

Colonisation de la Lune : de la nécessité d'une bonne stratégie

Dans un premier article paru dans le numéro 88 de Fusion, nous avons souligné combien étaient grandes les convergences entre les besoins de nos sociétés industrielles et les potentialités offertes par la Lune en matière économique ou énergétique. Au cours de ce second article, nous serons amenés à décrire la stratégie qui nous permettra de réussir la colonisation de notre satellite. La conquête par l'homme de l'ensemble de notre système solaire dépend de la réussite de cette entreprise.

Pour exploiter de la façon la plus rationnelle toutes les potentialités lunaires, hors justifications scientifiques, et pour qu'il y ait suffisamment d'avantages économiques justifiant un développement industriel de grande envergure de notre satellite, il est nécessaire de réunir plusieurs conditions.

D'abord, il faut trouver des justifications extralunaires, la colonisation et l'industrialisation de la Lune devant répondre à des besoins terrestres et permettre ainsi de surpasser des blocages et des goulets d'étranglement. C'est le cas de la fourniture et de la production d'énergie ainsi que, dans une moindre mesure, du titane lunaire. L'objectif doit aussi être la préparation plus rationnelle de programmes martiens ambitieux impliquant des vaisseaux de grande taille pouvant emporter une centaine d'astronautes ; ces vaisseaux ne peuvent être envisagés qu'à partir de l'assemblage de produits finis lunaires

PHILIPPE JAMET

de haute qualité dans l'espace.

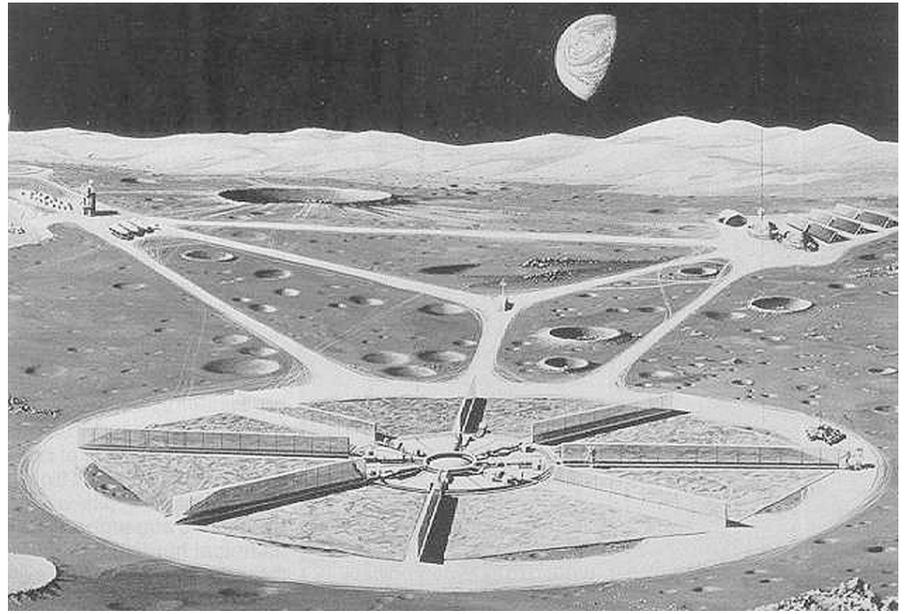
Pour le fonctionnement d'une base lunaire et rentabiliser rapidement le coût des premières implantations, il est aussi essentiel de disposer d'une énergie quasi illimitée et à faible coût. Dans les premières étapes, il sera possible, grâce à la durée des jours lunaires (13,5 jours terrestres) et à un fort taux d'ensoleillement, d'utiliser des fours solaires pour l'extraction et le traitement des matériaux hors de leur gangue ainsi que des centrales énergétiques solaires. Celles-ci seront composées de panneaux de photopiles dérivés de ceux utilisés sur les satellites mais beaucoup plus grands et bénéficiant, en ce qui concerne leur taille et leur masse, de la faible gravité lunaire. Selon le regretté Albert Ducrocq, 100 kW pourraient facilement être obtenus sur la Lune avec une centrale de 5 T. La colonisation et l'industrialisation de la Lune, en raison de ses caractéristiques, sont déjà rendues possibles grâce à l'énergie du Soleil mais son efficacité sera renforcée dans les étapes ultérieures par l'adjonction d'autres solutions comme le réacteur à haute température HTR, de petits réacteurs nucléaires utilisables notamment dans les régions des pôles où règne une semi-obscurité, des arcs électriques nucléaires, des HTR à lit de boulets de thorium

(sorte de surgénérateur), des réacteurs à sels fondus MSR lesquels, selon Krafft Ehrlicke, seraient d'une maintenance facile et auraient un impact limité sur l'environnement lunaire.

Il faut de surcroît s'assurer que le fonctionnement de la base lunaire présente d'importants avantages comparatifs par rapport à une exploitation terrestre et puisse, mieux qu'une industrie terrestre, fournir aux différentes orbites circumterrestres les matériaux, produits finis et semi-finis indispensables au développement d'une activité importante sur celles-ci. Le facteur à prendre en compte, c'est que les orbites terrestres basses et plus encore l'orbite géostationnaire sont, en termes d'énergie, plus « proches » de la Lune que de la Terre, malgré le fait que l'absence d'atmosphère sur la Lune rend compliqué la phase d'alunissage de gros tonnages puisque l'on ne peut pas profiter d'un aérofreinage. Nous examinerons au cours de cet article quelques-unes des solutions qui ont été envisagées.

Ensuite, le coût du transport entre les différentes orbites cislunaires et circumterrestres ne doit pas annuler les avantages que constitue le travail sur la Lune ou dans l'espace. Il faut ici souligner combien est négligeable le coût du transport surface lunaire-orbite cislunaire qui implique un delta-V propulsif de 1,7 km/s, auquel il faut ajouter 0,7 km/s pour atteindre la vitesse de libération. Ceci n'implique donc ni propulseurs très performants ni un coût élevé dans le sens Lune-Terre.

Enfin, il est indispensable que la Lune offre tous les éléments nécessaires au développement d'une industrie autonome ou, dans le cas contraire, que l'importation massive de ces éléments ne vienne pas grever d'un coût insupportable les avantages une fois les conditions précédentes remplies. La découverte de quantités considérables d'eau sous forme de glaces aux pôles lunaires (qui avait été envisagée par Thomas Gold, professeur d'astronomie à l'université de Cambridge) rend possible cet objectif d'une Lune plus autonome et ne dépendant de la Terre que pour des produits technologiques sophistiqués et des éléments comme l'azote et le carbone. Au cours des étapes qui suivront la



Une centrale nucléaire de 10 MW pourrait alimenter une base lunaire d'environ trois cents personnes.

colonisation lunaire proprement dite, ces derniers éléments pourront être extraits à partir des astéroïdes Apollo-Amor au moyen de vaisseaux à propulsion nucléaire ou par accélérateurs électromagnétiques de masse. L'eau des glaces lunaires – 3 milliards de tonnes à chaque pôle – contribuera quant à elle à la production importante d'oxygène et d'hydrogène liquides qui seront stockés dans des conteneurs en orbite cislunaire et sur les différentes orbites terrestres.

Certes, cela ne se fera pas au cours de la première étape de l'installation de l'homme sur la Lune. Au départ, l'oxygène extrait des roches lunaires servira pour rendre habitables les premières bases lunaires et de comburant pour les vaisseaux effectuant des trajets de retour vers la Terre. Toutefois, au fur et à mesure que nous serons capables d'exploiter les réserves de glaces d'eau des pôles, on pourra séparer, liquéfier et stocker de grandes quantités du comburant (oxygène) et du carburant (hydrogène), et les envoyer dans l'espace avec un accélérateur électromagnétique de masse jusqu'aux orbites cislunaires. Une partie des conteneurs d'oxygène et d'hydrogène resterait parquée sur ces orbites tandis qu'une autre, grâce à des moteurs-fusées ou des propulseurs électriques, serait installée sur les orbites terrestres basses et géostationnaires pour devenir les

premières « stations-service » de l'espace. Les vaisseaux spatiaux terrestres n'utiliseraient donc l'oxygène et l'hydrogène liquides produits sur Terre que pour le trajet Terre-orbite basse.

Améliorer le transport Terre-Lune

Nous ne pouvons pas, à ce stade, éviter d'aborder un problème central en ce qui concerne les techniques spatiales : il s'agit du rapport de masses qui, actuellement, n'est pas très favorable pour les vaisseaux terrestres qui doivent, pour atteindre la Lune, emporter tout leur carburant et comburant. Le programme Apollo est un bon exemple de la justification de notre démarche, même si le lanceur concerné – Saturn 5 – pouvait transférer vers la surface lunaire un tonnage supérieur à ce qui a été fait lors des six missions habitées qui ont atteint la Lune de juillet 1969 à décembre 1972. La fusée géante Saturn 5, d'une masse au décollage de 2 700 T et d'une hauteur de 110 m, possédant cinq moteurs F1 de 680 T de poussée chacun, avait la capacité de placer 140 T sur une orbite basse adéquate pour préparer le transfert vers une orbite lunaire. Sur ces 140 T, 45 T arrivaient en orbite lunaire, à savoir le module de commande, le

module de service et le LEM. Séparé de l'orbiter et du module de service, le LEM (chargé d'amener deux astronautes à la surface lunaire puis de les ramener en orbite cislunaire) ne pesait que 15 T, dont 1 T pour la charge utile scientifique et une petite réserve pour les échantillons ramenés à Terre.

Le programme Apollo nous a beaucoup appris et on ne peut que regretter que les fusées Saturn n'aient pas fait l'objet de développements ultérieurs plus puissants, comme le souhaitait Werner von Braun. Les chiffres sont sans appel : il a fallu une masse de départ de 2 700 T pour un débarquement lunaire de 15 T. Avec les techniques employées, il aurait pu envoyer sur la Lune une charge utile plus élevées. En faisant appel à un lanceur lourd basé sur des conceptions différentes et maximisant autant que possible la charge utile arrivant en orbite basse, le rapport de masses aurait encore pu être davantage réduit.

Albert Ducrocq, qui s'est livré à de savants calculs sur les masses délivrables en orbite et en surface lunaires, pensait qu'il est envisageable, avec les techniques actuelles, de faire arriver 40 T sur notre satellite en plaçant préalablement 300 T en orbite basse. Il faut préciser que sur ces 40 T, il faut retirer la masse du vaisseau lunaire proprement dit et des astronautes, ce qui laisse 25 T pour la charge utile. Cependant, on pourrait améliorer cette performance en version cargo automatique, ce qui permettrait de faire passer la charge utile à 40 T, l'estimation d'Albert Ducrocq. Tout ceci est nettement mieux qu'Apollo mais pourrait être encore amélioré par un type de véhicule complexe et coûteux qui a été étudié par les Américains dans le cadre des réflexions post-Apollo, à savoir le LLTV (Large Lunar Transfer Vehicle). Ce vaisseau, piloté par un équipage de deux astronautes et qui aurait été préalablement mis en orbite basse par un lanceur lourd, a été conçu pour être propulsé par des moyens chimiques (56 T d'ergols) et pour délivrer à la surface lunaire une masse de 81 T. Une fois passée la première phase d'industrialisation lunaire, le concept LLTV pourrait bénéficier des « stations-service » de l'espace dont on a parlé plus haut.

Déjà, on observe une première maximisation de la charge utile

puisque l'on n'a plus à emporter les propergols qui vont propulser notre vaisseau jusqu'en orbite cislunaire. C'est à cet endroit que celui-ci effectue une nouvelle opération de transvasement et d'emport de propergols qui vont lui assurer le comburant et le carburant nécessaires pour arriver à la surface lunaire. Dans cette configuration, le rapport de masses est encore beaucoup plus intéressant puisque l'on pourra maximiser la charge utile délivrée à la surface lunaire jusqu'à 70 ou 80 T, et cela avec un système classique propulsé en orbite basse avec un lanceur de type Energya, et 110 T avec un LLTV auquel on pourra retrancher 30 T d'ergols pour les remplacer par un poids identique en charge utile supplémentaire.

Outre l'amélioration du rapport de masses grâce aux composants des glaces lunaires, on obtiendra aussi une nette baisse des coûts du voyage Terre-Lune, du fait que nos vaisseaux spatiaux n'emporteront des propergols que pour atteindre l'orbite basse ; on estime le gain à minimum 50 ou 60 %. Il serait difficile d'imaginer une telle économie avec une fusée classique utilisant l'énergie libérée par la combustion de carburants chimiques pour assurer la poussée nécessaire du véhicule spatial.

Pour le transport Terre-Lune, il existe d'autres voies qui ont été explorées par les Américains Stanley Borowski (Lewis Research Center de la Nasa) et Robert Salkeld (System Development Corporation). Ils ont suivi des cheminements différents puisque le premier a étudié des solutions nucléaires alors que le second a travaillé sur des solutions chimiques classiques, mais en poussant cette technologie à ses limites grâce des idées innovantes.

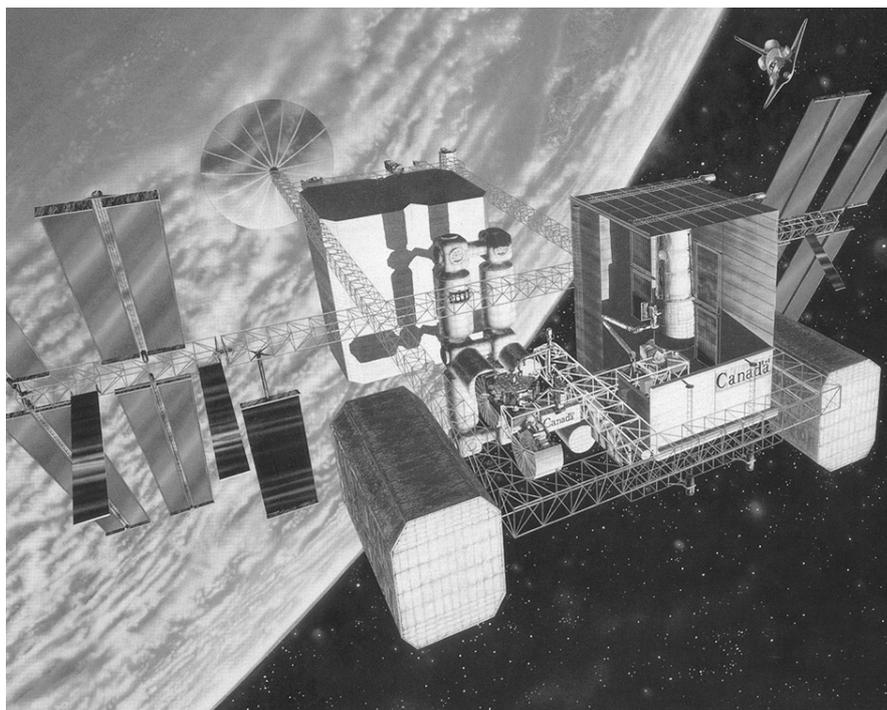
Les travaux de Stanley Borowski intègrent parfaitement l'utilisation de l'eau et des roches lunaires pour fournir respectivement de l'oxygène et de l'hydrogène puis de l'oxygène. Borowski fait remarquer qu'une quantité équivalente d'énergie peut être extraite de 13 T d'hydrogène et d'oxygène liquides, de 20 g d'uranium (pour la fission nucléaire), de 0,5 g de deutérium (pour la fusion nucléaire) et de 0,02 g de parts égales d'hydrogène et d'antihydrogène (pour la réaction annihilation matière-antimatière).

La fin de la Guerre froide et un début de coopération avec les ex-Soviétiques ont permis à l'équipe de Borowski de relancer les études entreprises lors de l'ancien programme Nerva (Nuclear Engine for Rocket Vehicle Applications), abandonné par l'administration Nixon malgré son succès, et celles du programme soviétique de moteur nucléothermique RD-0410, testé de 1978 à 1984 à Semipalatinsk dans l'Oural. Ceci a débouché sur le programme NTR (Nuclear Thermal Rocket) destiné à mettre au point un moteur nucléothermique. Toutefois, en 1992, alors que le président Bush prétendait reprendre une grande politique de l'espace avec la Space Exploration Initiative, le programme a été purement et simplement abandonné. Comme l'écrit Marsha Freeman : « *Il apparut que ni la Maison Blanche ni le Congrès n'avaient la volonté de payer pour un programme visionnaire.* » On peut considérer que cette décision a été prise à cause des conceptions libérales des républicains, lesquelles sont incompatibles avec une vision sérieuse de la conquête de l'espace.

En dépit de cela, Stanley Borowski ne s'est pas découragé et il a continué à collaborer par des échanges d'informations avec les scientifiques russes, préparant ainsi les bases de connaissances en nucléaire spatial de sorte qu'elles soient disponibles le jour où les Etats-Unis décideront de retourner sur la Lune. Au cours des années 1994-1999, Borowski et son équipe ont beaucoup élargi les possibilités prévues par le concept de moteur russe nucléothermique RD0410 ainsi que les expériences Nerva et Rover. Ils sont arrivés à un concept de type NTR amélioré, utilisant un moteur nucléothermique à cœur solide en double mode afin d'assurer à la fois la propulsion du vaisseau et sa fourniture en électricité pour les systèmes embarqués – la réfrigération active de l'hydrogène liquide, le système d'alimentation en oxygène, les communications à haut débit vers la Terre, les calculateurs et les ordinateurs. Un système de type NTR pourrait être utilisé dès les premières étapes pour tracter des charges utiles d'une orbite terrestre basse à une orbite cislunaire, après avoir été amené sur cette orbite basse en tant qu'étage supérieur par un lanceur-cargo de

type Shuttle-C ou les différentes versions du lanceur ALS (Advanced Launch System), lequel était, il y a quelques années encore, souhaité par l'US Air Force. Le NTR pourrait aussi, en étant triplé ou quadruplé, assurer la propulsion d'une navette nucléaire du type de celle proposée par la société Lockheed vers la fin des années 60, et pour laquelle il fut envisagé de faire appel aux moteurs Nerva. La navette nucléaire aurait eu une longueur de 45 m pour 10 m de diamètre et aurait été placée en orbite basse par une dérivée de Saturn 5, baptisée « Intermediate 21 » et comportant seulement deux étages. Ce projet était prévu pour le début des années 80 et il s'agit d'un exemple supplémentaire illustrant le gâchis en politique spatiale depuis que, dans les années 70, la priorité a été donnée aux programmes à court terme et aux investissements de rationalisation sous l'influence néfaste du libéralisme.

Le génie de Borowski et de son équipe ne s'est pas limité au concept NTR et à ses améliorations à double mode. Ils ont en effet imaginé une fusée nucléothermique à triple mode qui, en plus du moteur à double mode (propulsion et électricité), voit la propulsion de son moteur améliorée par l'utilisation d'oxygène en postcombustion supersonique dans la tuyère, ce qui permet d'augmenter la poussée et le débit massique. Grâce à ce moteur baptisé LANTR (Liquid Oxygen Augmented Nuclear Thermal Rocket), il est possible de réduire la masse et le volume des réservoirs pour les ergols, et donc augmenter la charge utile d'un facteur de 20 à 30 %. Selon Marsha Freeman, « *La souplesse introduite que l'on gagne grâce à l'oxygène liquide permet au même système de propulsion de base d'être utilisé pour toute une famille de véhicules et pour des missions très variées* ». Borowski pense qu'une navette équipée de deux moteurs LANTR pourrait augmenter de 80 % la charge utile délivrée à la surface de la Lune par rapport aux meilleurs moteurs de propulsion classique disponibles. Ceci nous amènerait à une fourchette de 75 à 80 T, chiffre à comparer aux 81 T du complexe LLTV étudié par la Nasa, surtout dans l'optique d'une stratégie visant à installer des centrales solaires spatiales construites sur l'orbite géos-



Concept de station « tête de pont » en orbite basse proposé par la société CAL.

tationnaire avec 95 % de matériaux lunaires. Ce LLTV serait lancé par un lanceur superlourd de la classe 350 T en orbite basse. Avec trois moteurs LANTR, il serait possible pour un vaisseau de transporter 120 à 130 T en surface lunaire à condition qu'il soit, avant son alunissage, ravitaillé en oxygène et hydrogène pour le système de rétrofusées. Pour ce faire, il existe d'autres solutions qui ont été imaginées par Krafft Ehrlicke : le DDM (Drop Delivery Method) et la navette LSL (Lunar Slide Lander, sur lesquelles nous reviendrons plus tard.

Dès que possible, il faudra utiliser des conteneurs d'hydrogène et d'oxygène liquides lunaires pour maximiser les masses d'alunissage. Il est évident que les vaisseaux équipés de LANTR n'utiliseront pas leurs moteurs nucléaires à partir de la surface terrestre mais seulement d'une orbite terrestre à une orbite lunaire. On pourrait toutefois envisager la surface lunaire à une étape ultérieure, dès que les technologies seront parfaitement maîtrisées. Avant cette étape, l'alunissage serait effectué par un cargo poussé par le vaisseau nucléaire, le vaisseau équipé de moteurs LANTR étant mis en orbite basse par un lanceur lourd classique.

Lors du dernier congrès IAF 2001 de Toulouse, l'intervention de l'ingénieur américain Salkeld, membre de nombreuses associations scientifiques, a montré qu'il existait encore d'autres solutions que celles proposées par Borowski. Salkeld, qui envisage aussi de faire appel dans une étape ultérieure aux propergols lunaires, a proposé quatre concepts possibles de navette géolunaire :

1. Geolunar Shuttle with Parallel Reusable Launcher. Une navette lancée en faisceau avec un véhicule récupérable qui assure la poussée jusqu'en orbite basse. Une fois celle-ci atteinte, la navette file vers l'orbite lunaire tandis que le véhicule récupérable revient à Terre pour subir des opérations d'entretien et de maintenance avant un nouveau lancement.

2. Geolunar Shuttle with Modified Nasa Shuttle Launcher. Il s'agit d'une navette classique, dont les moteurs SSME, les Solid Rocket Boosters et l'External Tank auront été modifiés, associée à une navette lunaire placée sur l'External Tank et lancée en même temps. Une fois arrivée au point de séparation, la navette prend son envol vers la Lune.

3. Geolunar Shuttle with Ballistic Single Stage to Orbit Heavy Launcher. La navette lunaire est

propulsée jusqu'en orbite basse par un gros lanceur lourd à un seul étage non récupérable. La navette emporte avec elle ses propergols pour le voyage lunaire après s'être séparée du lanceur lourd.

4. Geolunar Shuttle with Parallel Reusable Heavy Launcher. La navette lunaire est mise à poste par deux lanceurs lourds reliés l'un à l'autre. Notre navette est accrochée seulement à l'un de ces lanceurs lourds et, lorsqu'elle se détache pour son vol lunaire, les deux lanceurs reviennent se poser sur Terre grâce à un système d'ailes déployables et un système de parachutes.

Pour ces concepts proposés par Salkeld, il existe donc deux possibilités : soit placer la navette géolunaire en orbite terrestre basse où elle sera desservie par un tanker, « station-service » de l'espace qui lui fournira les propergols pour le reste de la mission géolunaire, avec une possibilité d'utiliser la Station spatiale internationale ISS ; soit la placer en orbite entièrement avec ses propergols pour continuer son vol ininterrompu vers la Lune.

Dans les quatre concepts, la masse au décollage est importante et les deux premières options impliquent un approvisionnement en propergols au niveau de l'orbite terrestre basse, tandis que les deux dernières impliquent un vol direct sans ravitaillement.

Borowski et Salkeld envisagent, à raison, la « grosse artillerie » car les futurs avions récupérables classiques censés réduire le coût du kilogramme en orbite d'un facteur de 5 à 6 ne joueront qu'un rôle d'appoint pour les programmes lunaires en servant, par exemple, de moyen de transport pour les astronautes vers la station tête de pont en orbite basse. Comme le montrent les travaux de Salkeld, von Braun, Korolev, Koelle, Shettler, Vajk et Engel, le concept de lanceur lourd, voire superlourd, est en effet incontournable pour la colonisation lunaire, et cela à cause du tonnage à emporter et à débarquer nécessaire pour déclencher un processus autocumulatif de croissance. Bref, il ne faudra pas lésiner sur les moyens et mieux vaut un processus massif de débarquement qu'une stratégie basée sur un saupoudrage peu efficace.

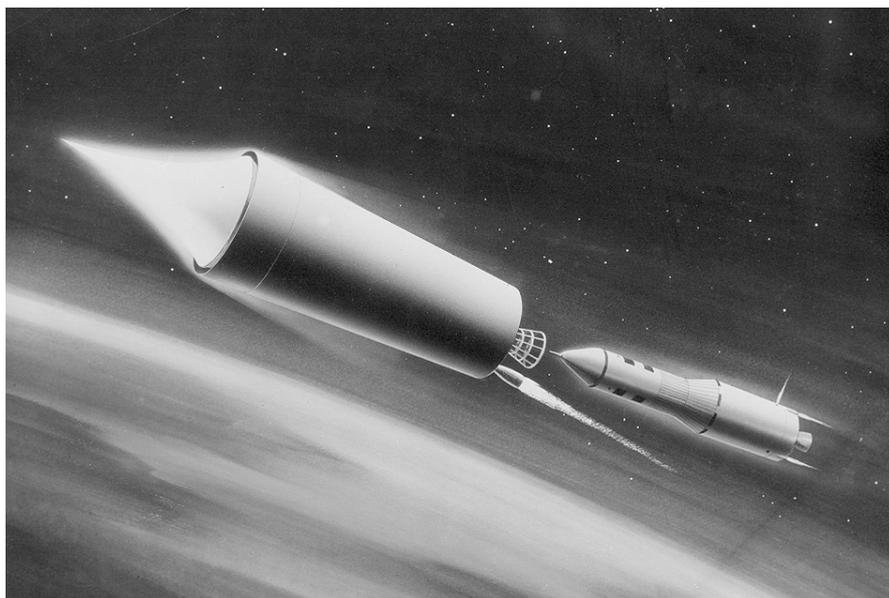
De nombreux projets ont été étudiés en ex-Union soviétique (fusée

N1, Super-Energya à 200 T en orbite basse) et davantage encore outre-Atlantique où les concepts se situent dans le prolongement de ce que nous savons faire. Aux Etats-Unis, les idées proviennent non seulement de la Nasa et des industriels (cas des projets de lanceurs de la Space Exploration Initiative visant des charges utiles de 150 à 250 T en orbite basse) mais aussi du département de la Défense (DOD) et de l'US Air Force. Les projets de construction de centrales solaires en orbite géostationnaire et le projet abandonné SDI (Strategic Defense Initiative) ont contribué au développement des études. Ainsi, pour la réalisation d'un programme pilote SPS et de sa base industrielle lunaire, il a été envisagé deux nouvelles configurations de véhicules dérivés de la navette avec la structure de l'External Tank remplacée par un cargo : le premier, Shuttle-C, aurait permis de placer 100 T en orbite basse tandis que le second, SD-HLV (Shuttle Derived Heavy Lift Vehicle), aurait eu une performance de 113 T sur la même orbite. D'autres projets ont aussi été étudiés en tant que dérivés de la navette spatiale : Star Eagle (130 T) et Magnum (150 T), qui constituent le maximum de ce que l'on peut faire en suivant cette filière.

Pour le projet pilote SPS, il a été envisagé un accélérateur électromagnétique de masse (Mass Driver Reaction Engine) utilisant comme masse de réaction les morceaux concassés de l'External Tank de la navette (avec possibilité de transporter 100 T vers une orbite lunaire) et un SSTO lourd (Single Stage to Orbit) pouvant mettre 227 T en orbite basse. Il existe pour ces SSTO lourds des projets encore plus ambitieux et la difficulté technologique principale vient ici de l'intégration des moteurs et des réservoirs. L'Allemand Heinz-Hermann Koelle (université technique de Berlin) pense qu'il est possible de développer des SSTO lourds pouvant transporter jusqu'à 350 T en orbite basse. Pour sa part, l'US Air Force a fait étudier toute une série de lanceurs ALS pouvant placer des charges utiles de 60 à 205 T en orbite basse. Fondamentalement différents des projets dérivés de la navette spatiale, les projets ALS n'ont pas survécu au coup d'arrêt du SDI. D'autres études ont défini le concept très ambitieux de HLLV

(Heavy Lift Launch Vehicle). Les deux principales variantes étudiées ont les caractéristiques suivantes : la première, d'une masse de départ de 4 000 T (contre 2 700 T à Saturn 5 et 1 900 T à la navette équipée de l'External Tank et des Solid Rocket Boosters), peut placer 150 T en orbite basse, tandis que la seconde, massive et très impressionnante, appelée « HLLV-Space Freighter », d'une masse de départ de 11 000 T et composée de l'addition de deux gros étages superposés, ailés et récupérables, pourrait placer jusqu'à 420 T en orbite basse !

Il convient de dire qu'aucun de ces projets n'a pour l'instant débouché sur un début de réalisation. En effet, les programmes lunaires ont été renvoyés aux calendes grecques et aucune avancée sérieuse en matière de recherche n'a été entreprise pour les centrales solaires SPS, au grand désespoir de son promoteur principal, Peter Glaser, qui a lancé l'idée en 1968. Or le besoin de recherche est grand pour la mise au point de ces lanceurs lourds et le développement de procédés industriels lunaires, même si nous disposons déjà d'un certain corpus de connaissances grâce aux travaux d'Ehrlicke, Narodny et Agnek, au programme MESA (poursuivi à la fin d'Apollo) et au programme de recherche technologique Pathfinder (qui n'a rien à voir avec la sonde martienne du même nom). Pour ce qui concerne les lanceurs lourds, l'Europe pourrait commencer avec un dérivé d'Ariane 5 équipé de boosters d'appoint, permettant de placer 50 à 60 T en orbite basse comme le recommandent depuis longtemps Roger Vignelles (Snecma moteurs), Johnson (Cnes) et Lieberherr (Esa). Avec un tel type de lanceur, l'Europe gagnerait suffisamment en crédibilité pour participer à un programme de lanceur superlourd et, de notre point de vue, la meilleure solution serait de se tourner vers la Russie (possibilité d'une Super-Energya à 250 T) car, aux Etats-Unis, les programmes de lanceurs lourds sont totalement contrôlés par le DOD et l'US Air Force, ce qui rend difficile une pleine coopération. Si la voie d'une coopération avec la Russie ne se concrétise pas, une initiative purement européenne pourrait être envisagée car on peut faire évoluer les lanceurs de type Ariane 5 en



Opération de ravitaillement en vol d'un vaisseau spatial à partir d'une citerne placée en orbite basse.

multipliant leurs composants-moteurs et par certains ajouts et modifications au niveau du corps central. Selon les ingénieurs Dominique Valentian et Alain Souchier, véritables « boîtes à idées » de la SEP devenue Snecma-Moteurs, il serait possible de cette manière de mettre au point des lanceurs capables d'emporter des charges utiles de 80 à 140 T sur l'orbite basse ; l'Europe aurait alors un programme lunaire autonome démarrant avec une base de quatre à cinq astronautes. Cette option a été présentée lors de la dernière réunion de la branche française de la Mars Society.

Certes, avec des lanceurs lourds, les investissements de départ seront plus élevés mais le développement industriel plus vite assuré. Cependant, une fois amorcé l'impératif processus autocumulatif de croissance, la Lune pourra peu à peu équilibrer ses importations par ses exportations. Il faudra compter au minimum 700 à 800 T de matériel sophistiqué (comprenant aussi les systèmes de survie et de recyclage) comme masse critique nécessaire à un véritable démarrage de l'industrialisation lunaire, matériel apporté par des missions successives vers la « tête de pont » en orbite basse. Pour faire face à cette nécessité, l'ISS, davantage orientée vers la recherche scientifique et technologique, nous paraît un peu petite même s'il serait possible de l'agrandir en lui amar-

rant des docks pour le transit du matériel lunaire. Il serait possible de prolonger la vie d'ISS par des reconfigurations permanentes pour qu'elle joue ce rôle de tête de pont mais l'idéal serait de pouvoir la remplacer par une station conçue à cet effet, dont le concept fort séduisant a été proposé par la société CAL (Canadian Astronautics Limited). Si l'on sait qu'il faut dix à douze ans pour développer un lanceur lourd, force est de constater que le temps nous est compté et que le problème de la finalité de la conquête spatiale devrait faire partie intégrante du débat politique. Une initiative comme Lunex pourrait contribuer à faire bouger les choses.

L'industrialisation de la Lune

Sur la Lune, il y aura démultiplication des moyens sur place grâce à des technologies spécifiquement opératoires dans cet environnement si particulier. Celui-ci, marqué par une longue alternance des jours et des nuits provoquant des écarts extrêmes de températures, favorise certains procédés industriels. De plus, on peut mettre à profit un vide extrême de 10^{-13} torr et la présence de grandes quantités de matériaux et minerais facilement exploitables.

Selon Ehrlicke, il est possible de fabriquer à partir de ceux-ci toute une liste non exhaustive de produits finis ou semi-finis : tôles ou poutrelles d'aluminium, de magnésium, de titane, de fer et d'alliages divers, des verres, de la laine de verre (pouvant être utilisée comme isolant dans les vaisseaux spatiaux), des céramiques, des matériaux réfractaires, des matériaux d'isolation thermique, électrique ou acoustique, des conducteurs, des revêtements (notamment des revêtements au sodium qui offrent une réflexion quasi parfaite, mais inutilisables sur Terre en raison des réactions de ce métal très réducteur avec l'eau et l'oxygène), des pellicules très fines de divers matériaux, des composants électroniques au silicium, des cellules solaires, des structures entières de métal ou de différents alliages pour les installations lunaires orbitales, des matériaux fibreux ou composés, des boucliers thermiques et matériaux d'isolation, des matériaux de protection antiradiations pour stations spatiales, des réservoirs de combustible spatial, des installations orbitales entières, des composants pour vaisseaux interplanétaires.

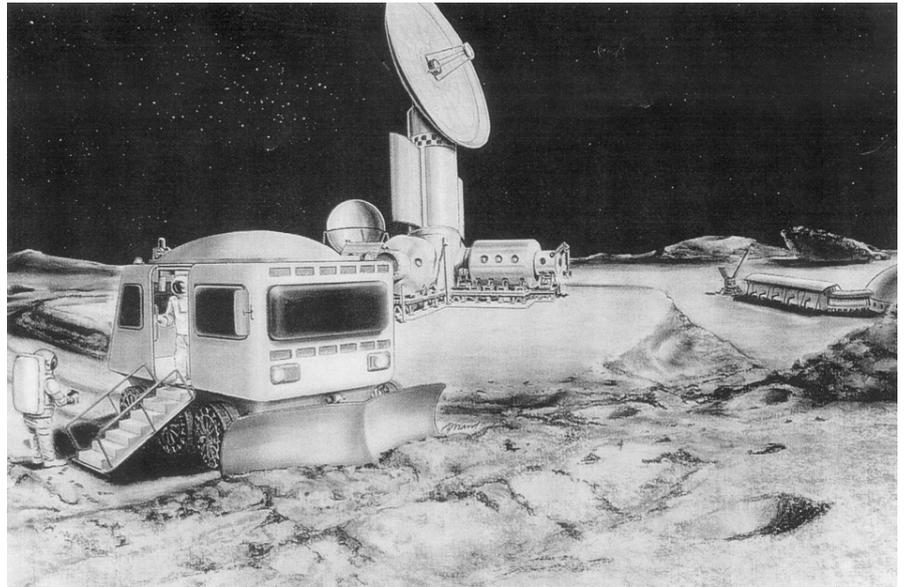
Outre les usines proprement lunaires, tous ces produits seraient utilisables pour des stations industrielles travaillant dans l'espace, des stations « têtes de pont » en orbite basse terrestre ou géostationnaire, des centrales solaires SPS en orbite géostationnaire, des chantiers de construction de vaisseaux destinés à la conquête de Mars ainsi que de vaisseaux spécialisés pour atteindre des astéroïdes et extraire leurs éléments. Au cours d'études effectuées au début des années 80, dans l'optique de construction de centrales SPS, Koelle avait conclu que pour équilibrer les importations terrestres, il fallait annuellement traiter 100 000 T de matériaux bruts à transformer sur la Lune en produits finis ou semi-finis.

Au cas où l'on viserait parallèlement un développement autonome, il serait possible de réduire d'un facteur significatif les chiffres cités par Koelle, car l'objectif de construire des centrales solaires dans l'espace n'est qu'une justification parmi d'autres du développement d'une importante industrie lunaire. Les prévisions de Koelle

doivent aussi être revues dans un sens moins contraignant, suite à la découverte par Clementine et Lunar Prospector de ces considérables quantités de glaces d'eau aux pôles lunaires, et qui changent considérablement les données de tous les scénarios envisagés auparavant. Ces pôles sont situés en permanence dans une zone de semi-obscurité où les rayons du Soleil n'arrivent qu'en incidence rasante et avec un effet marginal à cause du phénomène de libration de la Lune. Celui-ci se traduit par un léger balancement du globe lunaire autour de son axe et qui met les pôles à l'abri de plus de 99 % de la lumière solaire arrivant au niveau de notre satellite. Le facteur résiduel peut être considéré comme négligeable et n'est pas suffisant pour entraîner une fonte des glaces et, curieusement, un phénomène du même type caractérise aussi la planète Mercure qui orbite pourtant dans des zones plus proches du Soleil, à des distances comprises entre 45,9 et 69,7 millions de kilomètres.

Pour ce qui concerne l'impulsion donnée à l'activité lunaire, le volontarisme devra l'emporter sur le « libéralisme » : ce ne seront pas les marchés qui commanderont à l'industrie lunaire mais l'offre que celle-ci pourra apporter. De nouvelles activités industrielles naîtront, à l'image du rôle de catalyseur qu'ont joué les chemins de fer au XIX^e siècle. Il faudra orienter la stratégie vers un véritable schéma d'« autoroute Terre-Lune » sur lequel viendront se greffer de multiples activités.

Les masses critiques à emporter – 700 à 800 T – pour amorcer un processus d'industrialisation lunaire peuvent paraître au premier abord comme « excessives », quand on sait qu'il existe de nombreux scénarios avec une étape de démarrage de 40 T comprenant, par exemple, une usine d'extraction d'oxygène déployée en surface lunaire, un habitat prêt à monter, un système déployable de collecte et de fourniture d'énergie, un système de débarquement, des consommables, des combustibles et du matériel pour expérimentations. Un tel scénario caractérisait notamment la première phase de la Space Exploration Initiative. Néanmoins, d'autres scénarios, comme celui plus récent de Koelle, estiment la masse critique nécessaire entre 6 000 et 7 000 T et qui devrait être



Véhicule Ripper Excavator Loader apte à effectuer de gros travaux sur la Lune.

amenée sur la Lune en sept à huit ans. Cela correspond à peu près au vol de quatre-vingt cinq LLTV, puisque ce moyen de transport classique a de bonnes chances d'avoir une certaine prépondérance durant les premières phases de la colonisation, si l'on ne tient pas compte des études sur les lanceurs effectuées depuis ce concept.

Par la suite, une fois que la première étape d'établissement d'infrastructures industrielles lunaires aura été achevée, il sera possible de faire appel à d'autres solutions comme celles qui ont été imaginées par le pionnier Krafft Ehrlicke. L'importance du tonnage débarqué tient avant tout aux systèmes de production d'énergie, aux systèmes d'extraction et de séparation des minerais de leur gangue, aux véhicules qui permettront le déplacement des astronautes à la surface de la Lune, aux usines de traitement de l'oxygène et des minerais, aux systèmes de confection de produits semi-finis au cours des premières étapes. Pour un débarquement lunaire avant l'arrivée des équipages, le scénario retenu par Koelle implique, par exemple : deux mobiles d'habitation à monter pour vingt-quatre personnes, une centrale énergétique d'une capacité de 1 MWe, une centrale électrique d'une capacité de 100 kW conçue pour une durée de six mois, des provisions et des vivres pour vingt-quatre personnes et pour une durée

de six mois, un équipement minier, un équipement mobile et un module de recyclage.

Le plan de développement de la Lune en cinq étapes préconisé par Ehrlicke était encore plus ambitieux que celui de Koelle. Il constitue le plan le mieux conçu en ce qui concerne la colonisation de notre satellite avec une stratégie de débarquement massif de systèmes énergétiques et de traitement des minerais. Dès les premières phases de débarquement, on doit fabriquer le maximum de systèmes de production d'énergie sur place en commençant par des fours solaires. Le réacteur à haute température HTR est monté à partir de pièces venant de la Terre, mais les fours solaires de seconde génération et les fours atomiques à fission sont de fabrications locales. La première centrale à fusion lunaire (deutérium-tritium) est la marque d'une civilisation locale ayant atteint un haut niveau technologique et cette technique sera beaucoup plus facile à réaliser sur notre satellite grâce au vide naturel ambiant. Les premières centrales à fusion deutérium-hélium 3 viendront plus tard et contribueront, avec les centrales solaires SPS et LPS, à résoudre tous les problèmes d'énergie de la Terre.

Ce que nous avons vu du scénario envisagé par Koelle ne nous donne qu'une vue parcellaire de l'importante infrastructure et des types spé-

cifiques de véhicules qu'il faudra soit amener sur place soit construire sur la Lune. Trois types de véhicules ont été prévus pour les astronautes : un véhicule ouvert de surface pour deux astronautes et d'une autonomie de 10 km ; un véhicule pressurisé pour un équipage de quatre astronautes et d'une autonomie de 100 km, pour aller prospecter les régions proches des bases et voir s'il l'on trouve quelque chose d'intéressant sur le plan scientifique ou industriel ; un gros véhicule laboratoire mobile d'une autonomie de 500 km avec plusieurs astronautes, dans lequel on peut vivre en autarcie pendant deux mois et faire des analyses de minerais à partir de données fournies par des sondes spatiales. Ce dernier véhicule permettrait de repérer des sites colonisables pour de futures bases industrielles ou scientifiques et d'effectuer des travaux de géologie. Il ressemble beaucoup au fameux Molab envisagé pour un programme post-Apollo et dont trois exemplaires ont été effectivement construits et essayés sous l'égide de la Nasa.

La plupart des scénarios sérieux et cohérents envisagent aussi des systèmes de grues mobiles, dont l'assiette devra être beaucoup plus basse que sur Terre à cause de la faible gravité lunaire. Il faut prévoir des véhicules chargeurs ressemblant à un camion sur chenilles, des scrapers pour effectuer de gros travaux de chargement, creuser des tranchées, déplacer des roches ou jouer le rôle de bulldozer. Ces projets sont en général américains, parfois allemands (Koelle) ou français (Jacques Collet, directeur à l'Esa des Programmes à long terme, et Michel Lyonnet du Moutier, directeur à Eiffage), et de plus en plus souvent japonais car le Japon a pris une certaine avance dans le domaine de la robotique et que cette puissance spatiale a des visées sur la Lune. Etant donné qu'il a été un certain temps question d'un programme post-Apollo, les Américains ont déposé des brevets sur toute une artillerie d'engins capables d'effectuer des opérations de travaux sur la Lune, qu'il s'agisse de fouiller la régolite lunaire, de déplacer ou de s'emparer de roches à des fins d'extraction de minerais. Le Bucket Wheel Excavator, relié à un tapis roulant, est une sorte de scraper raclant la surface lunaire et qui sera amené sur la Lune en pièces

détachées et monté sur notre satellite. Pour concasser les roches, il est prévu un Ripper Excavator Loader qui, outre son rôle pour l'industrie, pourra être aussi utilisé pour creuser le sol lunaire à plusieurs mètres de profondeur afin d'installer des bases habitées de seconde génération. Le MLM (Mobile Lunar Miner) est le plus intéressant de tous les engins car il est efficace aussi bien pour de gros éléments que de très petits : il est doté d'une machine capable de faire des excavations à 3 m de profondeur et d'un système collecteur de gaz et de particules de 5μ . Il servira à récupérer l'hélium 3 éjecté dans l'espace par le Soleil et piégé depuis des milliards d'années par les roches lunaires. Monté et fabriqué sur la Lune, il fonctionne dans son lent déplacement grâce à l'électricité fournie par un four solaire. Le MLM sera équipé d'un tamis pour recueillir les éléments industriellement intéressants en éjectant ce qui ne l'est pas sur la régolite lunaire ; on espère par ce moyen recueillir entre autres des pépites de fer pur. Selon les spécialistes, le MLM pourrait collecter environ 66 kg d'hélium 3 en fonctionnant en continu pendant un an. Les calculs montrent que si la totalité de la fourniture en électricité des Etats-Unis était assurée par le cycle deutérium-hélium 3, il suffirait de 25 T d'hélium 3 pour alimenter les centrales correspondantes (1 T d'hélium 3 peut théoriquement fournir 10 000 MWe).

Gerald Kulcinski (professeur d'ingénierie et ancien directeur du Fusion Technology Institute) pense, pour sa part, que 100 T d'hélium 3 seraient suffisantes pour satisfaire les besoins de la Terre en énergie pendant un an. Ces chiffres nous montrent l'ampleur du défi à relever pour des machines de type MLM dont il faudra une importante flottille sur la Lune. Les groupes de pression écologistes, particulièrement puissants aux Etats-Unis au point d'avoir cherché à faire capoter plusieurs missions spatiales, se sont élevés contre les idées de Kulcinski sous le prétexte que l'extraction de l'hélium 3 allait créer de nombreuses excavations et contribuer à une pollution de la Lune. Au sein même de la Société des explorateurs lunaires, certains estiment que l'exploitation de l'hélium 3 ne sera possible qu'une fois atteinte une maîtrise technologi-

que suffisante. Kulcinski a répondu que ces excavations peuvent être facilement remblayées après usage et que certaines peuvent être transformées en docks pour l'oxygène, l'hydrogène, l'azote et le méthane, qui seront des biens très précieux pour les futures colonies humaines. Parmi les étranges machines qui pourraient au cours de ce siècle être débarquées sur le sol lunaire, notons aussi le Haulage Vehicle équipé soit de chenilles soit de grandes roues. Ce véhicule servirait pour transporter des matériaux de construction – fer, titane et aluminium – et des conteneurs pouvant stocker des éléments comme l'oxygène et l'hydrogène liquéfiés dans les usines de traitement. Il est bien évident qu'il ne sera pas possible d'acheminer l'indispensable infrastructure énergétique et tous les éléments d'équipement que nous venons de décrire dans le cadre d'une stratégie minimaliste qui, en mettant moins de moyens au service de la colonisation lunaire, finirait par coûter plus cher du fait que les objectifs n'auraient été qu'à moitié atteints. L'utilisation de lanceurs lourds, dans le cadre d'une stratégie massive, nous apparaît ici clairement justifiée.

Le problème de l'accès à la Lune

Il est toutefois une question que notre enthousiasme pro-lunaire ne doit pas nous amener à négliger : s'il est relativement facile d'échapper à la faible gravité lunaire, l'accès à la surface de notre satellite n'est pas très aisé dès lors qu'il s'agit de grandes masses d'emport car la Lune ne possède pas d'atmosphère, ce qui interdit les techniques d'aérofreinage utilisables pour une rentrée en atmosphère terrestre ou martienne. Dix à douze LLTV et huit vaisseaux équipés d'un système « double-Lantr » pourraient suffire pour amener sur la Lune la fameuse masse critique nécessaire à un processus d'industrialisation massif mais, dans les étapes ultérieures, il faudra faire appel à d'autres solutions dont certaines ont été imaginées par le génial Krafft Ehrlicke. Selon lui, des concepts comme le LLTV et le LF-CRT (Conventional

↳ Retrothrust Landing, à capacité d'alunissage de 50 à 60 T) devaient être abandonnés une fois les premières étapes d'industrialisation lunaire enclenchées. Ehricke est décédé en 1984 et, en conséquence, n'a pas pu tenir compte dans sa stratégie des concepts nucléaires de Borowski et de ceux de navettes géolunaires de Salkeld, dont l'importance est cruciale pour les nouvelles stratégies lunaires. Toutefois, le grand pionnier d'origine allemande a toujours eu comme objectif de faciliter l'accès à la Lune à un coût acceptable et de préserver son fragile environnement. Pour cela, il inventa une nouvelle discipline baptisée « harenodynamique » devant déterminer l'étude et la mise au point de nouveaux types vaisseaux. Pour ces vaisseaux, Ehricke estimait qu'il fallait prendre en ligne de compte les caractéristiques particulières de l'environnement lunaire : la présence du vide, une pesanteur six fois inférieure à la Terre et « l'existence de vastes plaines couvertes de surfaces sablonneuses et ressemblant à de la neige ». Lors du congrès de l'IAF (Fédération internationale d'astronautique) qui se déroula en 1982 à Paris, Ehricke fit sensation en présentant deux concepts d'alunissage audacieux : à savoir le DDM (Drop Delivery Method), doté d'un système de suspenseurs et capable d'amener à la surface lunaire 100 T, et la SLT (Slide Landing Technique) consistant en une incroyable navette LSL (Lunar Slide Lander) dite encore « navette à alunissage glissé », capable d'amener à la surface de la Lune des charges utiles de 150 à 200 T. La navette LSL avait déjà fait l'objet d'une présentation par Ehricke en 1959, lors d'une réunion en Autriche de la Hermann Oberth Gesellschaft. La navette LSL se caractérise avant tout par une maximisation de la charge utile pour l'alunissage et une minimisation de la consommation de carburant. Pour cette phase toujours critique qu'est l'alunissage, la navette LSL effectue d'abord une opération pour se placer en orbite circumlunaire très basse en s'approchant tangentiellement à la surface lunaire en huit phases successives. L'engin est basé sur une combinaison de quatre rétrofusées pour les premières phases, puis le relais est pris par des sortes d'immenses skis au moment où la navette touche le

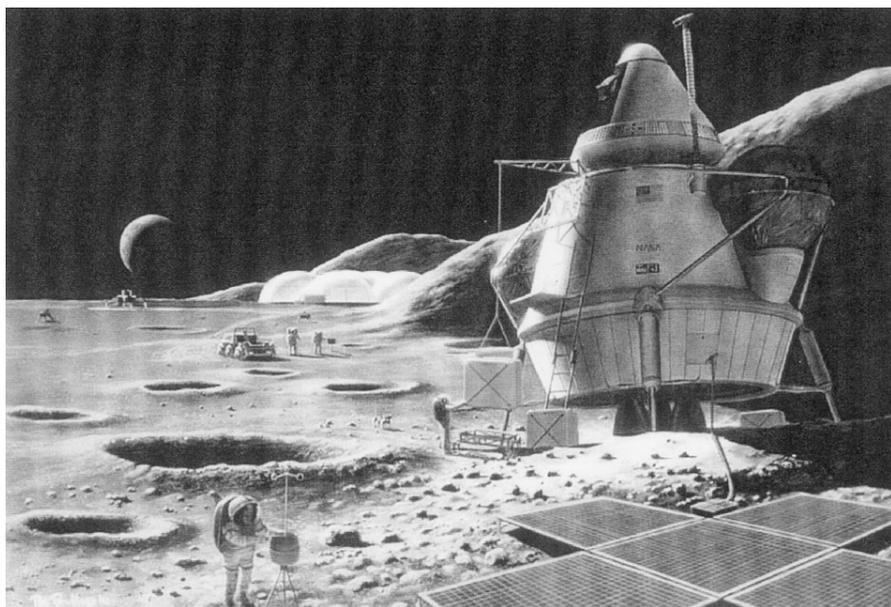
sol lunaire à une vitesse de 5 500 km/h. Une seule rétrofusée reste en fonctionnement minimum jusqu'à l'arrêt de la navette qui transmet son énergie cinétique à l'océan de poussière lunaire sur une piste de 50 à 60 km de long. Ehricke envisageait d'utiliser un gigantesque véhicule fonctionnant à l'énergie nucléaire pour préparer la piste en vingt-quatre heures, en la débarrassant de tout corps susceptible d'endommager la surface de frottement du véhicule. Comme, selon Ehricke, « *tout peut être récupéré et recyclé* », celui-ci avait imaginé une astuce pour sa navette lors de la phase de décollage : capturer les produits de combustion afin de les recycler afin de réduire la dépendance vis-à-vis des fournitures terrestres. Dans ce cas-là, les gaz d'échappement des moteurs fonctionnant à l'hydrogène et à l'oxygène liquides sont constitués de vapeur d'eau surchauffée qui, refroidie à l'oxygène lunaire, fournit de l'eau. Celle-ci peut être électrolysée, ce qui permet de récupérer le combustible et de le réutiliser continuellement avec un niveau de perte très bas. Ehricke, qui était aussi soucieux de préserver l'environnement de la Lune, estimait que son système de navette LSL était moins dévastateur qu'un système classique à descente verticale et affirmait que certaines régions de la surface lunaire (les mers, par exemple) pouvaient supporter sans conséquence un alunissage à haute vitesse. Un tel système LSL n'apparaîtrait qu'au bout de dix ans de colonisation lunaire et assurerait une navette permanente entre les différentes orbites terrestres et la surface lunaire à un coût relativement réduit.

Le problème de l'exploitation de l'eau lunaire

Comme nous l'avons vu, la présence massive d'eau sous forme de glaces aux pôles lunaires constitue un facteur qui améliore de façon radicale les conditions pour coloniser et industrialiser la Lune. En effet, en diminuant progressivement le processus d'importation de l'hydrogène à partir de la Terre, elle change totalement les données des

voyages Terre-Lune et Lune-Terre. Il ne faut pas toutefois sous-estimer la stratégie et les moyens adéquats à mettre en œuvre pour faire fondre les glaces, puis récupérer et transporter l'eau ainsi obtenue. Un bon exemple nous est donné par le fait suivant : dans certains endroits des régions des pôles lunaires, les glaces sont situées au fond de cratères qui sont difficiles d'accès. C'est le cas du cratère géant du bassin d'Aitken situé au pôle Sud, dont la profondeur atteint 8 km et dont les remparts s'élèvent à 3 km par rapport à la surface lunaire. Les cartographies effectuées par Clementine et Lunar Prospector (basée sur la détection de neutrons d'hydrogène) montrent qu'il y a heureusement certains cratères et surfaces plus accessibles. Les données disponibles devraient être complétées par les nombreuses sondes qui effectueront des études sur la Lune avant l'arrivée de l'homme. Avec ces réserves d'eau, nous disposons d'un réservoir d'une richesse insoupçonnée mais l'exploitation rentable de celle-ci implique de notre part un intense effort technologique et des solutions audacieuses.

Pour son transport des pôles vers les bases industrielles, Koelle a pensé à des pipe-lines permettant soit la circulation de l'eau soit de l'oxygène et de l'hydrogène liquéfiés. Néanmoins, il semble qu'au début, il faille faire appel à d'autres solutions. En effet, pour que l'eau coule sous pression et ne vienne pas se coller contre les parois à cause de l'absence d'atmosphère, il est nécessaire de pressuriser un pipe-line sur plusieurs centaines de kilomètres. La solution pipe-line pourra devenir attrayante à partir du moment où le niveau de développement lunaire aurait atteint un certain niveau et que la production d'air aurait été suffisante pour être injectée dans plusieurs centaines de kilomètres de tuyaux. Que l'on effectue l'opération aussi bien au niveau des pôles que dans les bases lunaires (ce qui présuppose un transport), cela demandera certainement de fortes sources d'énergie. Si l'on effectue l'opération d'extraction de l'eau du compost lunaire aux pôles dans des enceintes pressurisées, il faudra tenir compte du fait que les fours solaires sont inopérants à ces latitudes. Au lieu de ces fours solaires, on pourrait utiliser des



Base avancée d'extraction de glace d'eau près des pôles lunaires.

réacteurs à haute température, des moteurs nucléaires dérivés de ceux des sous-marins, comme l'a proposé Frank Malina (membre fondateur de l'International Academy of Astronautics), ou bien encore des systèmes de lasers très puissants dérivés des études SDI. Doit-on effectuer l'opération sur place, aux pôles, ou bien sur les bases lunaires en y ayant préalablement amené les blocs de compost ?

Certains ont proposé l'idée de catapultes rotatives ou d'accélérateurs électromagnétiques de masse pour transférer ces blocs où ils seraient traités, en effectuant la séparation de la glace d'eau du compost lunaire sur les bases lunaires, dans des enceintes pressurisées seules capables de garder ainsi l'eau à l'état liquide ; cette eau serait conservée, avant emploi, dans des enceintes également pressurisées. On enverrait des composts par des méthodes balistiques de la base d'extraction située dans la région des pôles vers les usines de traitement qui seraient idéalement placées au centre d'un cratère. Cette solution ne nous paraît pas adéquate, même si ces deux techniques – catapulte rotative ou accélérateur électromagnétique – sont appelées à un avenir brillant dans le domaine des techniques spatiales. En effet, si ces méthodes seraient relativement efficaces pour éjecter vers une orbite lunaire du matériel fabriqué sur la Lune en direction d'une station ou

d'une barge spatiale, ou bien encore pour transporter des minerais d'une base d'extraction à une usine de traitement située à quelques kilomètres, le problème est plus compliqué dès lors qu'il faut parcourir plusieurs centaines de kilomètres et que l'énergie cinétique des composts introduit un facteur de complexité. La première difficulté est celle de viser juste en donnant à nos accélérateurs l'énergie et la directivité adéquates. On peut sans doute résoudre ce problème mais pas facilement, surtout lors des premières étapes.

Un autre problème est de garder intacts les composts au moment de leur impact : en dépit de la faible gravité lunaire, l'énergie cinétique résultant d'un trajet de plusieurs centaines de kilomètres à grande vitesse reste importante et il existe un risque de déperdition élevée des glaces au moment de l'impact. Une solution serait de réceptionner les composts dans des filets disposés sur de larges étendues mais cela ne serait possible qu'après avoir totalement résolu les problèmes de directivité de nos curieux engins. Une structure de mailles en fil de fer serait la meilleure solution grâce à la disponibilité en fer du milieu lunaire même si l'on ne peut pas évaluer la résistance des filets et donc estimer son taux de remplacement.

Bien avant cela, la pression du besoin en eau se fera sentir sur les colonies lunaires qui devront trou-

ver rapidement une solution pour se passer des importations terrestres. La première étape, qui suppose comme préalable le développement d'une forte industrie locale dans le domaine du traitement du fer et du titane, pourrait consister à envoyer des convois de véhicules pressurisés à traction électrique amenant avec eux une enceinte, également pressurisée, où serait effectuée l'opération de fonte des glaces. Les quantités recueillies ne seraient pas négligeables mais, à ce stade, il faudrait encore effectuer d'importantes opérations de recyclage au niveau des colonies. La deuxième étape, qui suppose comme préalable le développement d'une forte industrie locale dans le domaine du traitement du fer et du titane, pourrait consister en une ligne de chemin de fer à très grand écartement où circuleraient des trains à traction électrique composés de plusieurs dizaines de wagons-citernes pressurisés, et effectuant un va-et-vient incessant entre les colonies et les usines d'extraction d'eau situées près des pôles. La pose des rails se ferait à l'aide d'un véhicule de type Molab suivi de plusieurs véhicules électriques, simples dans leur conception et montés sur la Lune à partir d'éléments terrestres, qui transporterait les rails. Le grand écartement est indispensable, même sur le sol lunaire plus stable que celui de la Terre, à cause de la faible gravité. Dans ce milieu, l'assise doit être plus grande que sur Terre, même si les phénomènes aérodynamiques ne jouent pas à cause de l'absence d'atmosphère. De plus, la répartition des masses sur les wagons-citernes doit impérativement se faire en faveur de la partie basse. Les convois transportant l'eau lunaire fonctionneraient avec des propulseurs électriques et n'iraient guère plus vite que les tortillards tractés par des machines à vapeur que nous avons connus sur Terre à la fin du XIX^e siècle ; toute vitesse excessive, en raison de la faible gravité, tendrait à faire dérailler le convoi. Une telle ligne pourrait être construite en cinq ans et amortie en dix ans.

A ce stade, la colonisation lunaire pourrait comprendre plusieurs colonies florissantes dont le point commun serait d'obéir au fameux Treaty Moon de 1979 qui n'a toujours pas été signé par les Etats-Unis !