce qui concerne la conquête de l'espace, déjà reconnue « utile » en raison de ses nombreuses applications (météorologie, télécommunications, observation de la Terre, satellites et sondes scientifiques). Il est également décevant de constater combien les perspectives offertes par celle-ci pour le long terme, les interactions et les portes de sortie qu'elle offre au système économique sont singulièrement absentes des stratégies des politiques. On raisonne comme si l'on devait être assujéti « ad vitam eternam » à un certain nombre de contraintes auxquelles on ne saurait échapper et avec lesquelles il « faut faire ».

Les politiques économiques, scientifiques ou technologiques, sont menées en vertu de la perception d'un certain nombre de « limites » entre lesquelles il faut apprendre « à piloter à vue », à choisir entre diverses alternatives en nombre nécessairement limité... L'idée que l'on puisse passer *par dessus* un certain nombre de blocages et de goulots d'étranglement inhérents à une économie limitée au cadre terrestre n'effleure que rarement la plupart des spécialistes de prospective. Pour eux, la conquête de l'espace n'est qu'une dimension parmi d'autres de la politique de la science et de la technologie et ils semblent penser que les partisans de programmes spatiaux ambitieux ne seraient mus que par des désirs émotionnels.

Les politiques utilisent un argumentaire selon lequel, pour justifier un retour à la Lune, il faudrait soit des progrès technologiques conséquents, soit une hausse du PNB des pays de pointe tel qu'il puisse être possible d'utiliser le savoir faire spatial, à la limite de la frontière technologique, à un coût économique et social moindre.

Dans cette optique, on ne tient pas compte des besoins à long terme de la société auxquels les activités spatiales répondront en engendrant un supplément de richesse.

Mais, avant d'être écartés, les arguments des opposants aux grands programmes spatiaux doivent être pris en compte, et cette opposition nous oblige à une confrontation permanente entre :

- l'évaluation des énormes richesses de l'espace et de la Lune et de leurs potentialités ;

- les moyens envisagés pour les utiliser en voyant notamment si ces projets impliquent un dépassement des frontières technologiques ;

- les coûts des investissements de départ (phase de démarrage) et un examen des critiques qui leur sont faites ;

- l'estimation des délais à partir desquels les colonies de l'espace et les colonies lunaires deviendraient rentables et bénéficiaires en déclenchant le processus autocumulatif de croissance qui doit être la marque d'un vrai programme de conquête spatiale.

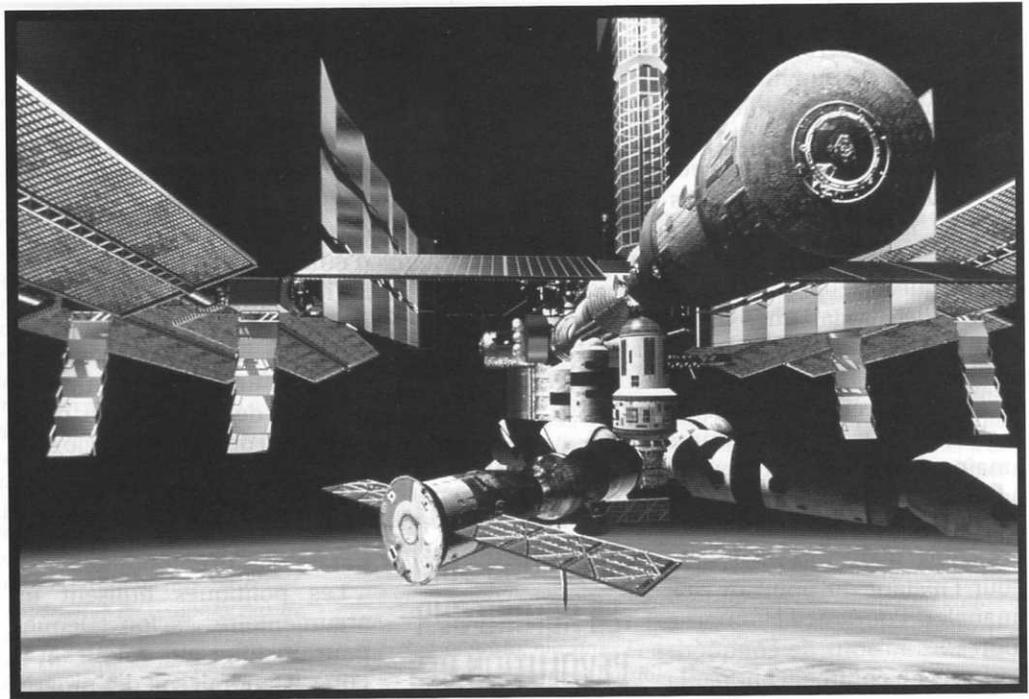
En plus de ces positions stratégiques indispensables à la mise en œuvre d'un programme spatial ambitieux, il faut identifier l'adversaire à combattre : le libéralisme. Il bloque les recherches à long terme au profit de recherches sectorielles à court terme, il freine les avancées qui auraient des effets positifs à long terme pour l'organisation de la recherche et de la technologie et qui auraient un effet d'entraînement de l'économie.

PHILIPPE JAMET



On a marché sur la Lune !

Nous sommes en 2006 et, depuis décembre 1972, aucun astronaute n'a foulé le sol lunaire. Pourtant l'Homme a toutes les raisons de conquérir l'espace, en commençant par la Lune comme base scientifique et industrielle, comme tremplin vers les autres planètes du système solaire.



La station spatiale internationale |

LES CONDITIONS À REMPLIR

La première étape de notre conquête de l'espace, après nos timides établissements en orbite (Skylab, stations Salyout, Mir et ISS), sera la Lune avec des objectifs scientifiques, économiques et énergétiques. En faisant abstraction des programmes scientifiques lunaires, qui ne doivent pas souffrir financièrement des autres objectifs de la colonisation lunaire, il y a un certain nombre d'impératifs à respecter. Pour justifier économiquement le développement massif d'une industrie sur notre satellite, il est nécessaire :

- de trouver des justifications extralunaires. La colonisation et l'industrialisation de la Lune doivent répondre à des besoins terrestres pressants : nous verrons que c'est le cas pour les problèmes d'énergie ;
- de disposer d'une énergie illimitée et à faible coût pour son fonctionnement afin de rentabiliser rapidement les coûteuses opérations d'implantation ;
- que son fonctionnement présente des avantages comparatifs élevés par rapport à une exploitation terrestre et soit à même, mieux qu'une industrie terrestre, de fournir aux différentes orbites circumterrestres les matériaux, produits finis et semi-finis indispensables au développement d'une activité importante sur celles-ci ;
- que le coût de transport entre les différentes orbites cislunaires et circumterrestres ne vienne pas annuler les avantages du travail dans l'espace ou sur la Lune¹ ;
- que tous les éléments indispensables au développement d'une industrie autonome

soient présents ou que leur importation massive ne vienne pas grever les avantages apportés par la réalisation des conditions précédentes ou limiter celles-ci dans le temps (matériel scientifique et industriel) afin de réduire les coûts du transport entre la Terre et la Lune.

Nous verrons que la découverte de glaces polaires effectuées par les deux sondes, Clementine et Lunar Prospector, nous permettrait de nous conformer à plusieurs de ces impératifs en fournissant notamment des citernes de combustibles (oxygène et hydrogène liquides) aux orbites cislunaires, géostationnaires et circumterrestres basses entraînant une réduction drastique du coût du transport inter orbital².

LA LUNE ET LA SCIENCE

Placée au premier rang des justifications pour un retour de l'homme sur la Lune, la science doit recevoir un traitement privilégié car c'est d'elle qu'il faut attendre nombre de retombées face à des problèmes difficiles à résoudre en restant dans notre biosphère terrestre. La nature de la Lune et les conditions particulières qui y règnent font de notre satellite un véritable laboratoire pour un grand nombre de disciplines :

Au premier rang de celles-ci on relève bien sûr l'astrophysique, pour laquelle la vocation de la Lune est toute trouvée (**Encadré 1**). Les phénomènes sismiques y sont pratiquement négligeables du fait de sa stabilité géologique, comme une plateforme où il serait possible de construire des observatoires, des télescopes et des

1. Le coût de transport surface lunaire-orbite basse cislunaire est faible, l'accroissement de vitesse nécessaire pour se positionner sur cette orbite est de 1,7 km/s auquel il faut ajouter 0,7 km/s pour atteindre la vitesse de libération vers la Terre.

radiotélescopes de plus grande taille que sur Terre. Dans ce domaine les idées ne manquent pas et, dès les années 60, des travaux américains effectués au Goddard Space Center, promouvant l'utilisation de matériaux fabriqués sur la Lune (verres et céramiques), estimaient possible d'obtenir sur notre satellite des surfaces dont la planéité (pour les miroirs plan) et la sphéricité (pour les lentilles sphériques) étaient impossibles à obtenir sur Terre³. Il serait intéressant de développer, dans ce domaine, nos technologies les plus modernes sur la Lune et d'en faire le siège d'une importante industrie en matière d'optique. On pourrait en effet fabriquer des miroirs sur place en raison de la forte présence de silice (SiO₂) et d'une quantité impressionnante de petites billes de verre pur qui sont le résultat d'impacts ayant soumis les roches lunaires percutées à une pression de plusieurs millions d'atmosphères ; des brevets ont été déposés par Agnek et Zwicky dès les années 60. A la même époque, l'ingénieur américain Narodny a imaginé un atelier lunaire de pulvérisation d'ions sur des surfaces optiques par balayage sous vide afin d'obtenir un polissage superfin. D'autres projets ont été présentés au cours des décennies suivantes : ainsi Stewart Johnson, en collaboration avec Ferhat Akgul et Walter Gerstle de l'Université du Nouveau Mexique, a dressé les plans d'un radiotélescope lunaire en époxy graphite de 500 mètres de diamètre.

La Lune pourrait aussi offrir une solution idéale pour la radioastronomie qui, sur Terre, a bien du mal à protéger ces deux fenêtres vers l'univers radio que sont les bandes à 18 et 21 centimètres. Elle souffre des interférences des émissions humaines comme la télévision, la radio, les nouveaux systèmes de communications par satellite, les dispositifs de télécommande, les constellations en orbite basse.

Dans d'autres domaines, on trouve également des détecteurs de neutrinos, des détecteurs d'ondes gravitationnelles, l'imagerie submillimétrique interférométrique ou bien encore la physique solaire pour laquelle des observatoires lunaires seraient un avantage pour effectuer des études du vent solaire (étude de la surveillance isotopique) et du rayonnement cosmique, et compléterait utilement des satellites de type SOHO comme le concept ALBSO. Il serait aussi possible d'installer sur la face cachée des observatoires d'astrométrie encore plus performants que le satellite européen Hipparcos.

L'étude de l'environnement lunaire est la deuxième justification des programmes scientifiques sur la Lune. Cela comprend l'étude physique et chimique ainsi que la cartographie topologique haute résolution

de la surface au moyen de capteurs radar opérant à haute altitude avec une couverture globale incluant les régions polaires. C'est un peu ce que fait actuellement la sonde européenne Smart-I. Selon le scientifique Yves Langevin, membre de l'association LUNEX, la motivation principale de l'étude de l'environnement lunaire tient à la planétologie comparée. Notre satellite attire les scientifiques, il est très lié à la Terre et on parle généralement de système Terre-Lune. La Lune est un objet de petite taille qui s'est donc refroidi très vite et garde la mémoire de ce qui s'est passé lors des phases intermédiaires de l'histoire de notre système solaire, sa surface est très ancienne et a très peu évolué depuis qu'elle s'est figée. Le régolithe, qui est une couche friable à grains fins, mesure 5 mètres d'épaisseur et l'on y trouve l'enregistrement de tout ce qui a circulé dans le système solaire, comme les micrométéorites et les particules solaires. Certains scientifiques, peut-être audacieux, pensent que la Lune constitue la clé pour comprendre les processus fondamentaux de l'évolution planétaire. Un des objectifs d'étude de l'environnement lunaire consiste en la détermination *in situ* de la structure interne de la Lune et de sa composition. Depuis l'annonce du plan du Président américain, on assiste à un certain nombre de propositions de missions de retour d'échantillons à partir de la Lune, en particulier, en provenance des régions montagneuses et surélevées ou bien de sa face cachée.

D'autres disciplines que celles liées à la connaissance de l'univers observable ou à celle du milieu lunaire lui-même gagneraient à posséder des installations sur la Lune. En particulier celles liées à l'extension des activités humaines dans l'espace et au développement d'écosystèmes artificiels préalables à l'établissement d'une base permanente. Tout cela nécessite des études sur la physiologie humaine dans des conditions de gravité réduite et la recherche de systèmes de protection contre les radiations. Il y a sur la Lune un grand avenir pour les expériences de biologie et d'exobiologie.

Mais c'est surtout la physique qui bénéficierait le plus d'implantations lunaires permanentes en raison des caractéristiques de l'environnement lunaire, à savoir :

- un vide presque parfait, idéal pour les accélérateurs de particules qui pourraient fonctionner à ciel ouvert à des coûts bien moindres que sur Terre, mais aussi pour des expériences en physique atomique et moléculaire ou pour l'étude du comportement de la matière en ultravide (certaines substances manifestent un effet dit de « getter » inconnu sur Terre qui se révèle par un phénomène d'absorption des gaz) ;

2. Notons qu'il y a controverse au sujet de l'eau lunaire car des mesures effectuées en ondes radio sur ces cratères polaires lunaires par l'équipe américaine de Bruce Campbell ont introduit une dissonance selon laquelle les quantités d'eau contenues sous forme de glace sous ces cratères seraient moins élevées que ce que pensaient Alan Binder, chef de la mission Lunar Prospector et Paul Spudis. De notre point de vue les responsables de la mission polaire lunaire américaine n'ont pas surestimé la quantité de glace d'eau lunaire : celle-ci se trouve à 40 ou 50 centimètres sous la surface, ce qui rend aléatoire les mesures radio en y ajoutant le fait que les oxydes de fer, communs sur la Lune, font obstacle à la propagation de ces ondes. Selon Wernher Van Braun et Herbert Pichler, il se pourrait même que dans d'autres régions que les pôles il existe des « glaces juvéniles éternelles » qui remonteraient à la surface où elles seraient vaporisées par des impacts. Selon l'astrophysicien américain Thomas Gold, un nuage de vapeur d'eau aurait été détecté, lors du programme Apollo, au dessus de la Lune. Cette eau aurait été apportée par des comètes et il n'est pas inutile de rappeler que, selon l'astrophysicien belge Armand Delsemme, 95 % de l'eau terrestre aurait été également apportée par ces corps considérés comme des reliques fossiles des premiers âges du système solaire : or la Lune a reçu à la même époque reculée ce même type de bombardement.

3. Le vide lunaire, équivalent à 10⁻¹³ Torr, est propice à de nombreuses activités technologiques.

Encadré 1 L'astronomie lunaire

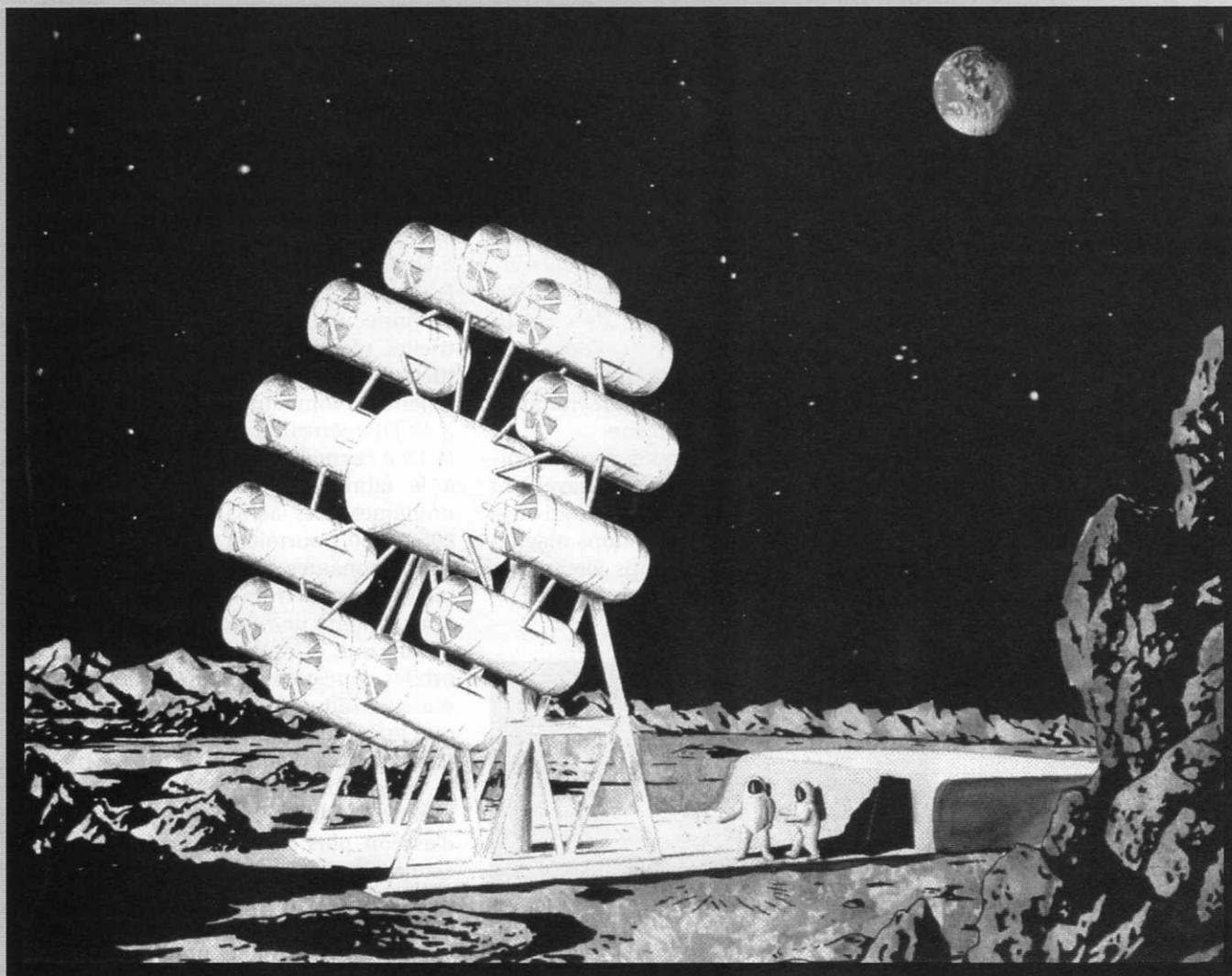
Les astrophysiciens américains Agnek et Powers avaient calculé, dans les années 60, qu'un simple petit télescope de 30 centimètres d'ouverture, placé sur la Lune, permettrait d'observer des objets 20 fois plus faibles en luminosité que les astres les plus faibles photographiés par le télescope du Mont-Palomar. Depuis cette époque, on sait combien l'astronomie optique terrestre a progressé avec des instruments comme le VLT (Very Large Telescope composé de 4 télescopes de 8 mètres d'ouverture), le télescope Keck et surtout les techniques d'optique adaptative non linéaire (et de spectroscopie associée) qui ont été intégrées à ces télescopes géants^a. Toutes ces techniques ont pour origine les idées développées par l'Américain Horace Babcock (1953) et un certain nombre de concepts utilisés pour corriger les effets optiques de l'atmosphère et qui étaient classifiés car destinés à l'observation et à la surveillance par des satellites artificiels espions.

Tous ces progrès technologiques rendent les possibilités d'observation entre un télescope lunaire et un télescope terrestre de taille équivalente moins grande qu'à l'époque des pionniers de la conquête de l'espace mais l'examen comparatif des conditions dans lesquelles se développent ou se déroulent ces deux types d'astronomie fait quand même pencher la balance en faveur de solutions lunaires. L'astronomie lunaire est potentiellement intéressante pour l'astronomie optique, l'astronomie UV et plus encore la radio-astronomie : il serait possible d'installer sur la face cachée de la Lune de grands radiotélescopes fonctionnant en interférométrie avec, en plus, l'avantage d'être à l'abri des ondes radio naturelles et artificielles de la Terre. Comme l'a écrit Jack Burns, professeur d'astronomie à l'Université du Nouveau-Mexique : *« Malgré sa surface inhospitalière, la Lune est peut-être le meilleur emplacement de tout le système solaire pour les observations astronomiques : elle est quasiment dépourvue d'atmosphère, sa surface est remarquablement stable, les ondes lumineuses et radio y sont faibles, surtout sur sa face cachée et les matières premières nécessaires à la construction de télescopes sont suffisamment abondantes. »* Si nous avons seulement mentionné, parmi les potentialités astronomiques de la Lune, l'astronomie optique et UV, en plus de la radioastronomie, c'est parce que des observatoires lunaires dans des domaines comme le rayonnement gamma et le rayonnement X n'apportent aucun avantage par rapport à des satellites scientifiques spécifiques de ces longueurs d'onde à cause de la sophistication aujourd'hui atteinte par les instruments des satellites en orbite (satellites Compton-GRO, Chandra, XMM, Integral). Pour ce qui concerne l'infrarouge, le problème est ambigu : l'intérêt est réel

d'installer ce type de télescope sur la Lune mais, pour affiner les mesures, il faudra tenir compte également de l'importante quantité de rayonnement infrarouge émise par notre satellite et pouvant noyer quelque peu le rayonnement émis par d'autres objets astrophysiques. Selon les astrophysiciens Jack Burns, Nebojda Danic, Jeffrey Taylor et Stewart Johnson, sur un certain nombre de plages de longueurs d'onde, des télescopes lunaires seraient incomparablement supérieurs non seulement aux observatoires terrestres les plus sophistiqués mais également aux télescopes embarqués sur des satellites qui ont pourtant révolutionné l'astronomie. Selon les mêmes auteurs, les télescopes optiques lunaires délivrés des turbulences de l'atmosphère pourraient fonctionner en interférométrie et donner des images 100 000 fois plus précises que celles des meilleurs télescopes terrestres. Par rapport à des télescopes optiques ou UV placés en orbite terrestre, les télescopes lunaires, selon les mêmes astrophysiciens, offriraient trois avantages : il y a tout d'abord le risque à prendre en compte de collision avec des débris d'autres satellites car notre environnement circumterrestre est très pollué de ce point de vue. Les astrophysiciens sont très préoccupés par cette réalité qui s'ajoute à la pollution lumineuse venue de l'éclairage des villes et aux interférences produites par les ondes radio (pour les radiotélescopes). Les études et simulations effectuées montrent qu'il y aurait trois zones principales où se concentrent les débris spatiaux, à savoir les altitudes de 800, 1000 et 1500 kilomètres par rapport à la Terre. C'est dans ces zones qu'orbitent en permanence ou temporairement, en fonction de leurs trajectoires, un certain nombre de satellites scientifiques.

Le deuxième avantage à prendre en compte pour des télescopes lunaires par rapport à des télescopes en orbite terrestre vient du fait que les orbites circumterrestres se situent dans des zones où les poussières et les gaz (malgré, ici, leur faible densité) sont encore présents avec des inconvénients majeurs : le phénomène de diffusion de la lumière par ces poussières émettant du rayonnement infrarouge qui noie partiellement les rayonnements infrarouges de faibles intensités produits par des phénomènes cosmiques. Troisième avantage pouvant justifier la mise en œuvre de télescopes implantés sur la Lune : le frottement des satellites placés en orbite basse et qui voient leur déplacement freiné par une atmosphère résiduelle raréfiée et qui oblige les scientifiques à procéder à des rehaussements d'orbite, ce qui a été fait à plusieurs reprises pour le télescope spatial Hubble. Autre désavantage dû à ces orbites basses, les satellites sont soumis à de très brèves fluctuations thermiques et

a. L'optique adaptative a d'abord été testée au foyer du télescope de 3,6 mètres de l'ESO (European Southern Observatory-système Adonis) et au télescope de 3,6 mètres de diamètre Canada France Hawaii (système Pueo). Le système d'optique adaptative du VLT s'appelle pour sa part Naos.



gravitationnelles qui déforment les miroirs et les antennes des radiotélescopes avec pour conséquence de dégrader la qualité des images transmises, ce qui s'ajoute aux inconvénients dus à la proximité de la Terre : la lumière parasite de notre planète limite la qualité des images reçues, et son champ magnétique, qui s'étend dans l'espace sous forme de magnétosphère, parasite la détection des ondes radio kilométriques en émettant des ondes radio basse fréquence qui masquent presque complètement les premières.

D'autres scientifiques ont également travaillé sur un projet consistant en la construction d'antennes paraboliques de 500 mètres de diamètre en epoxy-graphite entièrement orientables pour la détection des ondes radio et sur des projets de miroirs optiques de 16 mètres. Parmi les projets de télescopes lunaires, il faut citer le projet d'hypertélescope au sol, dérivé du projet terrestre d'Antoine Labeyrie dénommé OVLA (Optical Very Large Array) qui est un interféromètre, et le projet d'interféromètre optique géant à double anneau LOUISA (Lunar Optical Ultraviolet Infrared Synthesis Array) imaginé aux USA. Selon Jack Burns, le pouvoir de résolution de LOUISA serait 10000 fois supérieur à celui du télescope spatial Hubble, ce qui

lui permettrait, entre autres découvertes, de mettre en évidence l'existence de planètes de type terrestre autour des étoiles les plus proches. Selon Jack Burns et ses collègues qui ont cosigné l'article paru dans la revue *Pour la Science* de mai 1990 : « Avec un pouvoir séparateur de un cent millième de seconde d'arc, cet interféromètre permettrait l'étude de problèmes jusqu'ici insolubles. Il détecterait des planètes qui, comme la Terre, gravitent à proximité d'une étoile, et pourrait peut-être même déterminer la composition de leur atmosphère ; de telles études feraient considérablement progresser la recherche de vie extraterrestre dans notre galaxie. Le LOUISA observerait même les planètes et les astéroïdes de notre système solaire avec une précision supérieure à celle des images fournies jusque là par des sondes. Il donnerait des images de la surface des étoiles et révélerait les mouvements qui s'y produisent, apportant ainsi de précieux renseignements sur la structure interne et l'évolution des étoiles. Il étudierait les mouvements des galaxies, les spirales autour des trous noirs, les étoiles à neutrons et les galaxies qui ont explosé. Enfin, il mesurerait le mouvement propre des quasars et révélerait les irrégularités de l'expansion de l'Univers ».

il serait possible d'installer sur la Lune de grands télescopes fonctionnant en interférométrie



L'étude physique et chimique ainsi que la cartographie

de la surface de la Lune sont d'un grand intérêt scientifique pour comprendre la genèse du système planétaire Terre-Lune.)

- une absence de champ magnétique notable sur la plus grande partie de sa surface : la dynamo interne de la Lune est éteinte depuis plus de trois milliards d'années ;

- un froid intense durant les nuits qui, conjugué au vide et à l'absence d'atmosphère, permettrait de nombreuses expériences sur la supraconductivité. A très basses températures, la résistance de certains alliages ou métaux devient nulle, ce qui permet la production de champs magnétiques intenses ;

- la chaleur intense du jour lunaire ;

- la réduction de la force de gravitation à un sixième de la valeur terrestre.

Toutes ces caractéristiques sont importantes pour les physiciens qui travaillent dans des disciplines où le vide, le froid ou la chaleur, la gravitation, les champs magnétiques intenses et les champs électriques jouent un rôle.



Le marché des cinq prochaines années pour Arianespace

ne dépassera pas les quatre à cinq satellites par an.

LA STRATÉGIE ÉCONOMIQUE

Quel que soit le domaine d'activité (scientifique avec une base économique pour la soutenir ou une base industrielle) il est impératif d'impulser un processus dynamique où toutes les étapes vont s'emboîter en préparant à chaque fois les prémisses de l'étape ultérieure afin de réduire les coûts et de faciliter l'autofinancement. Un bon choix des stratégies et des technologies est nécessaire pour éviter le

développement d'un système pesant trop longtemps sur l'économie terrestre, et favoriser l'autonomie des implantations spatiales. On ne peut donc coloniser la Lune dans un seul but scientifique qui peut être remis en cause par une décision d'un pouvoir politique estimant que « la science ne rapporte rien » et qu'il faut couper les fonds comme George W. Bush a été à deux doigts de le faire avec le télescope Hubble. Pour des raisons stratégiques, d'efficacité, de protection contre les pollutions industrielles résiduelles (les simulations effectuées à terre montrent que les poussières lunaires retombent dans un rayon de 30 à 40 kilomètres), il serait sage de réserver la face cachée de la Lune à la science et à la fabrication des instruments astronomiques. Ces activités, vers les années 2050-2060, pourraient mobiliser entre 80 et 100 astronautes scientifiques qui seraient relevés tous les trois mois. On voit déjà que pour soutenir une colonisation scientifique de la Lune, il faut sur celle-ci et sur les orbites terrestres et lunaires une certaine masse critique qui ne pourra être établie que grâce à un volume d'activités important justifiant d'autres investissements que le simple besoin d'étendre nos connaissances. L'activité de production permettrait d'asseoir plus solidement les fondements économiques du programme scientifique lunaire. Il est essentiel de bien comprendre que les politiques ne débloquent pas les fonds nécessaires à un programme lunaire à buts scientifiques. Ils voudront des justifications économiques, énergétiques ou bien encore utiliser la Lune comme un tremplin pour la conquête du système solaire.

Elles sont tout aussi importantes que les justifications scientifiques, et le développement de l'énergie peut constituer une assise sur laquelle pourra se développer la science lunaire en important uniquement des instruments sophistiqués, les autres pourront être fabriqués sur la Lune. Deux contextes doivent être pris en compte pour pouvoir apprécier à leur juste valeur les programmes spatiaux : l'un tient à la survie du secteur spatial par son développement, l'autre tient à la convergence entre les potentialités de l'espace et les besoins d'une société industrielle en expansion. En particulier, il n'y aura probablement pas d'alternative à la conquête de l'espace dans le domaine de l'énergie. Il faut s'attendre à une forte demande venue des pays en voie de développement et Krafft Ehrlicke, auteur du plan de colonisation lunaire le plus élaboré jusqu'à présent, estimait la consommation d'électricité pour 2020 à 100 trillions de kWh en prenant en compte les pays du Tiers monde.

Actuellement, le secteur spatial ne représente guère plus de 4 à 5 % du chiffre

d'affaires de l'industrie aéronautique mondiale. Il voit son essor limité par les moteurs de développement sur lesquels il s'appuie. Ils ne sont pas indéfiniment extensibles et les spécificités des satellites (de télécommunications, météo, télédétection, étude de l'environnement, navigation et satellites scientifiques) qui lui servent de justification ont progressé au point que ce type d'activité ne connaîtra pas une extension massive comme l'ont montré des études parues au début des années 90. Excepté pour certains satellites à usage militaire ou d'usage spécifique, la bataille devra se recentrer sur les coûts de fabrication et de lancement. Cela ne présage rien de bon au vu du nombre croissant d'acteurs impliqués. A l'heure actuelle, le marché, de 27 milliards de dollars en 2000, est à 75 % représenté par les satellites de télécommunications et ce secteur revêt une importance stratégique pour les grands acteurs du spatial qui y puisent une partie importante de leurs revenus qui devraient dépasser les 100 milliards de dollars d'ici 2007. Nous nous permettons d'émettre des réserves sur un tel montant : ainsi pour la société européenne Arianespace, en sérieuses difficultés financières, le marché ne devrait pas dépasser 4 à 5 satellites par an, au lieu des 7 à 8 qui lui étaient assurés jusqu'en 2001. Au mois de novembre 2002 s'est déroulé un débat à l'Assemblée nationale ; selon le député Jean-Louis Bernard, membre de la Commission spatiale et de la défense de l'assemblée, le marché commercial annuel mondial du lancement des satellites serait passé de vingt satellites à seulement cinq ou six. Cette fragilisation du marché des lancements touche particulièrement l'industrie européenne qui ne bénéficie que d'un petit marché intérieur (contrairement aux USA qui souffrent moins avec d'importantes commandes militaires), et est beaucoup plus dépendante des contrats de lancements commerciaux. Néanmoins, aux USA, l'industrie spatiale a perdu 15 500 emplois entre 1996 et 2001 dont 3 927 dans le secteur des satellites de télécommunications. Depuis, on a constaté un très léger redressement, et beaucoup d'espoirs sont mis dans l'arrivée de la télévision à très haute définition (HDTV), mais ce type d'activités ne pourra être un moteur suffisant pour maintenir l'industrie spatiale. Le marché sera saturé et il ne restera plus que le marché du renouvellement des satellites et ceux-ci ont une durée de vie de plus en plus longue...

Autre secteur sur lequel on fonde beaucoup d'espoirs comme moteur du développement spatial : l'industrialisation

en microgravité. Elle bute sur l'incontournable problème des coûts de transport qui obèrent l'avantage dû au fait de travailler dans l'espace. Ces coûts comportent une part fixe incompressible et seules des solutions originales comme l'utilisation de parachutes, l'utilisation de la capacité résiduelle de lancement pour lancer des capsules récupérables, offrent de réelles opportunités. Toutefois, le coût de transport n'est pas le seul problème, dans un certain nombre de domaines la microgravité n'a pas répondu aux attentes, des innovations de procédés et de produits réalisées grâce au savoir acquis dans l'espace ont débouché sur quelques applications à Terre. Aujourd'hui, on se rend compte que certaines études étaient exagérément optimistes : c'est le cas de celle de la Société Rockwell International, qui, en 1984, évaluait à plusieurs dizaines de milliards de dollars, pour l'an 2000, le seul marché des semi-conducteurs, des verres optiques et des médicaments produits dans l'espace, de même, l'étude de Richard Randolph évaluait à 100 milliards de dollars le seul

marché de l'arséniure de gallium pour les années 2004-2005... On peut espérer atteindre le seuil de rentabilité en 2025-2030 grâce à des systèmes de transport totalement récupérables desservant des mini-stations automatiques qui « banaliseront l'accès à l'espace » et réduiront considérablement le coût du kilo en orbite. L'apport d'éléments standardisés venus de la Lune pourrait aider à construire des complexes industriels en microgravité. Mais ces systèmes de transport auront bien d'autres justifications : maintenance et réparation de satellites, installation d'infrastructures orbitales (amenées à poste par des lanceurs lourds), emport en orbite basse d'équipages spécialisés qui seraient ensuite transférés vers de grands chantiers spatiaux ou missions lunaires à partir de grands vaisseaux construits et parqués en orbite basse.

Il est certain que la pérennité de la conquête spatiale s'inscrit dans la durée et ne doit pas dépendre des marchés : les moteurs du développement spatial industriel sont actuellement insuffisants pour assurer cette pérennité, et si nous continuons dans cette voie, l'avenir sera fait de chômage et de perte de compétences. Les conséquences sociétales seront dangereuses car dues à la fragilisation du tissu industriel et à la dispersion d'équipes d'ingénieurs et de techniciens qui ne pourront pas se recycler en raison de leur surqualification.

La conquête spatiale ne constitue pas



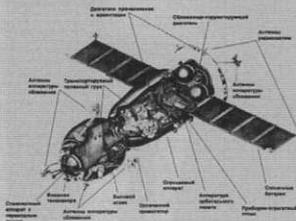
Krafft Ehrlicke (1917-1984)

a contribué de manière remarquable aux sciences de l'exploration spatiale. Son objectif était de faire sortir l'humanité de ses propres limites – la Terre – et de contrecarrer ainsi les thèses malthusiennes selon lesquelles l'homme serait prisonnier des ressources de sa planète.)



L'industrialisation en microgravité bute sur l'incontournable problème des coûts de transport.

Encadré 2 L'avenir de la fusion est sur la Lune



Nous traduisons ici un article paru sur un site russe rapportant avec précision ce qu'on sait du projet de conquête lunaire par la Société Energia :

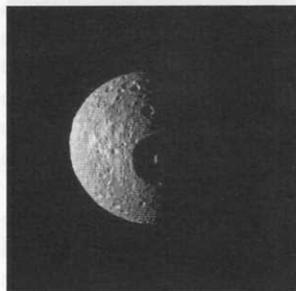
« Mercredi dernier, le directeur de la société de construction des vaisseaux spatiaux Energia, Nikolay Sevastianov, connu pour ses projets ambitieux de conquête de l'espace, a fait une nouvelle déclaration sensationnelle : « La Russie a comme projet de créer une base permanente sur la Lune et d'organiser le système de transport sur la Terre de l'hélium 3, vers 2015 », c'est-à-dire au moment où la NASA compte reprendre les vols habités vers la Lune et cinq ans avant la construction d'une base par les USA, selon leurs calculs les plus optimistes. « A partir de 2020, la Russie pourra déjà commencer l'extraction industrielle de l'hélium 3 » a déclaré Sevastianov à l'ouverture des 25^e Lectures Académiques à Moscou, consacrées à la mémoire de l'académicien [et constructeur en chef] Sergey Korolev. La base industrielle de la Lune sera desservie par le vaisseau piloté Kliper et le remorqueur Parom conçu par Energia. Ils formeront un seul complexe de transport, à usages multiples, qui remplacera le vaisseau habité actuel Soyouz et le cargo Progress. Mais à vrai dire, pour l'instant les deux vaisseaux n'existent que sur le papier [...] et en maquette. De plus, même en cas de réussite du projet Kliper (proposé parmi les autres projets de la nouvelle génération du système piloté à usages multiples), les fonds sont, aujourd'hui, insuffisants pour sa construction. Le Programme spatial fédéral finance 10 milliard de roubles (2,9 milliards d'euros), un tiers de la somme nécessaire. L'agence spatiale russe, RosKosmos, compte obtenir le reste de la coopération internationale, mais aujourd'hui, malgré l'intérêt manifesté par l'Europe et des pays

asiatiques, Kliper n'a pas d'investisseurs réels. Pourtant, Sevastianov a déclaré que l'exploitation débutera en 2015. Il est encore plus difficile de dire quelque chose de concret sur la réalisation du système de transport Parom. Cet appareil spatial est conçu selon un nouveau schéma : on ne chargera pas le fret en soute, Parom servira uniquement comme remorqueur de conteneurs. Il sera amené par une fusée porteuse sur une orbite basse, à 200 km, où d'autres fusées amèneront sur la même orbite les conteneurs chargés. Le remorqueur effectuera la jonction et le transport à destination. M. Sevastianov est persuadé que l'ISS servira aux vaisseaux d'Energia comme base de transbordement. Selon lui, la station s'agrandira, allant jusqu'à douze compartiments, et se transformera en cosmoport international. L'équipage, aujourd'hui composé de deux personnes, en aura six, avec pour tâche d'assembler sur orbite la future base lunaire. Mais M. Sevastianov n'a pas pu préciser d'où viendront les fonds. Sachant que le chef de la corporation Energia a partagé ses projets durant les lectures [académiques de] Korolev, nous ne pouvons croire qu'il ne s'agit que d'une construction théorique.

Nous voyons ici qu'Energia cherche à intéresser l'occident au financement d'une colonisation effective de la Lune. Malheureusement, compte tenu de la paralysie politique de l'Europe, cette société trouvera sûrement plus de soutien du côté des Chinois ou d'autres pays dits du Tiers monde. L'autre possibilité serait que l'état russe décide de consacrer une plus forte part de ses revenus pétroliers (au moins 40 milliards d'euros pour 2005, dont 15 ont déjà servi à rembourser des dettes) à l'espace.

CC

Source : Gazeta.ru (26.01.2006)



La géologie de la face cachée n'a pas été étudiée lors des missions Apollo

un espace autonome par rapport au système économique et industriel dans son ensemble (à cause des transferts de technologies vers d'autres secteurs et de l'effet d'entraînement qu'elle constitue) et par rapport à la société dans laquelle ceux-ci interagissent. Elle n'est pas un luxe que seules pourraient se payer quelques nations industrielles pour occuper quelques créneaux porteurs générant quelques retombées technologiques diffusées ça et là dans un certain nombre de laboratoires de recherche ou industriels particulièrement performants. L'arrivée de pays du Tiers monde (Chine, Inde, Brésil) sur le marché du lancement des satellites commerciaux

signifie bien évidemment que vont se réduire les parts de marché pour les acteurs déjà impliqués, même s'il peut être un certain temps dopé par des demandes de lancement de satellites venus de pays émergents.

Néanmoins, les nouveaux arrivants peuvent être une chance si nous fédérons nos forces pour la conquête de la Lune en substituant à la logique suicidaire du « marché » la notion de « besoin » afin de créer, à partir d'une infrastructure spatiale et lunaire, de nouveaux marchés non décelables avec nos méthodes inadéquates d'économétrie. Celles-ci, éventuellement valables pour l'économie terrestre, ne

peuvent pas être transposées pour l'espace. Il faut contribuer à l'émergence d'une véritable économie politique de l'espace, spécifique à celui-ci, dans la logique du principe de la découverte et de la croissance. Ainsi, il faut sortir d'une logique de transfert vers l'espace de problèmes mal résolus dans le cadre terrestre ou d'objectifs de prestige qui débutent par un coup d'éclat spectaculaire mais qui, comme le programme Apollo, sont sans lendemain. C'est le risque qui pèse sur le projet Mars Direct de Robert Zubrin car il ne s'insère pas comme une étape claire d'un processus de conquête de l'espace. A la place, il faut mettre en œuvre un plan visionnaire de conquête de la planète Mars à partir de l'orbite lunaire avec comme objectif le débarquement pour une implantation humaine définitive sur la planète rouge.

Seuls viendraient de la Terre les indispensables moteurs à propulsion nucléaire, l'avionique, les systèmes informatiques et les systèmes de survie.

Comme le pressentait Krafft Ehrlicke, et ceci est confirmé par les paléontologues et les spécialistes de l'évolution de la vie : dans chaque grande crise, la vie a trois possibilités : rendre les armes et périr, régresser à un stade minimal d'existence ou avancer et croître. C'est à ce dilemme qu'est confrontée l'humanité, même si la plupart de nos « élites » et de nos décideurs restent encore aveugles à cette perception. La Lune est le premier véritable stade de cette croissance qui devrait nous permettre de coloniser tout le système solaire alors qu'aujourd'hui, dans de nombreux domaines faisant appel à des technologies sophistiquées, la « qualité spatiale » est la référence sur laquelle on cherche de plus en plus à s'aligner.

Dès la fin du XIX^e siècle, le génial scientifique russe Tsiolkovski (1857-1935), le premier à avoir posé rationnellement les bases de ce qui allait devenir l'astronautique, avait pressenti que le destin de l'humanité était d'essaimer dans tout le système solaire, le transformant ainsi en une extension de sa biosphère. Quand on regarde la Lune illuminée de toute sa splendeur, on ne peut manquer de ressentir comme une sorte de fascination qui nous laisse supposer qu'une part importante de notre devenir est inscrite là, à quelques jours de vol par vaisseau spatial.

Le retour de l'Homme sur la Lune est nécessaire et n'a que trop tardé. En effet, ce projet correspond à des impératifs évidents de croissance et de découverte pour assurer la survie de notre civilisation mais aussi à

la nature humaine qui nous pousse à aller toujours au delà des frontières connues. Le géographe Ellsworth Huntington souligne que la marche de la civilisation s'est toujours effectuée en direction du froid et des tempêtes. Selon lui, plus le milieu est hostile, plus l'homme fait preuve d'ingéniosité, ce qui l'amène à développer sa science et sa technologie à un haut

niveau. Cette affirmation se situe d'ailleurs dans le droit fil du chemin de la célèbre « réponse au défi » de l'historien britannique Arnold Toynbee. Nombre de projections à long terme montrent qu'il existe une convergence totale entre les potentialités offertes par l'espace et les besoins et demandes d'une société industrielle en expansion sur les plans économique (Ehrlicke, Koelle), énergétique (Ehrlicke, Glaser), démographique (travaux de

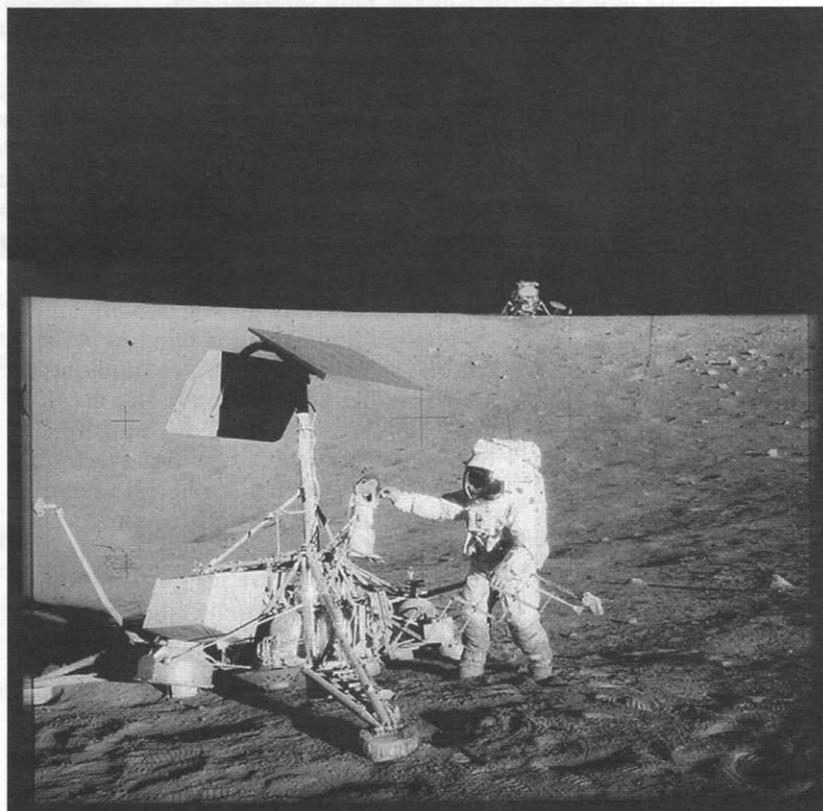
Meyer, Kaplan, Cremieux, W. Galle et O'Neill) mais aussi écologique, à plus long terme, comme l'ont souligné Ehrlicke et O'Neill. Dans ce contexte, la Lune est l'étape obligée de la plupart des scénarios envisagés et constitue, aujourd'hui, un test de la volonté ou non de nos sociétés de s'attaquer à un certain nombre de problèmes insolubles dans le cadre d'une économie et d'une technologie limitées au cadre terrestre. On retrouve d'ailleurs le même type de blocages au niveau de certaines disciplines scientifiques pour lesquelles

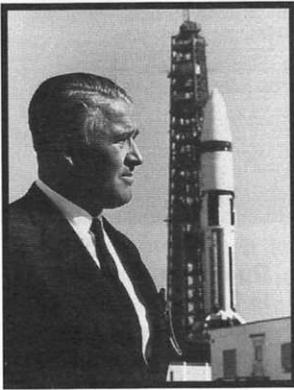
SELON KRAFFT EHRICKE, LE DESTIN DE L'HUMANITÉ EST D'ESSAIMER DANS TOUT LE SYSTÈME SOLAIRE.



Quand on regarde la Lune, on ne peut manquer de ressentir comme une sorte de fascination qui nous laisse supposer qu'une part importante de notre devenir est inscrite là, à quelques jours de vol par vaisseau spatial.

Le retour de l'Homme sur la Lune est nécessaire et n'a que trop tardé.





Le refus d'un programme martien habité, provoqua le départ de Von Braun de la NASA.

l'environnement particulier de notre satellite constitue une véritable bouée de sauvetage. La Lune nous interpelle sur notre capacité à relever nombre de défis. Il est évident que la science ne sera pas le moteur de la colonisation lunaire et que les programmes scientifiques devront se greffer sur un grand projet à effet d'entraînement, d'ordre industriel.

La première convergence entre les potentialités offertes par la colonisation lunaire et les besoins et les demandes de nos sociétés concerne la nécessité de porter notre économie à un stade supérieur. Il offrira des opportunités et des avancées en permettant l'apparition de nouveaux moteurs du développement spatial.

Il est ainsi impératif d'apprendre à travailler sur la Lune, de développer les équipements de traitement des minerais, et surtout, de savoir ce que l'on va y fabriquer.

Dans la suite du programme Apollo (pour un dollar investi, il en rapporta cinq à l'économie américaine) les Américains lancèrent les programmes de recherche technologique LESA et PATHFINDER destinés à préparer les instruments d'un possible programme post-Apollo, mais le retournement des politiques de la science, au début des années 70, qui s'effectua au détriment des grands programmes spatiaux, mit fin à ces recherches alors que les Américains maîtrisaient 80 % des technologies nécessaires à une implantation permanente sur notre satellite. Ceci, et le refus d'un programme martien habité, provoqua le départ de Von Braun de la NASA : comme Krafft Ehrlicke, il devint un conférencier extraordinaire, qui sut faire partager sa passion pour l'espace à des publics enthousiastes, mais il mourut prématurément, dépité de voir que ses recommandations aux politiques américains n'avaient pas été suivies d'effets. Trente cinq ans après le débarquement du premier homme sur la Lune, la perte de compétences technologiques implique un sérieux effort à fournir pour être crédible. Cela donne une idée du problème à résoudre en matière de politique technologique. Le programme Apollo est l'exemple moderne du succès d'un programme conjuguant volonté dirigiste de l'Etat et libre entreprise. Outre les grands groupes aérospatiaux, la kyrielle de petites et moyennes entreprises de haute technologie qui ont travaillé à ce programme ont formé un tissu industriel qui est encore à la base de la puissance des USA aujourd'hui. A l'heure actuelle, l'espace est un impulseur économique pour les télécommunica-

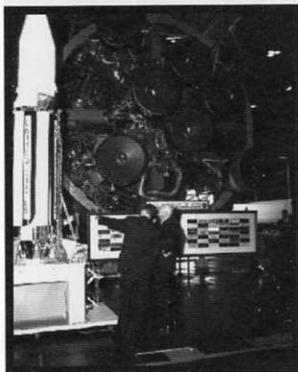
tions et l'électronique. Il le serait encore davantage s'il existait une volonté politique d'aller de l'avant, en ouvrant de nouveaux marchés, grâce à l'industrialisation lunaire, afin de répondre à des besoins terrestres et circumterrestres : petites usines orbitales, chantiers d'assemblage de vaisseaux, centrales de production d'énergie... A plus long terme, cela représente une voie de sortie de crise si les crédits sont alloués à la conquête de l'espace et au développement du Tiers monde. A ces raisons « d'économistes », il faut ajouter celles qui tiennent à la nature de l'homme, animal supérieur éperdu de découvertes et de conquêtes, et aux spécificités de notre technologie dont le développement est limité par notre espace économique global traditionnel.

POUR UN DOLLAR INVESTI DANS LE PROGRAMME APOLLO, IL EN RAPPORTA CINQ À L'ÉCONOMIE AMÉRICAINE.

On peut considérer également que la conquête de l'espace, nécessitant une optique à long terme, qui remet en cause les conceptions inspirant actuellement les politiques spatiales, est le moyen de contrebalancer les évolutions pernicieuses apparues depuis le début des années 70 au profit de recherches sectorielles à court terme. Une des conséquences les plus dramatiques de ces choix a été de donner une priorité aux investissements de rationali-

sation, donc de générer des mécanismes d'exclusion, au détriment des investissements dans de nouveaux produits, qui sont souvent en filiation avec les premiers. Notre propos est de démontrer qu'un grand programme spatial lunaire, mené au niveau mondial par de multiples acteurs, pourrait contribuer à inverser durablement cette tendance et serait un « modérateur » des mouvements de l'économie en enlevant une partie de celle-ci à la logique féroce du court terme.

Les dimensions démographiques et écologiques restent encore peu probantes pour justifier un grand programme de colonisation spatiale. La technologie actuelle permet en effet, si on l'utilise pleinement, de nourrir 10 milliards de personnes avec un niveau de vie acceptable sans dommages irréversibles pour l'environnement. A long terme, cependant, l'impact humain sur la biosphère pourrait devenir un facteur limitant. Le pionnier spatial germano-américain Ehrlicke, pourtant vigoureusement opposé aux thèses du Club de Rome, considérait que la chaleur résiduelle de l'industrie humaine était le risque majeur d'un développement limité au cadre terrestre. Avec la justification énergétique, dont nous parlerons ultérieurement, la justification la plus réaliste de la conquête lunaire et de l'espace relève



Von Braun et le Président Eisenhower.

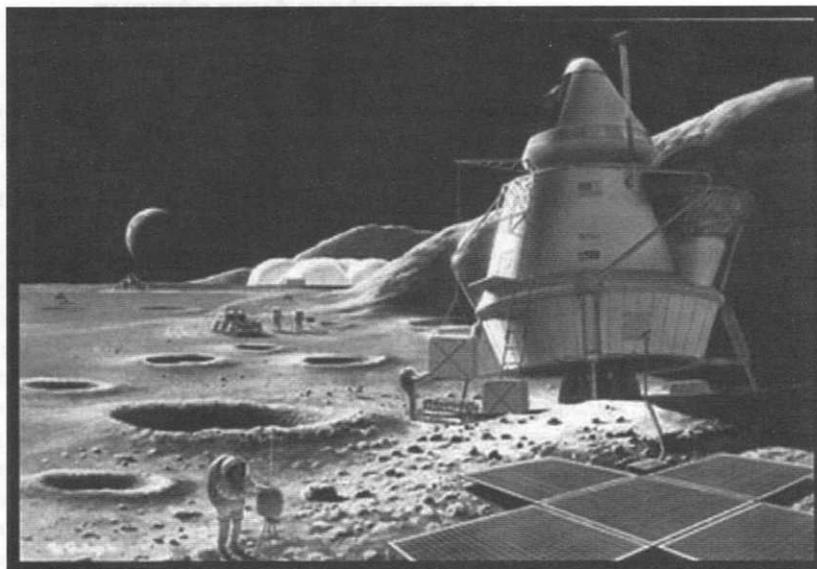
de la dimension économique à laquelle est lié un aspect sociétal. Cette approche intègre bien sûr le facteur énergétique puisqu'une économie hyper productive ne peut fonctionner sans source d'énergie quasi-illimitée. Rejetant les raisonnements linéaires, elle examine de manière critique les impasses auxquelles conduisent les politiques spatiales actuelles, peu susceptibles d'effet d'entraînement important sur l'économie globale et qui, actuellement, se traduisent plutôt par des réductions d'emplois dues aux fusions et restructurations. L'approche économique lunaire, et de façon générale, l'approche économique de la conquête de l'espace, raisonne en termes de processus à déclencher, d'utilisation des « ressources propres de l'espace », de conception étagée et étalée dans le temps, de politiques de transfert, de systèmes de formation et même de morale et d'éthique. Cette approche se heurte à une grande résistance de la plupart des économistes actuels. Les décideurs considèrent la conquête spatiale plus comme une dépense que comme un investissement, ayant perdu la vision d'un Kennedy, ils ne voient pas la possibilité « de corriger par cette conquête des tendances porteuses de destruction pour notre civilisation ».

Avant d'expliquer à nos lecteurs les moyens nécessairement importants pour coloniser la Lune (et ensuite les astéroïdes et Mars), il n'est pas inutile de rappeler un certain nombre de problèmes qui s'imposent à tout bâtisseur de scénarios et que la conquête de l'espace peut aider à résoudre :

- dégradation accélérée du rapport population active sur population totale dans les sociétés dites développées, en raison d'une compétition féroce entre les firmes amenant à la montée du chômage et de l'exclusion. La mise en place d'un programme spatial à long terme impliquerait de multiples acteurs et pourrait porter un coup d'arrêt à cette tendance et constituer un facteur de stabilisation important pour l'ensemble de l'économie ;

- mauvaise répartition entre les besoins et les ressources dans le domaine de l'alimentation, des matériaux, des minerais et de l'énergie, accompagnée d'une diminution des ressources potentiellement disponible : un programme spatial à long terme implique la disparition de la notion de « ressources rares à usage alternatif » en ouvrant à l'humanité l'accès aux ressources quasi-illimitées du système solaire, hélium 3 lunaire, matériaux et minerais lunaires facilement exploitables, environnements spécifiques favorisant certaines industries, possibilités infinies offertes par les astéroïdes et les comètes ;

- détérioration de la biosphère et de



Vue d'artiste de la colonisation lunaire

l'environnement : l'espace offre des potentialités intéressantes en matière de transfert pour l'environnement, un lieu de recyclage et de destruction des déchets spéciaux à partir du moment où la technique spatiale sera suffisamment banalisée. Une telle approche créerait des dizaines de milliers d'emplois dans l'industrie du conditionnement et des centaines de milliers dans le secteur spatial qui construirait des engins de très haute fiabilité qui pourraient être envoyés dans le Soleil à des fins de destruction. La technique spatiale ferait, de ce fait, des progrès immenses avec des retombées sur d'autres secteurs du transport spatial ;

- croissance lente et baisse quasi-générale du niveau de vie. La conquête spatiale a un considérable effet d'entraînement sur l'économie, l'industrie et la recherche, cela éliminerait les évolutions dangereuses que favorise la « mondialisation ».

A toutes ces justifications économiques et sociétales, il faut ajouter des considérations énergétiques. Notre satellite, de par les spécificités de son environnement et les ressources énormes qu'il possède, notamment en hélium 3 (carburant des futures centrales à fusion thermonucléaire deutérium-hélium 3) et en matériaux de construction pour l'espace (titane, fer, aluminium, silicium), permettrait de construire en orbite géostationnaire les centrales solaires SPS imaginées par Peter Glaser ou, à la surface de la lune, les centrales LSPS (Lunar Solar Power System) imaginées par David Criswell qui fourniraient leur énergie à la Terre par micro-ondes, grâce à des relais constitués de miroirs, vers de grandes antennes dénommées rectennas et placées à la surface terrestre où elles seraient couplées au réseau électrique. D'autre part, pour des raisons tenant à l'environnement (effet Joule), il pourrait être judicieux de produire une part importante de notre énergie hors de notre biosphère.

LA STRATÉGIE ÉNERGÉTIQUE

Nous voyons combien la Lune est le passage obligé pour la résolution de nombreux problèmes futurs de notre société. Un fait mérite particulièrement notre attention : la population de la Terre aura besoin de plus de 20 000 milliards de watts (GWe) de puissance électrique, à partir de 2050, pour lui assurer un haut niveau de prospérité. A cette époque, excepté le nucléaire, la plupart des sources d'énergie fossiles seront épuisées.

L'hélium 3 est fabriqué au cœur de notre soleil et éjecté dans l'espace par le vent solaire depuis des milliards d'années puis est piégé dans les sables et les roches lunaires. Il est utilisable pour alimenter le processus de fusion deutérium-hélium 3 et Krafft Ehrlicke avait élaboré des scénarios pour son extraction ainsi que pour son utilisation locale et terrestre. Le transbordement de l'hélium 3 sur Terre serait effectué par des cargos pouvant amener de grosses charges utiles d'une orbite cislunaire à une orbite circumterrestre. Le grand expert mondial pour l'hélium 3 est Gerald Kulcinski du Fusion Technology Institute (université du Wisconsin-Madison), conseiller de la NASA et membre de LUNEX (société des explorateurs lunaires). Selon lui : « *La proximité de la Lune et la présence massive d'hélium 3 apporté par le vent solaire et piégé par les roches lunaires offre des opportunités inestimables. L'hélium 3 est le combustible parfait pour le processus de fusion deutérium-hélium 3. Autre avantage rendu possible par ce processus de fusion : les déchets radioactifs auront un très court cycle de vie, ce qui simplifiera les problèmes de stockage et de retraitement avec pour bonne conséquence un coût négligeable pour notre environnement* ». Ces réacteurs pourront également utiliser l'hélium 3 avec l'émission de radiations moins-importante que dans un réacteur à fission ou même que dans un réacteur à fusion deutérium-tritium.

L'abondance de l'hélium 3 sur la lune, peut-être sous-évaluée car seuls six sites ont fait l'objet de prélèvements, est estimée au minimum à 1 million de tonnes, à comparer à 200 kg sur toute la Terre. Sur le plan économique, cette abondance lunaire peut déjà se traduire par des chiffres significatifs : une tonne d'hélium 3 pourrait délivrer annuellement 100 GW d'énergie. Selon Gerald Kulcinski, 100 tonnes suffiraient pour satisfaire toute la demande d'énergie sur Terre pendant un an. En se basant sur les mêmes données de Krafft Ehrlicke pour le voyage orbite lunaire-orbite terrestre, il a

imaginé de faire effectuer le transport par un cargo dont la capacité serait de 5 fois celle de la navette américaine actuelle. Ce type de véhicule resterait en permanence dans l'espace pour faire des allers-retours entre les orbites lunaire et terrestre : à partir de cette dernière, le transbordement des citernes d'hélium 3 serait effectué vers un cargo ailé qui atterrirait à la surface de notre planète comme la navette actuelle. Ce cargo aurait une grande autonomie et pourrait être amarré plusieurs mois à un grand spatioport construit en orbite basse en grande partie à partir d'éléments lunaires. Les techniques de transport imaginées par Kulcinski coûteraient, d'après ses propres estimations, 5 milliards de dollars mais cet investissement serait vite amorti pour un retour énergétique estimé à 300 milliards de dollars. Avec une valeur économique de 3 milliards de dollars au kilogramme, toujours selon Kulcinski : « *L'hélium 3 vaudrait beaucoup plus que l'or, les diamants ou l'uranium enrichi.* »

L'HÉLIUM 3 EST LE COMBUSTIBLE PARFAIT POUR LE PROCESSUS DE FUSION

Mais comme les résultats du programme Apollo l'ont montré, la Lune n'est pas seulement une réserve d'hélium 3 mais un monde fait d'oxydes et de silice, celle-ci étant particulièrement réactive en raison des conditions qui ont régné sur la Lune dans des âges anciens. Apollo 11 ramena sur Terre 22 kg d'échantillons, Apollo 12 : 34 kg, Apollo 14 : 34 kg, Apollo 15 : 77 kg, Apollo 16 : 95 kg et Apollo 17 : 117 kg ; cette dernière mission, qui comprenait un astronaute scientifique-géologue (Harrison Schmitt) fut la plus productive. Suite aux investigations menées par une centaine de laboratoires de tous pays, le physicien Gerard O'Neill (inventeur du concept novateur de « villes de l'espace ») estimait énorme le potentiel de richesses utilisables sur la Lune de par les spécificités de la géologie lunaire : celle-ci, à cause de sa faible gravité, possède ses éléments lourds en surface car, contrairement à la Terre, elle n'a pas subi le processus de différenciation qui a entraîné, pour notre planète, les éléments lourds vers le noyau. Toujours selon O'Neill, de 3 millions de tonnes de matériaux lunaires on peut tirer :

200 000 t d'aluminium.

500 000 t de fer

200 000 t de titane

160 000 t de silicium

Quelle est la base des affirmations d'O'Neill ? Ce sont les travaux d'analyse, sur Terre, des échantillons recueillis sur notre satellite. Les travaux portant sur les roches lunaires ont été centrés sur trois points :

- la minéralogie et la pétrographie : description des roches et étude cristallographique,



- l'étude des propriétés chimiques,
- l'étude des propriétés physiques, thermiques et mécaniques (mesure de leur résistance mécanique, de leur point de fusion et de leur densité dont la moyenne est de 2,9).

Les éléments lunaires identifiés lors du programme Apollo se rencontrent le plus souvent dans 4 types de roches. Ces roches sont :

- le plagioclase $(\text{Na,Ca})(\text{Si,Al})_3\text{O}_8$
- le pyroxène $(\text{Ca, Fe, Mg})_2\text{Si}_2\text{O}_6$
- l'ilménite (FeTiO_3)
- l'olivine $(\text{Mg, Fe})_2(\text{Si, O}_4)$

Pour certains de ces éléments, la Lune est plus riche que la Terre. Les éléments lunaires se répartissent comme suit.

Les éléments principaux sont :

- l'oxygène (42 % contre 48 % pour la Terre),
- le silicium (20 % identique à la Terre),
- le fer (8,5 % contre 5 % pour la Terre),
- le calcium (5,5 % contre 3 % pour la Terre),
- le titane (4,5 % contre 0,6 % pour la Terre),
- l'aluminium (4,3 % contre 7,5 % pour la Terre),
- le magnésium (1,8 % contre 2,5 % pour la Terre).

Les autres éléments, contenus dans une concentration inférieure à 1 % dans la croûte lunaire :

- le chrome (1 % à peine, soit 10 fois plus que sur Terre),
- le sodium très volatil (0,8 % au lieu de 2,5 % pour la Terre et qui se rencontre surtout dans le plagioclase, car celui-ci a un pouvoir absorbant sur le sodium, mais à un taux variable),
- le manganèse (0,3 %) deux fois plus abondant que sur Terre,
- le soufre (0,3 %) trois fois plus abondant que sur Terre. Compte tenu de sa grande volatilité, on aurait pu penser qu'il serait totalement absent des roches lunaires. Les scientifiques pensent que la Lune se serait formée à partir d'un noyau de sulfure de fer, pour l'essentiel, dont le soufre ne serait qu'un résidu. L'abondance de fer sur la Lune semble accréditer cette hypothèse. La Lune semble être porteuse de certains métaux à l'état de traces : potassium en faible quantité, cuivre rarissime, cobalt (néanmoins 100 fois plus abondant que sur Terre), le tantale, qui est l'élément le plus rare de l'univers et que l'on trouve en quantités 10 fois supérieures à celles contenues dans la croûte terrestre.

Au total les éléments suivants sont plus abondants que sur Terre : fer, calcium, titane, chrome, manganèse, soufre et cobalt, ce qui justifie l'intérêt économique

de la Lune. Cela dit, sans tenir compte des quantités considérables d'éléments un peu moins abondants que sur notre planète, de l'oxygène des roches lunaires et des glaces souterraines détectées aux pôles par Lunar Prospector.

Des recherches menées aux USA (Ehrlicke, Narodny, Maryniak, O'Neill) et en France (Institut du génie chimique de Toulouse, Ecole des Mines de Nancy, Ecole de Chimie de Paris) ont permis de lister les utilisations possibles de ces matériaux :

- l'aluminium et le fer peuvent servir comme matériaux de construction dans les grandes installations orbitales ou planétaires. Plus étonnant encore, une équipe franco-suisse composée de Frédéric Lantelme, Otto Haas et Jean-Claude Mayor a publié un article en 1989 (*La Recherche*, décembre 1989) : il semble possible, pour le stockage de l'électricité, de se servir des capacités d'accumulation de l'aluminium pour transformer celui-ci en matériau tampon fabriqué avec le surplus d'électricité durant les périodes creuses, puis capable à son tour de fournir du courant électrique pendant les heures de pointe à l'image de ce qui est déjà fait depuis longtemps avec le zinc, le plomb et le lithium ;

- le titane, selon Guy Pignolet ex-ingénieur au CNES et fervent militant de la cause de la conquête spatiale, possède un certain nombre de qualités : résistance à la corrosion, faible densité, rôle catalyseur, propriétés supraconductrices. Deux fois plus léger que l'acier et deux fois plus résistant, il est à la base d'alliages très purs utilisés dans les industries aéronautiques et nucléaires et la construction des sous-marins. Sur Terre le problème vient de sa relative rareté et des conditions de sa préparation liée à la présence d'oxygène qui, au-dessus d'un certain seuil, lui fait perdre ses qualités. Préparé sur la Lune, son coût baisserait rapidement et permettrait de supplanter l'acier dans de nombreuses constructions. Selon Guy Pignolet : « Il serait possible de construire des ponts, des navires capables de résister pendant des siècles sans corrosion et pratiquement sans entretien » ;

- le silicium : abondant sur la Lune, il serait un avantage pour la production de cellules solaires utilisables sur les centrales solaires de type SPS (en orbite géostationnaire) et de type LSPS (sur la Lune). Ce silicium permettrait de se passer des coûteuses importations terrestres et pourrait concurrencer l'arséniure de gallium élaboré dans l'espace ;

- les matériaux bruts lunaires : compactés et entassés, ils pourraient servir de protec-



Avec le **Titane lunaire**, il serait possible de construire des ponts, des navires capables de résister pendant des siècles sans corrosion et pratiquement sans entretien.

LA LUNE A UN POTENTIEL ÉNORME DE MATÉRIAUX UTILISABLES



**Vue d'artiste
d'une cité spatiale**

tion contre les rayonnements dans la construction de boucliers passifs pour des installations orbitales habitées.

Enfin, les gaz sont rares sur la Lune, sauf l'oxygène et les gaz lourds qui ont été piégés dans les roches lunaires (hélium, argon, krypton, néon).

Nous venons de voir combien les spécificités du milieu lunaire permettraient le développement *in situ* d'industries correspondant à des besoins de notre société en produits finis ou semi-finis et à des activités scientifiques multiples.

Il faudra faire des choix et donner la priorité à certains des justificatifs de la colonisation lunaire. Outre la science, il faudra rapidement, parallèlement aux recherches terrestres sur la fusion, donner une priorité aux sources d'énergie dans l'optique de fournir celle-ci à bas coût et en quantité 4 à 5 fois supérieure à la production actuelle. Sur Terre, le problème énergétique est une véritable bombe à retardement qui va s'amorcer dès les années 2025-2030 et exploser vers 2050 si nous ne prenons pas rapidement les mesures nécessaires. L'épuisement des ressources fossiles (charbon, pétrole, gaz) et l'opposition au nucléaire classique, en incluant les surgénérateurs, les empêchera de combler seuls le trou énergétique. Il ne faut pas oublier que sur les 6 milliards d'habitants que compte la planète (12 milliards en 2100), 2 milliards n'ont toujours pas accès à l'électricité. L'inégalité apparaît encore plus frappante si l'on se réfère aux chiffres donnés dans le document Energie (Monde Dossiers et Documents 2001) : actuellement 1,2 milliard de personnes dans les pays les plus développés (soit 20 % de la population mondiale) utilisent 60 % de l'énergie disponible tandis que les habitants des pays en voie de développement (près de 5 milliards de personnes) en consomment 40 %. Si nous nous basons sur une option surgénérateurs pour mettre fin à ce déséquilibre, l'avantage serait positif pour la protection de la

biosphère car l'électronucléaire ne rejette pas de gaz à effet de serre : selon l'expert du CEA Gilbert Naudet, l'électronucléaire permet actuellement d'éviter l'émission annuelle de 1,8 milliard de tonnes de CO₂. Ce facteur est à prendre en considération pour l'avenir car, privé d'énergie, le Tiers monde, faute de solutions alternatives, se tourne déjà massivement vers le charbon avec des conséquences néfastes pour l'environnement⁴. Actuellement, celui-ci représente 50 % des ressources énergétiques des pays sous-développés et dans certains de ces pays les réserves sont

considérables (USA, Chine, Inde, Afrique du Sud). Il représente des dangers évidents pour la biosphère en cas d'utilisation massive dans les pays pauvres ou moins pauvres (les USA et la Chine consomment chacun près d'un milliard de tonnes de charbon par an).

De plus, la Chine limite volontairement son extraction en fermant certaines mines et intensifie son programme électronucléaire, elle effectue des recherches sur les centrales solaires spatiales (dans un institut de Shanghai) et met en place un gigantesque réseau hydro-électrique permettant également de dompter ses fleuves. Enfin, l'extraction du pétrole off-shore, du pétrole des schistes bitumineux et des sables asphaltiques ne sera pas suffisante pour pallier à la pénurie de pétrole annoncée.

Notre avenir est donc de générer une croissance économique exponentielle et si nous envisageons celle-ci dans le cadre fermé de notre globe terrestre ou même de notre proche environnement circumterrestre, celle-ci sera inévitablement limitée. Des études très sérieuses montrent que si l'on voulait développer les économies du Tiers monde à un niveau acceptable en utilisant l'actuelle combinaison de ressources énergétiques (charbon, pétrole, hydroélectricité, fission nucléaire), les ressources nécessaires seraient de plus en plus coûteuses à obtenir. D'autres études n'appréhendant pas suffisamment le phénomène de désindustrialisation des USA, indiquent que, dans le cadre d'un véritable développement industriel et en prenant comme hypothèse un taux de croissance annuel du PNB de 3 %, l'actuel système de combinaison de ressources énergétiques serait non seulement incapable d'assurer la seule croissance de l'économie américaine mais même d'assurer son maintien, dans le cadre d'une croissance nulle, et ce dès 2025-2030. Ces inquiétantes perspectives montrent bien l'intérêt des travaux sur la

fusion thermonucléaire à hélium 3 et sur les centrales solaires spatiales et lunaires : celles-ci impliquent une utilisation massive des ressources lunaires soit pour produire de l'énergie directement soit pour utiliser les matériaux de la Lune pour des systèmes d'énergie spatiale.

Soulignons au passage combien sont dérisoires les thèses écologistes proposant l'utilisation d'éoliennes ou du solaire terrestre. En effet la densité de puissance transmise au sol par le Soleil ne dépasse pas 235 à 236 W par mètre carré à cause des variations périodiques dues à l'alternance des jours et

POUR UN VÉRITABLE DÉVELOPPEMENT INDUSTRIEL DES PAYS DU TIERS MONDE, ON A BESOIN D'UN PROGRAMME SPATIAL

4. Etude effectuée par J. Hanson, du Goddard Institute for Space Studies de la NASA, et Etude Global Solar Energy Concept qui a fait l'objet d'un exposé de la société allemande MBB lors du Colloque SPS 91 de Gif-sur-Yvette.

des nuits, des variations dues aux saisons et de la nébulosité de l'air (pour obtenir l'équivalent d'une tranche de centrale, 1650 Mwh, il faudrait couvrir un carré de 3 kilomètres de côté, et le coût serait incomparablement supérieur). En adoptant des solutions de ce type, il serait impossible de maintenir une industrie développée et on permettrait tout au plus à un milliard d'individus de survivre avec une réduction drastique du niveau de vie, et en laissant les 6 à 7 milliards restants vivre dans des conditions inacceptables. Comme l'a écrit Krafft Ehrlicke : « Si 4,5 ou 5 milliards d'êtres humains retombaient dans l'état arriéré des débuts de l'espèce humaine, des milliards en mourraient et la biosphère serait dévastée ». Ces conclusions étaient aussi partagées par Gérard O'Neill dans son livre *Les villes de l'espace*, même s'il réduit la Lune au rôle d'avant-poste, de site d'extraction et de traitement des matières premières afin de construire ses cités spatiales : pour l'acheminement des matières premières et des produits finis et semi-finis vers les zones de construction situées aux Points de Lagrange L4 et L5 qui sont des zones d'équilibre du système Terre-Lune, O'Neill envisageait d'utiliser un accélérateur électromagnétique, concept dont nous parlerons dans un prochain article *Conquête spatiale : Les moyens à mettre en œuvre*. Par rapport à O'Neill, Ehrlicke est partisan d'une industrialisation massive de notre satellite et n'envisage des cités spatiales qu'à un stade ultérieur et munies de propulseurs à fusion : ces villes dénommées Androcells se déplaceraient dans l'espace jusqu'aux confins du système solaire et puiseraient *in situ* (astéroïdes et satellites de Jupiter, comètes de courte période) toutes les matières dont elles auront besoin.

Il est certain que pour faire face au défi énergétique et à d'autres besoins comme la construction d'infrastructures orbitales lunaire, terrestres géostationnaires ou basses, la Lune va jouer dans le futur un rôle croissant de fournisseur de matières premières qui auront été traitées pour devenir des produits finis ou semi-finis. En ce qui concerne les minerais ainsi que les éléments facilement exploitables et traités sur la Lune, il sera possible de desservir un certain nombre d'installations orbitales grâce à la faible gravité lunaire. Il n'est donc pas nécessaire, au contraire du trajet Terre-Lune, d'utiliser des vaisseaux très puissants dès lors que les premières implantations lunaires ont été effectuées : cette faible gravité lunaire, égale au sixième de la gravité terrestre, justifie l'utilisation de la Lune comme avant-poste pour préparer des missions plus ambitieuses comme la colonisation de Mars.

Il va de soi que pour répondre à tous ces impératifs, il faut débarquer sur la Lune une certaine masse critique d'infras-

tructures industrielles qui permettront rapidement la fabrication d'un grand nombre d'éléments utilisables localement et exportables vers l'espace. Il ne faudra se tromper ni sur les stratégies ni sur les choix technologiques pour déclencher un processus de développement minimisant le temps pendant lequel la colonisation lunaire pèsera sur les ressources terrestres. Les spécificités lunaires, dont nous avons parlé : faible gravité, vide élevé, alternances de températures très basses et très élevées, nous permettent également d'accéder à des matières premières vitales au niveau industriel, dans un puits gravitationnel peu profond, pour les traiter sur place ou dans l'espace afin que leur qualité soit supérieure à celle de produits importés de la Terre.

Cet impératif a été particulièrement souligné par Krafft Ehrlicke et, plus récemment par H.H.Koelle de l'Université technique de Berlin. Selon Krafft Ehrlicke : « Il est facile de pourvoir à ce besoin, pourvu que l'on ne commence pas par mobiliser de vastes investissements dans la construction de vastes stations orbitales réalisées uniquement à l'aide de matériaux importés de la Terre, avant que les matériaux lunaires, qui doivent y être transférés, ne puissent être utilisés. » Il est en effet plus rationnel de choisir, pour développer les infrastructures du système Terre-Lune, l'option Lune-orbite terrestre basse ou GEO plutôt que l'option orbite basse-Lune en dépit de l'avantage de posséder des têtes de pont sur cette orbite : à partir de là un simple Delta-V propulsif de 3,2 km/s suffit pour être libéré de la gravité terrestre vers notre satellite, mais il est plus judicieux pour éviter de construire ces stations à un coût élevé à partir de produits finis terrestres, de choisir grâce à des lanceurs lourds, le vol direct vers la Lune et de construire ultérieurement ces stations têtes de pont en orbite basse avec une majorité de composants lunaires. Rappelons que pour atteindre l'orbite géostationnaire (GEO), là où se trouvent la plus grande partie des satellites de télécommunications, il faut vingt-deux fois moins d'énergie au départ de la surface lunaire que de la surface terrestre. La « descente » des structures fabriquées sur la Lune en direction des orbites terrestres basses peut s'effectuer à un coût négligeable en utilisant des propulseurs électriques. Toutefois le problème fondamental, qui implique une volonté politique forte, reste celui des moyens à mettre en œuvre : systèmes de lancement, structures et équipements destinés à la protection des astronautes, masse des équipements scientifiques et industriels à débarquer sur notre satellite, indispensables équipement énergétiques.... Nous aborderons ces questions dans le prochain numéro de *Fusion*. ○



« Si Dieu avait voulu que l'Homme conquiert l'espace, il nous aurait donné la Lune. »

Kraft Ehrlicke