



**30 ans après**  
**Retourmons**  
**sur la Lune**

Il y a trente ans, le 20 juillet 1969, le monde célébrait la plus grande prouesse de ce siècle, l'arrivée de l'homme sur la Lune. Le succès du programme Apollo reposait sur les travaux, au cours des quarante années ayant précédé l'événement, de l'équipe dirigée par Wernher von Braun qui immigra aux Etats-Unis après la Deuxième Guerre mondiale. Il fallut aussi le génie du directeur de l'agence spatiale James Webb et des autres membres de la direction pour coordonner les vastes travaux effectués dans les six laboratoires de la Nasa et dans des centaines d'entreprises par des milliers de scientifiques, ingénieurs et techniciens.

## Une autre logique économique

Le programme Apollo aurait été impossible sans l'engagement du président John Kennedy pour une politique économique fondée sur la mobilisation en profondeur des ressources humaines et technologiques de la nation. Il était persuadé que les forces vives du pays se rallieraient à un grand et noble dessein national dès lors que l'impulsion venait d'en haut.

Trois mois après son accession à la présidence, en janvier 1961, et un mois avant de lancer à la Nasa le défi de « mettre un homme sur la Lune et



### MARSHA FREEMAN

*le ramener sain et sauf sur la Terre, d'ici une décennie* », le président Kennedy avait proposé un crédit d'impôt (avoir fiscal) pour l'investissement afin d'encourager les industries à augmenter leur capital. Selon Walter Heller, président du Comité présidentiel des conseillers économiques, le gouvernement ne voulait plus limiter son action à des mesures correctives ou défensives, mais donner une impulsion positive à la croissance.

Dans un discours au Congrès sur la politique fiscale, Kennedy soulignait que « *de nouvelles dépenses pour les usines et les biens d'équipement se traduiront immédiatement par la création de nouveaux emplois dans le bâtiment, l'industrie du bois, la sidérurgie, les machines et d'autres industries de biens d'équipement. [...] Les salaires de ces travailleurs contribueront à créer encore d'autres emplois dans le secteur des biens de consommation et les industries*

*de services.* »

En vertu du crédit d'impôt pour l'investissement, une entreprise, si elle avait dépensé dans de nouvelles installations et équipements plus que sa provision pour amortissement, pouvait déduire de ses impôts 15% de cet investissement. Pour s'assurer que les investissements soient orientés vers des biens

durables de base, le crédit ne s'appliquait qu'aux actifs ayant une durée de six ans ou plus.

Une étude menée un an plus tard sur les investissements projetés confirma que « *les entrepreneurs ont fortement revu à la hausse leurs dépenses capitalistiques. Les 40 milliards de dollars qu'ils comptent investir cette année dans de nouvelles installations et équipements établiront un nouveau record* ». Ce crédit d'impôt fut sans aucun doute un important facteur de la croissance extraordinaire de l'économie américaine au cours des années 60 : les revenus par tête augmentèrent de 20%, les profits commerciaux doublèrent et sept millions de nouveaux emplois furent créés.

Le président Kennedy reconnut aussi l'urgence de moderniser d'autres secteurs de l'économie. Dans un discours devant le Congrès, début 1961, il mit l'accent sur l'aménagement des ressources en eau et le développement de l'énergie nucléaire, sans négliger toutefois de nouvelles allocations à l'éducation et aux services de santé. Sa vision était bien éloignée de ce

que nous proposent aujourd'hui les ultralibéraux qui n'ont à la bouche que les mots « réduction des coûts » et « dégraissage ». D'autant plus que le jeune Président américain proposait de partager les bienfaits de la science et la technologie avec les pays du tiers monde, ce qui est aux antipodes des intentions de nos dirigeants actuels.

## Un grand dessein

Pour réaliser ces projets, il fallait un « grand dessein » capable de mobiliser l'imagination et la passion des Américains. La dynamique de base pour les investissements dans l'infrastructure, l'industrie et les ressources humaines était fournie par le programme Apollo, grâce auquel l'économie physique, l'éducation et la science firent des bonds en avant, propulsées par l'optimisme.

C'est le 25 mai 1961 que le président Kennedy présenta au Congrès son programme pour mettre un homme sur la Lune. Certes, la concurrence avec l'Union soviétique joua un rôle dans cette décision, mais pas dans le sens négatif où ses détracteurs nous le présentent aujourd'hui. En ce 25 mai, donc, Kennedy fit allusion au premier vol spatial humain effectué moins d'un mois auparavant par Youri Gagarine, décrivant « *l'impact de cette aventure sur l'esprit des hommes partout dans le monde* ».

Il précisa que la réalisation de cet objectif exigerait « *un grand engagement national en termes de personnel scientifique et technique, de matériel et d'installations, y compris la possibilité qu'ils soient détournés d'autres activités importantes. [...] Cela implique un degré de dévouement, d'organisation et de discipline qui n'a pas toujours caractérisé nos efforts de recherche et développement.* »

Ce projet eut un effet immédiat sur le monde des affaires, comme le montre un livre publié en 1962 par les éditeurs du magazine *Fortune*. « *L'aventure spatiale sera probablement plus extraordinaire et durable que même ses défenseurs les plus passionnés ne le pensent. Elle aura un impact puissant et polyvalent sur l'économie de la nation.* » Ainsi, même les analystes de Wall Street se montraient confiants à cette époque où l'économie physique réelle prévalait encore sur la finance.

Alors qu'à l'annonce du pro-



Le président Kennedy en compagnie de l'astronaute Walter Schirra au Complexe 14, lors d'une visite en janvier 1962 de cap Canaveral.

gramme lunaire, moins de la moitié de la population américaine sondée le soutenait, le Président des Etats-Unis expliqua inlassablement au public l'importance et les bienfaits du projet, le tenant au courant des progrès effectués.

Lors d'un discours prononcé en septembre 1962 à l'université Rice, reconnaissant que l'initiative était coûteuse, Kennedy précisa que « *l'effort spatial, qui commence à peine, a déjà mené à la création de nombreuses sociétés nouvelles et de dizaines de milliers de nouveaux emplois. Les industries spatiales et afférentes génèrent de nouvelles demandes en investissements et en personnel qualifié.* »

Outre les nombreux ouvrages, brochures et films documentaires largement diffusés dans les écoles au cours de la première moitié des années 60, une avalanche de livres à succès reflétait l'optimisme de l'époque. Tom Alexander, journaliste scientifique de *Life*, écrivait en 1964 qu'« *un nouveau type d'individu trouve une place [...] dans l'ère spatiale. C'est l'homme qui, techniquement parlant, semble prêt à penser à l'avenir sur une période de dix ans ou plus. Il y a quelques années, on traitait ces gens-là de fous.* »

De même, en septembre 1969, l'astronaute Michael Collins se montra fort éloquent devant le Congrès en évoquant l'esprit de découverte qui animait l'équipe de la Nasa: « *Nous*

*ne pouvons pas lancer nos sondes planétaires à partir d'une rampe de pauvreté, de discrimination et de troubles. Mais nous ne pouvons pas non plus attendre que chaque problème terrestre soit réglé. [...]*

« *Nous avons amené à la Lune la richesse de cette nation, la vision de ses dirigeants politiques, l'intelligence de ses scientifiques, le dévouement de ses ingénieurs, le travail soigné de ses ouvriers et le soutien enthousiaste de sa population. Nous avons ramené des pierres. Et je pense que c'est un échange équitable. Car tout comme la pierre de Rosette révéla les langages de l'ancienne Egypte, ces pierres pourront peut-être dévoiler le mystère de l'origine de la Lune, de notre Terre et même de notre système solaire.* »

Lorsque, le 20 juillet 1969, Neil Armstrong posa le pied sur la Lune, réalisant un rêve remontant aux civilisations les plus reculées, l'événement fut suivi en direct par quelque 500 millions de téléspectateurs et des millions d'auditeurs. Ce premier pas fut possible grâce au *leadership* d'un Président qui avait compris qu'il fallait rallier la population autour d'un grand projet scientifique, posant un formidable défi aux capacités mentales de ses concitoyens et du monde entier.

C'est devant une tâche de cette ampleur que nous nous trouvons aujourd'hui.

n



# Propulsion nucléaire : aller sur la Lune en 24 heures

**P**our atteindre l'objectif de mettre un homme sur la Lune avant la fin des années 60, la National Aeronautics and Space Administration (Nasa) poussa aux limites la technologie de propulsion qui était en cours de développement avant la Deuxième Guerre mondiale et mit au point l'énorme fusée Saturne V utilisant la combustion chimique comme mode de propulsion.

Aujourd'hui, la Station spatiale internationale (ISS) est en construction en orbite basse, fournissant bientôt à l'humanité un moyen de recherche et de développement à usages multiples. Elle constituera, au niveau matériel comme dans le domaine scientifique, le point de départ vers des horizons plus lointains. Avec la très prochaine mise en service de l'ISS, les planificateurs de l'espace élaborent aujourd'hui ce que les programmes d'exploration spatiale devraient être.

Certains de ces planificateurs, succombant à la démoralisation des

## MARSHA FREEMAN

trenten dernières années depuis la fin du programme Apollo, préfèrent regarder en arrière plutôt que de se projeter dans l'avenir. L'un d'entre eux, le Dr Robert Zubrin, fondateur de la Mars Society, est convaincu qu'il n'y aura pas de retour à l'organisation centrale de missions spatiales visionnaires telles qu'elles existaient dans les années 60. Affirmant que le peuple américain « en a assez » de la Lune (« on a déjà été là, on a déjà fait cela »), Zubrin a proposé une série d'astuces pour séduire les membres du Congrès grâce à une approche « plus sexy » d'un vol habité vers Mars, dont le principal argument de vente tiendrait dans la formule suivante : « vite et pas cher ».

Une telle approche suppose la récupération du matériel de l'ère Apollo. Même si l'on n'est pas sûr que tous les éléments sont encore disponibles, Zubrin est persuadé que la vieille Sa-

turne V pourrait être ressuscitée. Mis à part le fait qu'aujourd'hui ces fusées n'existent que dans les musées et que l'on estime que cela prendrait dix ans et 10 milliards de dollars pour les remettre en état de marche, le président Kennedy, déjà en 1961, ne croyait pas que les systèmes à propulsion chimique seraient la technologie d'avenir pour le programme spatial américain. Parlant le 25 mai 1961, dans son *Message spécial au Congrès sur les besoins nationaux urgents*, Kennedy traça les grandes lignes de son programme lunaire et demanda « 23 millions de dollars supplémentaires, en même temps que les 7 millions déjà disponibles, pour accélérer le développement du programme de moteur nucléaire Rover ». Le Président déclara : « Cela nous donne l'espoir qu'un jour on puisse disposer des moyens nécessaires à une exploration spatiale plus passionnante et plus ambitieuse, peut-être au-delà de la Lune, peut-être au fin fond du système solaire lui-même. »

Entre 1959 et 1972, les Etats-Unis ont investi l'équivalent de 10 mil-

liards de dollars d'aujourd'hui pour concevoir, développer et tester les premiers réacteurs nucléaires spatiaux. Quoique couronné de succès, le programme de propulsion nucléaire spatiale mené par la Nasa et l'Atomic Energy Commission fut arrêté début 1973. En effet, un changement d'orientation des politiques économiques conduisit à des coupes claires dans le budget de la Nasa et la colonisation de la Lune comme le vol habité vers Mars ne furent plus à l'ordre du jour.

Aujourd'hui, cependant, le temps est proche où nous devrions retourner sur la Lune – mais ce sera avec d'autres moyens que ceux utilisés il y a trente ans. L'objectif devrait être de repousser les frontières, créant des technologies adéquates non seulement pour voyager vers la Lune, mais également pour y vivre et y travailler. Ce n'est qu'ainsi que les bases pour une mission habitée vers Mars seront posées.

### Pourquoi le nucléaire ?

Passer de l'énergie chimique à la puissance nucléaire constituera un saut qualitatif dans la propulsion spatiale, similaire aux progrès qu'ont représentés les passages de la puissance pédestre et du transport par eau à la puissance du cheval, au moteur à combustion interne et, finalement, à la puissance du turboréacteur et à la propulsion électrique : nous serons capables d'aller plus loin, plus vite et de transporter plus de fret.

Le voyage dans l'espace, ou ailleurs, demande de grandes quantités d'énergie. Les fusées d'aujourd'hui utilisent l'énergie libérée par la combustion de carburants chimiques pour fournir la poussée nécessaire à atteindre l'espace. Cependant, la densité d'énergie obtenue à partir d'une réaction de fission ou de fusion nucléaire est supérieure de plusieurs ordres de grandeur. Le Dr Stanley Borowski, du Lewis Research Center de la Nasa (rebaptisé récemment « John Glenn Research Center », en l'honneur de l'ancien sénateur et astronaute), fait remarquer qu'une quantité équivalente d'énergie pourrait être extraite de 13 t d'hydrogène et d'oxygène liquides, de 20 g d'uranium, de 0,5 g de deutérium (comme combustible pour la fusion) et de 0,02 g de parts égales d'hydrogène et d'antihydrogène (voir

## Paramètres de la propulsion spatiale

Pour connaître le rendement d'un système de propulsion spatiale, il ne suffit pas de prendre seulement l'énergie brute produite. L'un des paramètres clés est l'*impulsion spécifique* qui fournit une mesure de l'efficacité de la poussée produite pour une quantité donnée de propergols consommés par seconde. L'impulsion spécifique dépend de la vitesse d'éjection des gaz. L'impulsion spécifique des moteurs à hydrogène et oxygène liquides de la navette spatiale est d'environ 450 s. Des systèmes utilisant une puissance électrique embarquée, l'énergie solaire, ou un faisceau laser de puissance pour la propulsion peuvent atteindre une impulsion spécifique entre 1 000 et 10 000 s.

Toutefois, une grande impulsion spécifique n'est pas le seul critère d'un système de propulsion. La poussée qui est fournie par n'importe quel système de propulsion est le produit du débit des propergols et de la vitesse d'éjection des gaz. Dans les moteurs principaux de l'orbiteur, une poussée importante est obtenue en disposant d'une grande quantité de propergols (débit massique élevé) qui est expulsée, à travers une réaction chimique, à la vitesse relativement faible d'environ 4 500 m/s.

En utilisant la fission nucléaire, il est possible d'atteindre une poussée élevée en expulsant une quantité relativement petite de masse à une vitesse très élevée pouvant aller jusqu'à 10 000 m/s.

En plus de l'impulsion spécifique (le rendement du carburant) et de la poussée (la puissance totale de « poussée » du système), le moteur devrait être conçu afin que le *rapport poussée-poids* permette des niveaux d'accélération appropriés pour les différentes missions. Ce rapport donne les capacités d'accélération du véhicule.

La colonisation de l'espace nécessitant des familles de nouveaux vaisseaux, les systèmes de propulsion pour les vols habités seront optimisés pour transporter les gens aussi rapidement que possible, ce qui exige un compromis avec la quantité de fret qui sera emportée. Par contre, les vaisseaux cargo, qui peuvent voyager plus lentement, devront être optimisés pour embarquer autant de fret que possible.

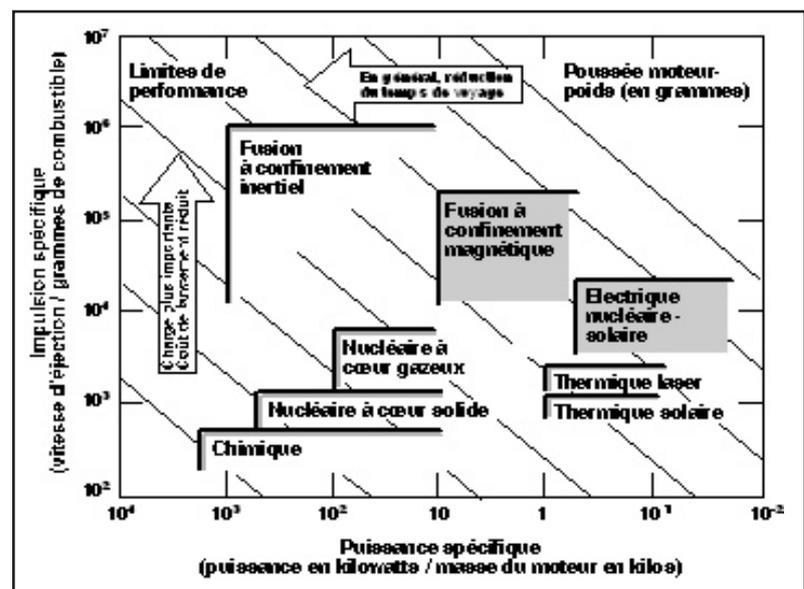


Figure 1. Cette figure compare les paramètres d'impulsion spécifique et de puissance de diverses technologies, la supériorité des performances du réacteur nucléothermique à cœur solide et accessible, à court terme apparaît clairement par rapport à la propulsion chimique.

encadré et figure 1).

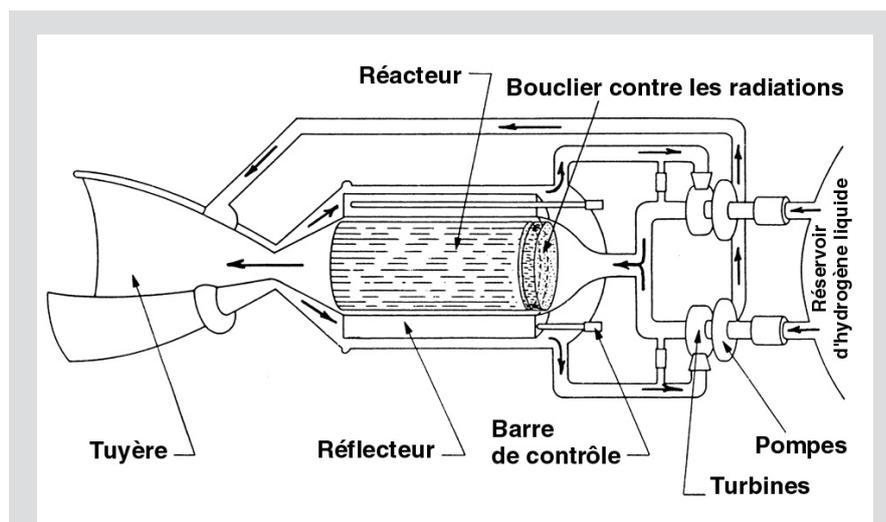
En réalité, le seul avantage à continuer avec des systèmes à propulsion chimique réside dans le fait que nous savons comment les utiliser.

Dans le but de maximiser les paramètres pour le rendement d'un moteur à propulsion nucléaire, des équipes de scientifiques et d'ingénieurs américains et russes ont conçu de nouveaux systèmes ingénieux pour des véhicules habités ou de fret. Il serait inefficace (et rétrograde) d'imaginer que l'homme continue à se déplacer dans l'espace avec des systèmes de propulsion de l'ère Apollo. Nous aurons besoin de transporter beaucoup plus que trois personnes à chaque voyage et une charge beaucoup plus considérable que celle nécessaire à un petit séjour.

L'utilisation de la technologie de l'énergie nucléaire dans l'espace est un concept déjà éprouvé. Durant le programme nucléaire spatial des années 60, la Nasa a conçu, construit et testé vingt réacteurs de fusées. Les programmes Rover et Nerva (Nuclear Engine for Rocket Vehicle Application) ont démontré la possibilité d'utiliser la puissance nucléaire dans l'espace, expérimentant une large gamme de moteurs dans lesquels l'hydrogène liquide servait d'agent de refroidissement pour le réacteur comme d'ergol, créant une poussée par son éjection.

Quelques années après le démarrage du programme de fusée nucléaire aux Etats-Unis, un effort similaire a été lancé dans l'ex-Union soviétique. Bien qu'il n'y ait pas eu d'essais de moteur intégré, des tests de sous-systèmes nucléaires et non nucléaires, incluant l'élément combustible et le réacteur, furent réalisés au complexe de Semipalatinsk dans le Kazakhstan. Des éléments combustibles à haute température faits de composés de carbure ont été développés, capables de produire des températures d'éjection de l'hydrogène supérieures à 3 000 K, environ 500 K plus élevées que les meilleurs éléments combustibles de Nerva.

Il y a dix ans, pendant la célébration du vingtième anniversaire du premier alunissage, le président George Bush annonça que la Nasa envisagerait un retour sur la Lune ainsi que l'envoi d'hommes sur Mars. Le bureau d'exploration de la Nasa commença à examiner les diverses options technologiques afin d'atteindre ces objectifs.



**Figure 2.** Le plan d'un moteur d'une fusée nucléothermique à cœur solide est reproduit ici. L'hydrogène liquide est pompé du réservoir de stockage (à droite). L'hydrogène préchauffé est alors injecté dans le réacteur à fission nucléaire, chauffé à environ 3 000 K et éjecté dans la tuyère pour créer la poussée.

## Une nouvelle génération de fusées nucléothermiques

En 1992, le bureau de la propulsion nucléaire au Lewis Research Center dans l'Ohio finança un programme commun entre les experts américains et ceux des nations de l'ex-Union soviétique pour concevoir un petit moteur pour une fusée nucléothermique, ou NTR pour Nuclear Thermal Rocket (**Figure 2**). L'équipe comprenait des spécialistes d'Aerojet, du fournisseur américain en équipements nucléaires Babcock & Wilcox et d'Energopol, un consortium de la Communauté des Etats indépendants (CEI). En septembre de la même année, une équipe américaine visita le centre de tests au Kazakhstan et rencontra leurs homologues de la CEI pour mener des études détaillées sur leur projet de réacteur nucléaire spatial.

Ce travail en coopération déboucha sur des concepts assez élaborés, tels que des éléments de combustible « en ruban torsadé » qui seraient ajustés selon la température de sortie exigée. Le moteur envisagé était conçu pour une impulsion spécifique de 940 à 960 s, environ le double de celle d'un moteur chimique à hydrogène liquide d'aujourd'hui. Des essais de réacteur à Semipalatinsk ont donné des températures de sortie de l'hydrogène de

3 100 K pendant plus d'une heure et de 2 000 K pendant deux mille heures.

En 1993, les participants américains au programme suggèrent d'entreprendre un effort conjoint, estimant que cela serait profitable à tous les pays impliqués. En utilisant les installations d'essais de la CEI, les Etats-Unis n'auraient pas besoin de consacrer du temps et des ressources pour les reproduire. De plus, les conditions économiques des scientifiques et ingénieurs russes et de la CEI auraient pu s'améliorer tout en mettant leurs connaissances au service d'une bonne cause. Cependant, au terme de l'administration Bush, il apparaissait que ni la Maison Blanche ni le Congrès n'avaient la volonté de payer pour un programme spatial visionnaire, et la recherche sur la propulsion nucléaire fut encore mise en attente.

En dépit de cette situation, un groupe d'experts mené par le Dr Stanley Borowski du Lewis Research Center voulut s'assurer que, lorsque les Etats-Unis décideraient de retourner sur la Lune, la propulsion nucléaire soit sérieusement envisagée car elle est nettement supérieure à la propulsion chimique ou à d'autres options à faible poussée, moins avantageuses pour les voyages habités dans l'espace. Au cours des cinq dernières années, l'équipe de Borowski a beaucoup élargi les possibilités prévues par

le concept de moteur nucléothermique de la CEI.

Aujourd'hui, chaque engin spatial, qu'il soit habité ou non, demande une alimentation électrique embarquée pour fournir pendant toute la mission de l'énergie à l'électronique, aux ordinateurs et aux instruments scientifiques. En ce qui concerne la navette spatiale, des piles à combustible chimique fournissent cette énergie qui est nécessaire non seulement aux opérations du vaisseau mais aussi aux systèmes d'alimentation en oxygène. Si le véhicule spatial est conçu pour une mission de longue durée en orbite terrestre – comme la station russe Mir, l'ISS, les engins de télécommunications commerciales ainsi que les satellites scientifiques – il est doté de grands panneaux solaires qui transforment l'énergie solaire en électricité.

Dans le cas de sondes automatiques naviguant dans l'espace lointain, telle que Galileo qui est en orbite autour de Jupiter ou Cassini en route vers Saturne, elles transportent quelques livres d'isotopes radioactifs qui produisent de la chaleur en se désintégrant et cette énergie peut être convertie en très petites quantités d'électricité pour alimenter les instruments de bord. Toutefois, si l'énergie nucléaire devait être utilisée comme système de propulsion pour les véhicules lunaires de demain, ce même réacteur produirait une alimentation en électricité prête à l'usage.

Pour étendre les fonctions du

réacteur nucléaire dans le vaisseau spatial, Borowski pense qu'il faut s'inspirer du concept de sous-marin nucléaire dans lequel la chaleur du réacteur produit de la vapeur à haute pression entraînant des turbines pour actionner l'hélice du navire et d'autres pour fournir l'électricité. Il est possible en effet d'utiliser un moteur nucléothermique à cœur solide en double mode, produisant une force propulsive et de l'électricité, car l'engin contient plus de combustible dans son cœur qu'il n'en consomme dans son mode de propulsion (**Figure 3**). D'après Borowski, on peut parer à la nécessité d'un système de génération électrique séparé en reconfigurant le moteur afin qu'une puissance électrique importante puisse être générée pour les systèmes embarqués du vaisseau spatial, comme la réfrigération active de l'hydrogène liquide, le système d'alimentation en oxygène et les communications à hauts débits avec la Terre.

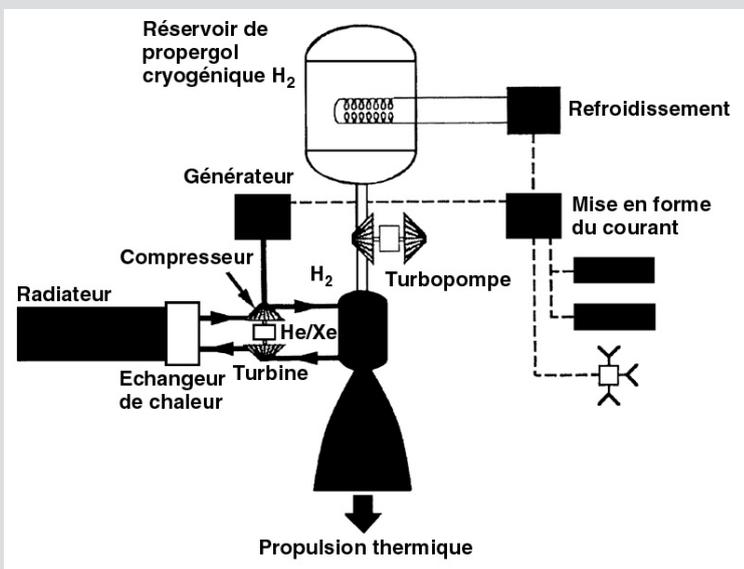
### Quadruplement de la charge avec de l'oxygène lunaire

En examinant les manières d'améliorer l'efficacité de la propulsion nucléaire et de profiter au mieux de la combinaison de différentes techniques, Borowski et ses collègues ont développé le concept novateur de la

fusée nucléothermique à triple mode. En plus de fournir de l'énergie pour le système principal de propulsion et de la puissance électrique embarquée pour le vaisseau, ils proposent d'augmenter la poussée moteur en utilisant de l'oxygène en postcombustion supersonique dans la tuyère.

Dans cette configuration, l'oxygène liquide serait injecté dans le divergent du moteur où l'hydrogène a été accéléré à des vitesses supersoniques. Après injection, l'hydrogène à faible masse et à haute vitesse ainsi que l'oxygène de masse plus élevée brûleraient spontanément, ajoutant masse et énergie chimique à l'échappement fusée pour augmenter la poussée. Le remplacement de l'hydrogène liquide à faible densité par de l'oxygène liquide de densité plus élevée augmente le débit massique et réduit la masse et le volume des réservoirs exigés pour le combustible, permettant ainsi la conception de véhicules spatiaux plus petits. Borowski décrit cela comme une « propulsion par statoréacteur supersonique inversé ». En effet, dans un statoréacteur supersonique, le moteur reçoit l'air pour la combustion de l'atmosphère lorsque l'avion vole à des vitesses supersoniques.

Le moteur nucléothermique amélioré par de l'oxygène liquide (Liquid-Oxygen Augmented Nuclear Thermal Rocket ou LANTR), en plus d'augmenter la poussée et de réduire les dimensions du véhicule, introduit une flexibilité opérationnelle supplémentaire pour l'ensemble du système



**Figure 3.** Le Dr Borowski et ses collègues ont proposé que le réacteur à cœur solide soit utilisé pour la propulsion ainsi que pour la fourniture d'électricité nécessaire à bord du vaisseau, pour le système d'alimentation en oxygène dans le cas d'un véhicule habité et également afin d'alimenter les divers systèmes de communications, électroniques et de calculs. Il peut aussi faire fonctionner le système de réfrigération en maintenant des températures basses pour maintenir l'hydrogène à l'état liquide. Nous reproduisons ici le schéma d'un système de conversion d'énergie en cycle fermé de Brayton utilisant le gaz à haute température venant du réacteur pour faire tourner une turbine et produire de l'électricité.

(Figure 4 et tableau). En variant le rapport oxygène-hydrogène dans le moteur, on peut manœuvrer sur une large plage de valeurs de poussée et d'impulsion spécifique sans changer les caractéristiques de fonctionnement du réacteur nucléaire ou sa puissance produite. Par exemple, lorsque le rapport de mélange oxygène-hydrogène augmente de 1 à 7, le rapport poussée moteur-poids s'accroît d'environ 400 %, alors que la réduction d'impulsion spécifique est seulement d'environ 45 %.

Des valeurs de poussée plus élevées se traduisent en temps de combustion plus courts pour communiquer une vitesse demandée, ce qui étend la durée de vie du moteur.

La souplesse introduite que l'on gagne grâce à l'oxygène liquide permet au même système de propulsion de base d'être utilisé parmi une famille de véhicules, et cela pour des missions très variées. La prochaine étape qualitative consisterait à éviter de transporter l'oxygène à partir de la Terre, tout le long du voyage dans le vaisseau, mais, comme le stato-réacteur supersonique, d'être capable de le trouver pendant le vol.

## La station-service lunaire

Il y a peu de doute que la première ressource sélène qui sera exploitée pour des buts opérationnels sera l'oxygène qui constitue presque la moitié de la masse de la Lune. Grâce aux efforts gouvernementaux et industriels, on a pu développer plusieurs processus d'extraction efficace de l'oxygène lunaire à partir du sol ou régolite<sup>1</sup>, avec comme objectif principal de l'utiliser comme oxydant pour les systèmes de propulsion chimique. Toutefois, l'oxygène extrait de la Lune peut également être intéressant pour la LANTR. Toute utilisation des ressources « locales » de la Lune augmente la capacité de charge du système de transport qui n'a plus à emporter tous ses consommables de la Terre.

Dans la pensée de Borowski et ses collègues, l'utilisation de la propulsion nucléaire serait évolutive, démarrant avec un simple système de moteurs nucléothermiques consommables (Figure 5). Elle maximiserait la charge délivrée à la surface de la Lune tout en minimisant la masse initiale

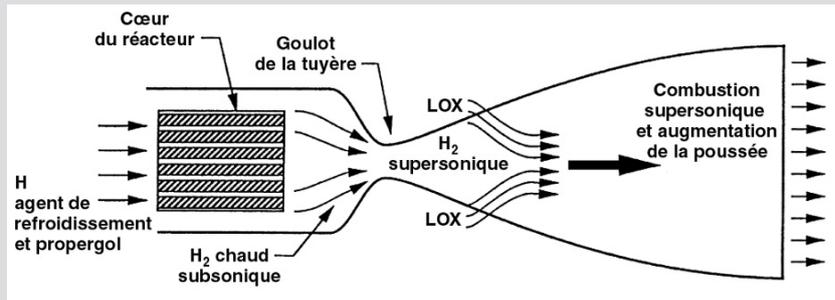


Figure 4. L'équipe de Borowski a également développé un concept à triple mode pour le moteur nucléothermique, en introduisant de l'oxygène liquide (LOX) dans l'écoulement d'hydrogène supersonique de la tuyère, afin d'augmenter la poussée et l'exibilité du moteur. L'hydrogène et l'oxygène brûlent spontanément.

	Impulsion spécifique (s)			Rapport masses réservoir-ergols (%)	Rapport poussée-poids
	5	10	35		
Durée de vie (h)	2 800	2 600	2 600		
Température (K)					
Rapport oxygène-hydrogène					
0,0	941	825	681	14,0	3,0
1,0	772	762	741	7,4	4,8
3,0	647	642	631	4,1	8,2
5,0	578	573	568	3,0	11,0
7,0	514	512	508	2,5	13,1

Dans le concept de moteur nucléothermique amélioré avec de l'oxygène liquide, une quantité supplémentaire d'oxygène ajoutée au lot d'échappement d'hydrogène plus léger accroîtra la poussée du moteur en augmentant la masse de l'échappement. En même temps, toutefois, elle réduit l'impulsion spécifique du système en ralentissant l'échappement.

Le tableau ci-dessus démontre que lorsque l'impulsion spécifique diminue d'environ 45 %, de 940 à 515 s, si le rapport oxygène-hydrogène est de 7, le rapport poussée moteur-poids croît d'environ 440 %. Le Dr Borowski affirme que cette augmentation de poussée par l'apport d'oxygène signifie que les performances des gros moteurs peuvent être obtenues avec des petits moteurs nucléaires.

devant être lancée de la surface de la Terre en orbite. En effet, en utilisant le nucléaire thermique plutôt que les technologies de propulsion chimique, on double l'impulsion spécifique puisque la charge pouvant être délivrée sur la surface de la Lune est augmentée de 80 % par rapport à celle des systèmes chimiques pour la même masse initiale en orbite terrestre. Autre avantage direct : on pourra plus rapidement établir sur la Lune les équipements nécessaires à l'exploitation des ressources, l'activité industrielle et l'installation des membres d'équipage. L'accroissement de charge, grâce aux véhicules de transport nucléaires, permettra la mise en place d'installations modulaires de production d'oxygène lunaire à la

surface de notre satellite.

L'oxygène sélène devrait, en premier lieu, alimenter les véhicules faisant l'aller-retour (navette ou *lander*) entre la surface de la Lune et le véhicule de transport en orbite lunaire. On réduirait ainsi la quantité d'oxygène liquide à transporter depuis l'orbite terrestre. Dès que l'oxygène lunaire sera facilement exploitable, on pourra utiliser des moteurs nucléaires réutilisables améliorés par de l'oxygène liquide, augmentant ainsi la capacité de charge de l'ensemble du système. Avec un véhicule de transport nucléaire réutilisable, Borowski et son équipe estiment que cette augmentation pourrait atteindre 400 % (par rapport à un véhicule de type Apollo) pour chaque aller-retour

vers la Lune.

D'après les premiers résultats de la mission orbitale Lunar Prospector, il semble que l'on pourrait exploiter les dépôts de glace aux pôles de la Lune afin de se procurer l'hydrogène liquide nécessaire comme agent de refroidissement du réacteur et comme propergol pour les moteurs à propulsion nucléaire.

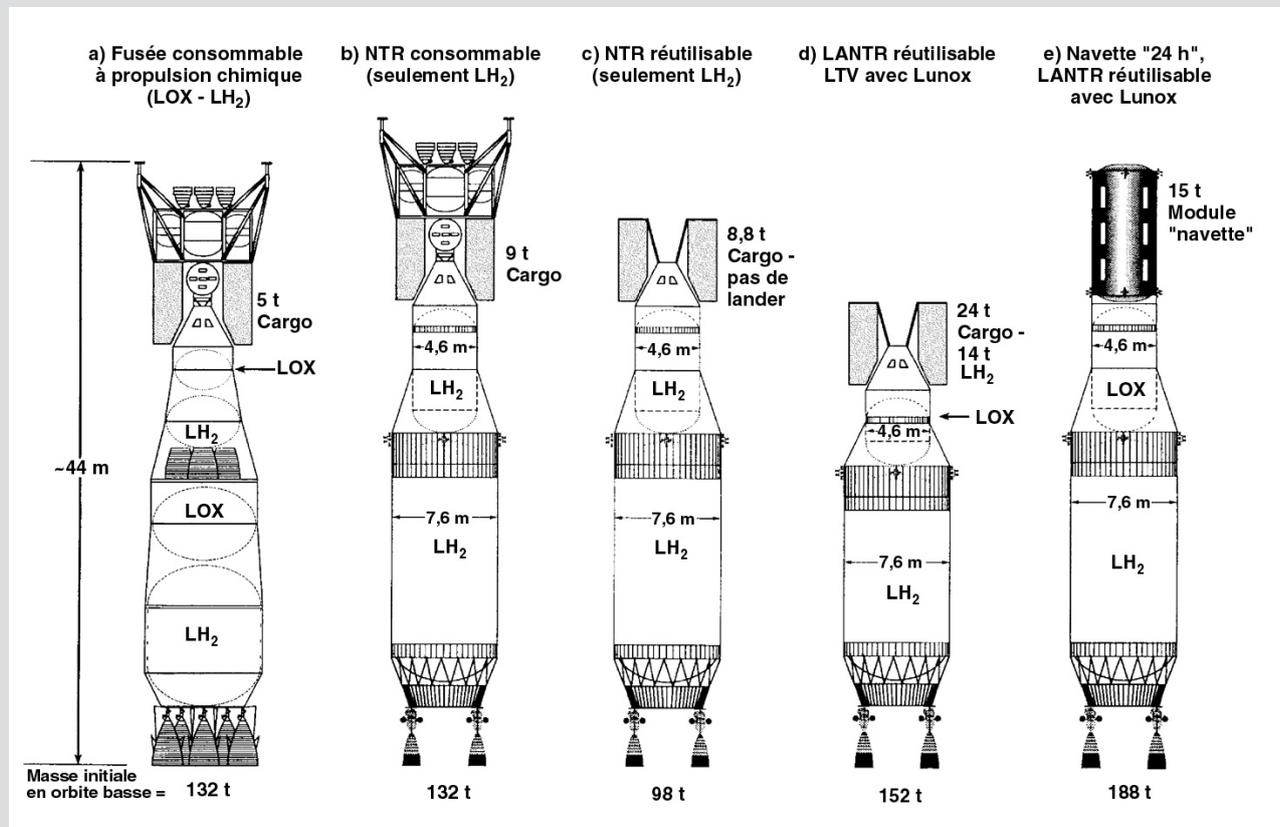
Une fois que l'on installera le système amélioré de statoréacteur inversé à oxygène liquide, l'impulsion spécifique pourrait, en potentiel, doubler à nouveau vers 1 500 à 2 000 s,

soit trois à quatre fois le rendement des systèmes de propulsion chimique. Afin de délivrer une quantité équivalente de fret sur la Lune, ces derniers auraient à fournir trois fois autant de masse en orbite basse terrestre. Des paramètres d'impulsion spécifique de ce niveau avaient été extrapolés par le passé mais seulement pour des systèmes de réacteurs nucléaires améliorés à cœur gazeux de seconde génération. Cependant, avec la LANTR, ils peuvent être obtenus en utilisant les technologies à court terme du nucléaire à cœur solide et

celles *in situ*, des propergols qui ont déjà été développées et démontrées sur Terre.

## En vingt-quatre heures vers la Lune

L'objectif du programme LANTR de Borowski est de transformer un avant-poste lunaire en un « établissement permanent composé de scientifiques et d'ingénieurs représentant aussi



**Figure 5.** Dimensions relatives et masses pour des véhicules chimiques et nucléaires. Une fusée chimique type Apollo, capable d'emporter une cargaison de 5 t sur la surface de la Lune, est présentée en (a). Le véhicule (b), avec la même masse initiale de 132 t en orbite terrestre basse, fonctionne avec une propulsion nucléothermique (NTR), également consommable. Sa charge à la surface de la Lune augmente de 80 %, soit 9 t.

Si la propulsion nucléothermique est réutilisable et l'oxygène lunaire accessible, comme en (c), il n'y a plus besoin de transporter un *lander* à chaque mission en provenance de la Terre puisqu'il sera ravitaillé sur la surface de la Lune et fera des aller-retour entre la surface et l'orbite sélène. Une cargaison d'environ 9 t pourra être livrée par ce modèle.

Dans le concept LANTR (d), en ajoutant l'oxygène liquide au système de propulsion, c'est alors 24 t de charge qui peuvent être transportées sur la Lune, en plus de 14 t d'hydrogène terrestre nécessaires pour les systèmes de propulsion chimique des véhicules lunaires. Si l'hydrogène était extrait de la glace des pôles lunaires, davantage de cargaison serait embarquée à sa place.

Les engins de (a) à (d) sont tous des véhicules « quatre-vingt quatre heures ». En (e), nous représentons un concept de navette « vingt-quatre heures », dans lequel le système de propulsion LANTR et l'oxygène lunaire sont utilisés. La capacité de charge est de 15 t, avec une poussée accrue pour diminuer le temps de transit, rendant possible des voyages vers la Lune en un jour.

*bien des entreprises commerciales privées que gouvernementales* ». Le moteur nucléaire amélioré avec de l'oxygène liquide permet d'effectuer des navettes en vingt-quatre heures avec la Lune, c'est-à-dire environ le même temps qu'il est nécessaire aujourd'hui pour voyager entre la côte est américaine et l'Asie. L'un des critères d'évaluation de tout système de propulsion devrait être la capacité de réduire le temps d'exposition aux radiations du milieu spatial pour l'équipage.

Après s'être ravitaillée avec de l'oxygène et de l'hydrogène liquides dans un dépôt de propergol en orbite terrestre, cette navette lunaire débiterait son voyage. Le temps d'allumage total du moteur pour atteindre la vitesse élevée requise pour un transit rapide vers la Lune est inférieure à 47 min. Ce moteur nucléaire amélioré avec de l'oxygène liquide étant conçu pour une durée de vie de 34,5 h, il pourrait réaliser environ quarante-quatre missions aller-retour vers la Lune.

En premier lieu, comme le prévoit le programme LANTR, les passagers devraient atteindre l'ISS à l'aide d'une navette spatiale ou de tout autre véhicule futur. Là, ils prendraient place dans leur module de transport qui serait mis en orbite basse également par la navette spatiale. Le module de transport fournit le « cerveau » du véhicule nucléaire et le système d'alimentation en oxygène pour les dix-huit passagers et les deux membres d'équipage pendant leur vol de vingt-quatre heures.

Après avoir quitté l'ISS, le module de transport ferait sa jonction avec la navette nucléaire qui attendrait à distance. Les niveaux d'accélération subis par l'équipage et les passagers durant le départ de la Terre et l'injection translunaire se situeraient entre moins d'un quart et peut-être un demi de la gravité terrestre.

À la fin du trajet de vingt-quatre heures vers l'orbite sélène, le module de transport se séparerait de la navette nucléaire et s'amarrerait avec un véhicule d'alunissage parqué en orbite lunaire. Un dépôt de propergol sur cette même orbite ravitaillerait la navette nucléaire pour son vol de retour vers l'orbite terrestre. Il alimenterait également en hydrogène liquide (en provenance de la Terre si la glace lunaire n'est pas exploitée) les réservoirs du système

de propulsion chimique du véhicule d'alunissage qui déposerait le module de transport passagers à la surface de la Lune. Après l'alunissage, ce dernier serait placé sur un véhicule de surface « à plateau » pour le transfert vers la colonie lunaire.

Le Dr Borowski estime qu'il faudrait sept ans et environ 1,5 milliard de dollars pour qu'une petite fusée nucléothermique soit développée, testée au sol et prête à l'emploi. Elle serait la base d'un véhicule de transport lunaire multimoteur, amélioré plus tard grâce à la combustion d'oxygène que l'on extrairait de la Lune. Après une période d'essai pendant laquelle des voyages sur des distances relativement courtes vers la Lune deviendront routiniers, le système de moteur nucléothermique sera prêt pour une tâche beaucoup plus exigeante : les vols habités vers Mars.

## Une famille de véhicules nucléaires pour Mars

Dans un memorandum technique publié à la fin de l'année dernière<sup>2</sup>, Stanley Borowski et Leonard Duzinski du Lewis Research Center, ainsi que Melissa McGuire d'Analex Corporation, ont présenté un programme d'ensemble afin d'atteindre les objectifs d'une étude de référence pour une mission vers Mars (lancée par la Nasa), en utilisant la propulsion nucléothermique plutôt que chimique.

Une étude de référence de la Nasa envisage l'utilisation d'un étage consommable propulsé par des moteurs nucléothermiques afin de placer le véhicule sur sa trajectoire vers Mars. Néanmoins, Borowski et ses collègues pensent que l'abandon du moteur NTR après un unique usage constitue « une utilisation coûteuse et inefficace de cet étage à hautes performances ». À la place, ils proposent une « famille de véhicules modulaires à moteurs nucléothermiques double mode » qui disposerait d'un « étage central » commun propulsé par trois moteurs de 6 800 N de poussée, sur le modèle de la CEI. Ils produiraient aussi 50 kW de puissance électrique pour le système d'alimentation en oxygène de l'équipage et pour d'autres instruments à bord du vaisseau. Résumons

quelques avantages de cette ébauche de mission : il faut un minimum d'éléments différents pour le système de transport, la masse initiale en orbite basse terrestre est réduite et les opérations spatiales sont simplifiées.

L'équipe d'étude de l'exploration de Mars à la Nasa est en train d'évaluer une variété d'architectures de mission et d'options de transport pour réaliser un vol habité vers la planète rouge autour de l'année 2014. Dans les grandes lignes, le projet s'oriente vers une séparation des missions en vols fret et vol habité ainsi que vers une production de propergol à la surface de Mars. Les deux missions fret seraient lancées en novembre 2011, précédant de trois ans le vol habité (Figure 6).

Pour la mission martienne, l'équipe de Borowski a élaboré une option « tout NTR », en utilisant un moteur et d'autres composants standardisés (Figure 7). Avec cette approche modulaire, la sécurité et la souplesse sont améliorées, la conception des véhicules et leur assemblage sont simplifiés et les coûts sont réduits.

La première étape de ce vol habité consiste à livrer l'étage central commun nucléothermique en orbite basse terrestre avec un lanceur de 80 t de charge sur cette orbite (ce lanceur a été baptisé « Magnum » et la Nasa en a proposé l'étude). À peu près trente jours plus tard, un second lancement de Magnum livrera, sur la même orbite où se fera le rendez-vous et la jonction avec l'étage central, une armature de structure, un réservoir de propergol, un module habitat et des réserves de bord. C'est ensuite qu'une navette ou un véhicule similaire amènera l'équipage.

Puisque l'étage nucléaire possède des performances supérieures aux systèmes de propulsion chimique, il sera possible de diminuer le risque de la mission pour l'équipage en embarquant une seconde capsule de réserve pour le retour sur Terre. La première aura été lancée dans une des missions de fret automatiques précédentes. Si, pour une raison quelconque, l'équipage ne peut pas atterrir sur Mars pour retrouver cette première capsule de retour, alors il en disposera d'une autre en réserve.

Le moteur nucléaire double mode, qui restera en orbite autour de la planète rouge après que le module d'atterrissage aura posé l'équipage ou le fret à la surface, peut produire

de l'électricité pour des fonctions orbitales telles que les communications avec la Terre. Il procurera aussi l'étage pour le retour de l'équipage à la fin de son séjour martien.

Les missions habitées vers Mars en cours de développement sont limitées par des contraintes budgétaires. La direction de la Nasa pense que ces restrictions persisteront dans le futur. Pour les vols habités, il est possible de diminuer la durée du voyage vers Mars en substituant du carburant supplémentaire embarqué en orbite basse terrestre à du fret. Ce serait la meilleure option pour la santé et le bien-être de l'équipage.

## Utiliser aujourd'hui la technologie de demain

La propulsion nucléaire est l'étape logique dans l'évolution des technologies permettant à l'homme d'accroître son intervention dans l'espace et de lui donner les moyens les plus efficaces pour coloniser la Lune. De plus, passer des systèmes chimiques au nucléaire pose les bases pour le saut qualitatif suivant en technologie énergétique, en particulier la fusion thermonucléaire.

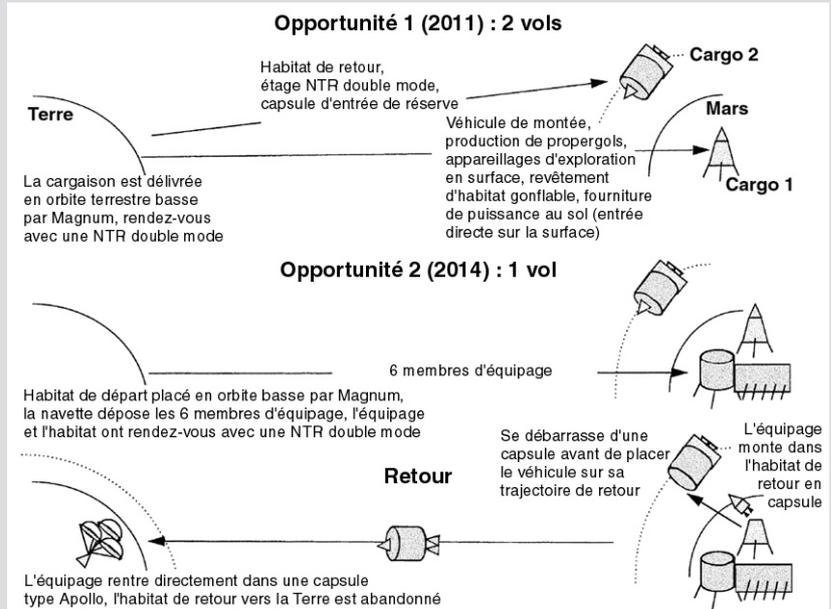
Lorsqu'il parlait de Sélénopolis, la future grande cité que l'humanité construira sur la Lune, le visionnaire de la colonisation spatiale Krafft Ehrlicke insistait sur le fait que « *Sélénopolis ne sera pas bâtie avec la technologie d'hier* ». Il y a trente ans, le président Kennedy espérait pleinement que les défis d'exploration, dans la continuité d'Apollo, soient également entrepris avec des technologies de demain, comme la propulsion nucléaire dans l'espace. Aujourd'hui, les technologies de demain sont bien à notre portée.

n

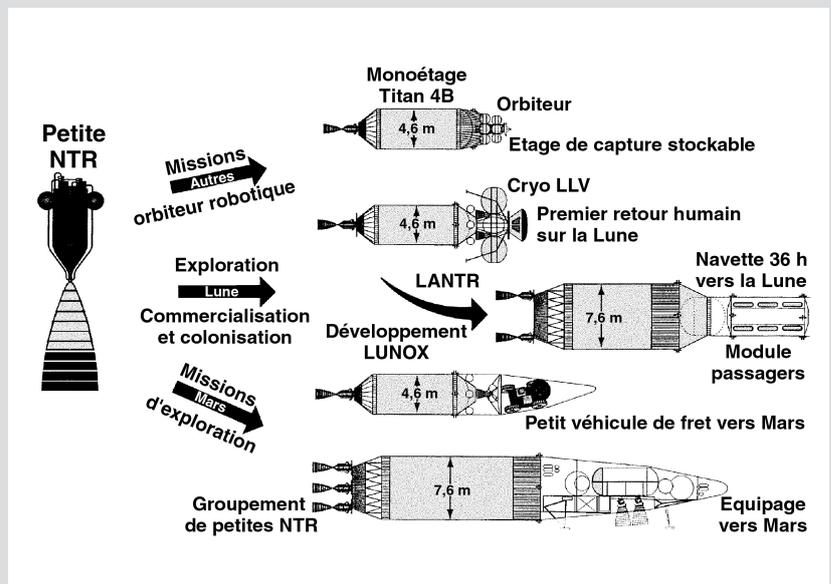
### Notes

1. Marsha Freeman, « Krafft Ehrlicke's Moon : A Lust Oasis of Life », *21st Century*, Summer 1998, p. 24.

2. Nasa, *Technical Memorandum*, 1998-208834, « Vehicle and Mission Design Options for the Human Exploration of Mars/Phobos using Bimodal NTR and LANTR propulsion ».



**Figure 6.** La Nasa étudie divers scénarios pour des missions habitées vers Mars dans la seconde décennie du siècle prochain. Toutes ces études supposent qu'il y ait un gros lanceur porteur « Magnum » disponible, avec une capacité de 80 t en orbite basse terrestre et que les missions se répartissent entre les vols fret et pilotés. L'utilisation de systèmes de propulsion nucléaire peut réduire le temps de transit vers Mars ou augmenter le tonnage des charges transportées par rapport à des systèmes de propulsion chimique



**Figure 7.** Le petit moteur nucléothermique de base permettra une grande souplesse d'utilisation pour une variété de missions. Il permettra l'établissement de l'homme sur la Lune ainsi que son exploration et son développement commercial. Le groupement de ces petits moteurs rend possible le transport d'hommes et de matériaux vers Mars. De plus, les missions d'exploration automatique à l'aide de robots vers les planètes extérieures bénéficieront des capacités autonomes de la propulsion nucléaire.

# Une stratégie de développement lunaire



**DR KRAFFT EHRIKKE**

**Nous publions ici de larges extraits d'un article écrit en 1981 par un pionnier du programme spatial américain : Krafft Ehrlicke. Il décrit les différentes étapes nécessaires pour réussir une industrialisation de la Lune. Même si nous connaissons mieux notre satellite aujourd'hui, sa stratégie reste néanmoins d'actualité.**

**L**a Lune permet d'accéder à des matières premières intéressantes au niveau industriel dans un puits gravitationnel peu profond. Leur utilisation dans le processus de développement de l'espace lunaire et cislunaire nous permettra d'éviter le coût élevé de lancement de tels matériaux de la Terre. Afin de profiter de cet avantage, il faudra d'abord lancer de la Terre l'équipement et l'infrastructure permettant de créer des produits sur la Lune qui n'aient pas seulement une meilleure qualité mais qui représentent également une masse de nombreuses fois supérieure à celle qui est importée. Il est facile de satisfaire à cette exigence, pourvu que l'on n'in-

vestisse pas d'importants efforts dans la construction de vastes stations orbitales avec seulement des matériaux terrestres avant que l'on ne puisse transformer des matériaux lunaires destinés à la Terre. D'un point de vue économique, cette dernière stratégie reviendrait à installer un Saint-Tropez « sous une bulle de verre » en Alaska avant d'y pomper du pétrole.

La surface lunaire offre d'excellentes possibilités tant pour la construction de sites d'habitation sur place (lesquels peuvent être ensuite agrandis au fur et à mesure du développement économique lunaire), que pour la protection contre les micrométéorites et les radiations.

Dans le passé, la croissance de l'espèce humaine se faisait dans un cadre monoglobal. Dans l'avenir, la civilisation humaine devra être polyglobale. La Lune est une première étape. Elle peut à elle seule abriter une civilisation (sa surface équivaut presque à celle des deux Amériques) et lui garantir une économie industrielle puissante reposant sur le développement de technologies de pointe. On pourra finalement transformer une importante partie du territoire lunaire en une luxuriante oasis de vie, capable un jour d'exporter même de la nourriture, sinon sur la Terre du moins vers des installations orbitales.



Krafft Ehrlicke (1917-1984) a contribué de manière remarquable aux sciences de l'exploration spatiale. Il fut entre autres le concepteur du premier moteur à utiliser comme propulseurs l'hydrogène et l'oxygène liquide. Il s'agissait du Centaur. Toutefois, il ne voyait pas l'exploration spatiale comme le moyen de réaliser des prouesses techniques. Son objectif était de faire sortir l'humanité de ses propres limites – la Terre – et de contrecarrer ainsi les thèses néomalthusiennes selon lesquelles l'homme serait prisonnier des ressources de sa planète.

## Exploiter les ressources de la Lune

Dans un document publié en 1972, j'ai décrit l'« impératif extraterrestre » devant lequel l'espèce humaine se trouve :

« Assombri par les limites de l'environnement terrestre, le scénario du développement mondial va subir des changements fondamentaux dans les trente prochaines années. Toutefois, les besoins en ressources vont continuer à croître. Ainsi, on s'intéressera davantage à l'ouverture de nouveaux environnements pour l'activité industrielle. Puisque les environnements en dehors de la biosphère répondent à la fois au besoin de poursuite de la croissance industrielle et à celui de réduction du fardeau industriel qui pèse sur la biosphère, l'idée d'ouvrir des environnements extraterrestres deviendra de plus en plus séduisante au fur et à mesure qu'elle apparaîtra économiquement viable.

« En conséquence, l'une des modifications fondamentales du scénario de développement mondial sera la transition d'un monde fermé conventionnel à un modèle de développement ouvert. Le monde ouvert ajoute l'espace ouvert et les environnements de type lunaire à l'environnement terrestre. Le plus immédiat des environnements de la deuxième catégorie est notre Lune. » [Ehrlicke 1972a]

Les conclusions de cet article n'ont guère changé. Elles se sont révélées de plus en plus exactes à mesure que le caractère erroné des préceptes de limites à la croissance est devenu apparent.

Notre planète a favorisé la concentration de certains métaux et éléments par des millions d'années de processus tectoniques et biologiques. On n'a pas retrouvé les minerais correspondants sur la Lune, et il est assez improbable qu'ils existent aux mêmes degrés de concentrations, ne serait ce qu'en raison de l'absence d'une dynamique tectonique comparable, d'eau et de vie.

Cependant, l'abondance moyenne de certains éléments est plus élevée sur la Lune que sur Terre. De plus, il existe des régions de forte concentration de certains métaux ou autres éléments (provinces riches en métaux ou minéraux). Par exemple, les hauts plateaux clairs sont deux fois plus riches en aluminium que les plaines sombres (les « mers »), ces dernières étant beaucoup plus riches en fer, en chrome, en titane, en magnésium et quelques autres éléments. En ce qui concerne le sodium, le phosphore et l'hydrogène, les différences observées sont insuffisantes pour que l'on puisse tirer une conclusion définitive. Quant aux données relatives à d'autres éléments plus rares encore, elles sont peu sûres et sujettes à caution.

Tout comme sur Terre, une faible concentration en minerais complique

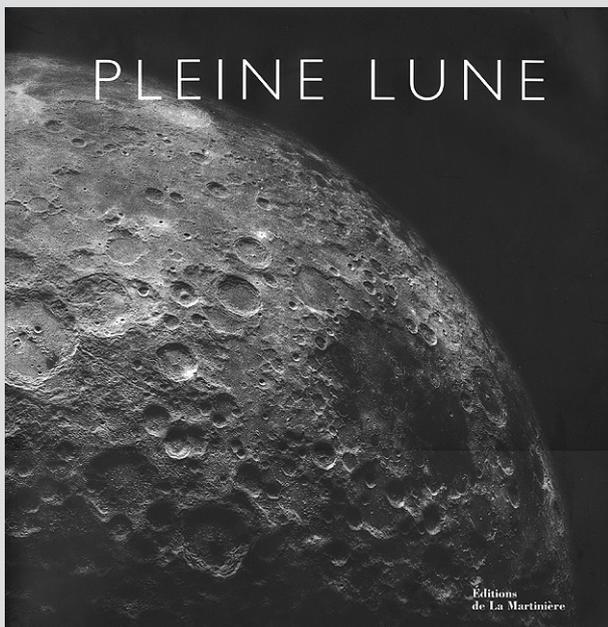
son extraction et demande plus de temps. Il faudra donc éviter, du moins au début, d'exploiter ces minerais en faible concentration.

Au départ, on extraira et utilisera les éléments les plus abondants, comme l'oxygène, le silicium, l'aluminium, le fer, le magnésium et le titane. Certains de ces éléments ne sont pas répartis de manière uniforme. Ainsi, Mare Tranquillitatis (le site d'alunissage d'Apollo-11) est une région riche en titane, davantage que les autres sites explorés, mais elle n'en possède pas nécessairement la concentration la plus riche de la Lune. Il est important de trouver d'autres régions présentant de fortes concentrations d'autres éléments importants dans le cadre d'un développement industriel.

## Des produits lunaires

Il est impossible de prévoir ou de passer en revue la grande variété des produits que l'on pourra finalement produire sur la Lune. Cela ira de matières premières extraites dans des mines lunaires à des produits semi-finis ou finis.

Dans cette seconde catégorie, on aura des tôles ou poutrelles d'aluminium, de magnésium, de titane, de fer ou d'alliages divers ; différents types de verre ; de la laine de verre ; des céramiques ; des réfractaires ; des matériaux d'isolation thermique,



### Pleine Lune

Michael Light et Andrew Chaikin

Éditions de La Martinière

129 photos, 244 pages, 295 francs

Si, dans les années qui viennent, votre emploi du temps ne vous permet pas d'aller sur la Lune, n'hésitez pas alors à acheter ce superbe livre. En effet, il s'agit d'un véritable album photo retraçant un voyage aller-retour sur la Lune, dans lequel presque toute la place est laissée à l'image.

Au cours des missions Apollo, les astronautes ont pris avec une grande précision environ 32 000 clichés de la Lune. Michael Light en a sélectionné 900 afin d'en réaliser un nouveau tirage. Ce livre nous permet d'en admirer 129 (57 en noir et blanc, 72 en couleur), dont plusieurs panoramiques dépliés de plus d'un mètre. Grâce aux nouvelles techniques de numérisation, ces photos ont retrouvé une nouvelle jeunesse. La Lune nous apparaît avec une telle netteté qu'elle nous semble proche et familière. En fin d'ouvrage, on trouve quelques commentaires succincts décrivant les photos ainsi que les étapes des missions Apollo.

PM

électrique, acoustique, etc. ; des conducteurs ; des revêtements, notamment les revêtements de sodium qui offrent une réflexion quasi parfaite (ils sont inutilisables sur Terre en raison des réactions de ce métal avec l'eau et l'oxygène) ; des pellicules très fines de divers matériaux ; des composants électroniques au silicium ; des cellules solaires ; des structures en métal ou différents alliages pour les installations lunaires ou orbitales (qui n'ont dès lors plus besoin de résister aux conditions météorologiques de la Terre) ; des matériaux composites ; des boucliers thermiques et matériaux d'isolation ; des matériaux de protection antiradiation pour les stations spatiales ; des réservoirs de combustible spatial ; de nombreux composants des installations orbitales et des vaisseaux interplanétaires, etc.

Si la production de certains matériaux ou produits manufacturés exigent un environnement en apesanteur, on peut utiliser des orbites lunaires pour la production de cristaux géants, de fibres, de cellules solaires et de toutes sortes de produits exigeant une gravité inférieure à celle de la Lune (laquelle est déjà suffisamment basse pour bon nombre de produits qu'il serait difficile ou impossible d'obtenir sur Terre). Machines et assemblages pourront être réalisés sur orbites lunaires avant d'être transférés sur une orbite géosynchrone, géostationnaire ou autre par vaisseau-cargo à propulsion électrique ne nécessitant qu'une poussée et une consommation de carburant très faibles. On peut enfin utiliser le sodium lunaire comme combustible. Les Séléniens (habitants de la Lune) pourront sans difficulté passer de l'apesanteur à une pesanteur six fois inférieure à celle de la Terre.

## Les marchés de base

Les biens et services lunaires auront quatre marchés de base :

1) *La surface lunaire.* Ces marchés comprennent la demande intérieure de la colonie lunaire et de ses industries. Il y a également les expériences scientifiques et terrestres à effectuer à la demande de clients terriens ainsi que de nouvelles formes de distractions pour les téléspectateurs terriens (la faible gravité, le paysage

lunaire et le vide permettent des effets spéciaux ainsi que des activités sportives ou culturelles différentes). On peut également envisager un tourisme lunaire ou une région de retraite pour Terriens.

2) *Les orbites géosynchrones.* Une orbite géosynchrone – ou tout autre orbite terrestre – sera accessible de la Lune à un coût et à une dépense d'énergie bien moindre que de la Terre. On peut notamment s'attendre à la présence de plus d'un millier de satellites géosynchrones vers l'an 2000, qui seront indispensables d'un point de vue économique. Ce marché requerra la maintenance des engins spatiaux, des pièces de rechange, de nouveaux composants et satellites, le recyclage de systèmes ou de pièces hors d'usage, etc. De plus, on pourra établir des dépôts d'oxygène lunaire liquide pour réduire le coût des vols habités ou des livraisons d'approvisionnement de la Terre.

3) *L'orbite basse terrestre.* Les installations industrielles orbitales seront des clients probables de matières premières lunaires : biens d'équipement, oxygène (pas seulement pour l'atmosphère mais aussi pour la production d'eau qui, dès lors, ne nécessitera que l'envoi d'hydrogène de la Terre, à un coût bien inférieur) et enfin même de la nourriture de base (déshydratée car l'eau sera très précieuse sur la Lune).

4) *La Terre.* Notre planète représentera un marché considérable pour les matières premières lunaires, produits semi-finis, composants fabriqués dans l'espace, etc. On pourra le faire à une plus grande échelle que si l'on devait fournir en matières premières l'orbite basse terrestre à partir de la Terre. Les importations lunaires vont assurer le développement d'industries et créeront de nouveaux emplois tant sur la Terre que sur la Lune.

L'industrie lunaire doit viser à être intrinsèquement diversifiée, si on veut qu'elle perdure. Il n'y a pas de temps ni d'argent pour des erreurs de planification. A partir de ces considérations, on peut tirer les principes d'une stratégie de développement lunaire :

1) Un faible coût d'accès à la surface lunaire permettra d'alléger les frais généraux et d'accroître la fourniture de services en espace géolunaire.

2) Une énergie abondante et bon marché permettra d'améliorer les capacités de génération de plus-va-

lues.

3) Une autosuffisance rapide permettra de réduire les coûts d'importation et, en conséquence, les coûts de fonctionnement, ce qui améliorera les moyens de survie du personnel lunaire.

4) Une flexibilité industrielle permettra d'accroître les possibilités de diversification et d'adaptation aux fluctuations du marché.

Ce sont ces principes qui, depuis une dizaine d'années, ont guidé mes études sur l'utilisation industrielle à grande échelle de matériaux produits dans l'espace. [Ehricke 1971a, 1969, 1970]

## Extraction et raffinage des ressources

L'extraction des matières premières lunaires nécessitera des opérations de séparation et de raffinage. On ne sait pas encore si la composition du sol lunaire varie avec la profondeur. Néanmoins, les indications sismiques dont on dispose pour le moment ne sont pas très prometteuses dans ce domaine et il paraît peu probable de trouver de riches gisements de fer, d'aluminium ou de nickel en profondeur.

Le hasard veut cependant que la croûte lunaire recèle beaucoup d'éléments intéressants pour l'industrie, ce qui rendra possible une extraction en surface à un coût relativement bas. En fait, il semble que ce soit la surface lunaire qui soit la plus riche en hydrogène, azote, carbone et autres éléments légers indispensables. Les protons du vent solaire ont désoxydé les matériaux de surface, nous épargnant ainsi de lourds processus de réduction des roches lunaires brutes.

Les échantillons ramenés par la sonde automatique Luna 16 de la région nord-est de Mare Fecunditatis ont mis en évidence du fer pur. Les études magnétiques du sol lunaire indiquent qu'il devrait contenir de 0,15 à 0,2 % de fer à l'état pur, et peut-être également de plus faibles quantités d'autres métaux tels que le nickel ou le chrome, également à l'état pur. En « tamisant » le sable ou des roches lunaires concassées dans un séparateur magnétique, on peut espérer extraire 1 t de fer pur pour 550 à 600 t de sable.

Une autre ressource intéressante serait les petites perles de verre qui sont abondantes à la surface de la Lune et qui viennent de l'impact de météorites ou d'astéroïdes. Des ondes de choc atteignant des pressions de 0,5 million d'atmosphères ont causé la fonte et l'évaporation de grandes quantités de roche et de sable, écrasant leur structure cristalline et les transformant en verre. Ces « sphères » seront extraites par des moyens mécaniques ou électrostatiques avant d'être transformées.

Il existe également des moyens de séparation thermomécaniques : les éléments ou composés sont séparés en centrifugeuse après fusion totale ou partielle.

Toutes ces méthodes de séparation sont relativement simples et ne nécessitent pas de matériel complexe ou lourd.

On peut également envisager les méthodes de séparation électrolytiques, chimiques et thermiques pour extraire les métaux et semi-métaux. L'électrolyse est moins fréquente parce qu'elle demande beaucoup d'énergie. Toutefois, les deux principaux éléments de réduction chimique – le carbone et l'hydrogène – sont relativement rares sur la Lune (ce sera le cas du moins au début), alors que l'on pourra disposer d'énergie abondante et bon marché.

La réduction chimique ou les méthodes faisant appel à des acides et bases ne seront pas intéressantes au départ pour deux raisons essentielles : d'une part, elles sont complexes, nécessitant davantage de produits terrestres que d'autres méthodes de traitement, et, d'autre part, en raison de leur coût, ces produits chimiques devront être par la suite recyclés. Il est clair que moins on aura à recycler des agents catalytiques, oxydants ou réducteurs, mieux ce sera.

En ce qui concerne l'électrolyse, le matériau lunaire pourra être fondu à l'aide de l'énergie nucléaire (jour et nuit) ou de l'énergie solaire (seulement le jour). Les effets de l'électrolyse de matériaux liquéfiés sont bien connus : l'oxygène et les non-métaux électronégatifs sont rassemblés à l'anode, tandis que les métaux (et éventuellement l'hydrogène) sont recueillis à la cathode. L'oxygène, le soufre et le chlore appartiennent aux éléments fortement électronégatifs, tandis que l'hydrogène, le sodium, le potassium et le magnésium sont for-

tement électropositifs. L'aluminium, le fer et le titane sont des éléments faiblement électropositifs dont le dépôt cathodique par électrolyse demande des voltages élevés. Un réglage de la tension permet donc une séparation de ces produits.

Outre la fusion des minerais pour l'électrolyse, on peut utiliser la chaleur pour une distillation fractionnée car les très larges différences de points de fusion (et de tension de vapeur) des composés dans le vide rend ces procédés intéressants. On peut également accomplir une réduction en faisant diffuser de l'hydrogène, du monoxyde de carbone (CO) ou du méthane (CH<sub>4</sub>) à travers de la matière lunaire en fusion. Ces agents réducteurs peuvent aussi être utilisés sur du matériau lunaire finement concassé et chauffé, ou encore en mélangeant ces gaz réducteurs avec du matériau lunaire évaporé.

Les sources de chaleur pour la réduction sont (par ordre croissant de température) : le réacteur à haute température (HTR) où le gaz de refroidissement sort à 900° ou 950°C ; des arcs électriques nucléaires (peu pratiques pour une production de masse) ; les fours solaires, pour des températures atteignant jusqu'à plusieurs milliers de degrés Celsius (évidemment inutilisables pendant la nuit lunaire qui dure 354 h) ; les fours atomiques souterrains (FAS) chauffés par de petites explosions de fission ou de fusion ; le plasma d'un réacteur de fusion, lorsque cette technique sera au point.

Dans un premier temps et pour le traitement de quantités importantes de minerais, les méthodes les plus efficaces seront le HTR et le FAS, jour et nuit, ainsi que les fours solaires en journée.

Dans une installation d'extraction de surface et de traitement de minerais, on utilise des fourneaux électrolytiques, thermocentrifuges, etc. La roche lunaire brute extraite de mines à ciel ouvert est amenée aux fourneaux par tapis roulant, celui-ci servant aussi à ramener les déchets et les résidus à la mine. L'ensemble du système est alimenté en énergie par un HTR à lit de boulets de thorium qui surgénère de l'uranium 233 combustible à partir du thorium 232 fertile, ce qui évite l'utilisation de plutonium. Par la suite, on utilisera une combinaison de surgénérateur HTR à thorium et de réacteurs à sels fondus

(MSR), où le HTR fournit de la chaleur industrielle, de l'électricité et un excédent d'uranium 233 qui permet au second de produire de l'électricité. Le MSR est d'une maintenance encore plus facile que le HTR.

Le réacteur nucléaire sera installé à une courte distance de l'usine, dans une vallée ou un cratère appropriés dont les rebords serviront de bouclier de sécurité.

## La technique des impulsions nucléaires pour les explosions souterraines

Depuis mes premières études sur l'extraction minière lunaire par explosion en 1972, j'ai effectué de nombreuses et très diverses recherches sur les différents modes d'application de cette technique [Ehricke, 1972a]. Je ne peux ici qu'en faire un résumé très succinct. Les utilisations pacifiques de l'énergie nucléaire, y compris la production d'énergie par explosion nucléaire souterraine, sont autorisées par le Traité international sur l'espace de 1967. Une explosion souterraine n'affecte pas la surface ni les conditions en surface. L'énergie nucléaire est la forme la plus efficace d'énergie parce qu'elle présente les plus faibles entropie et masse. C'est le cas pour les centrales électronucléaires mais plus encore pour les explosions nucléaires.

Pour extraire, par exemple, 10 000 t (tonnes terrestres) d'oxygène par an, et réduire par la même occasion une masse correspondante de silicium, de fer, d'aluminium, de titane, etc., il faut investir annuellement 75 milliards de kilocalories. Cela correspond à l'énergie libérée par quinze explosions d'une puissance équivalente à 5 kt de TNT chacune. Quinze bombes de cette puissance représentent un poids total inférieur à 15 t.

Même si l'on considère que cette masse ne constitue que 5 à 10 % de la masse totale qu'il faudra importer de la Terre pour l'extraction minière par explosion, et même si l'on ne récupère en fait que 33 à 50 % de l'oxygène (ce qui fait que l'extraction de 10 000 t d'oxygène nécessiterait trente à quarante-cinq explosions d'une puissance unitaire de 5 kt, ou

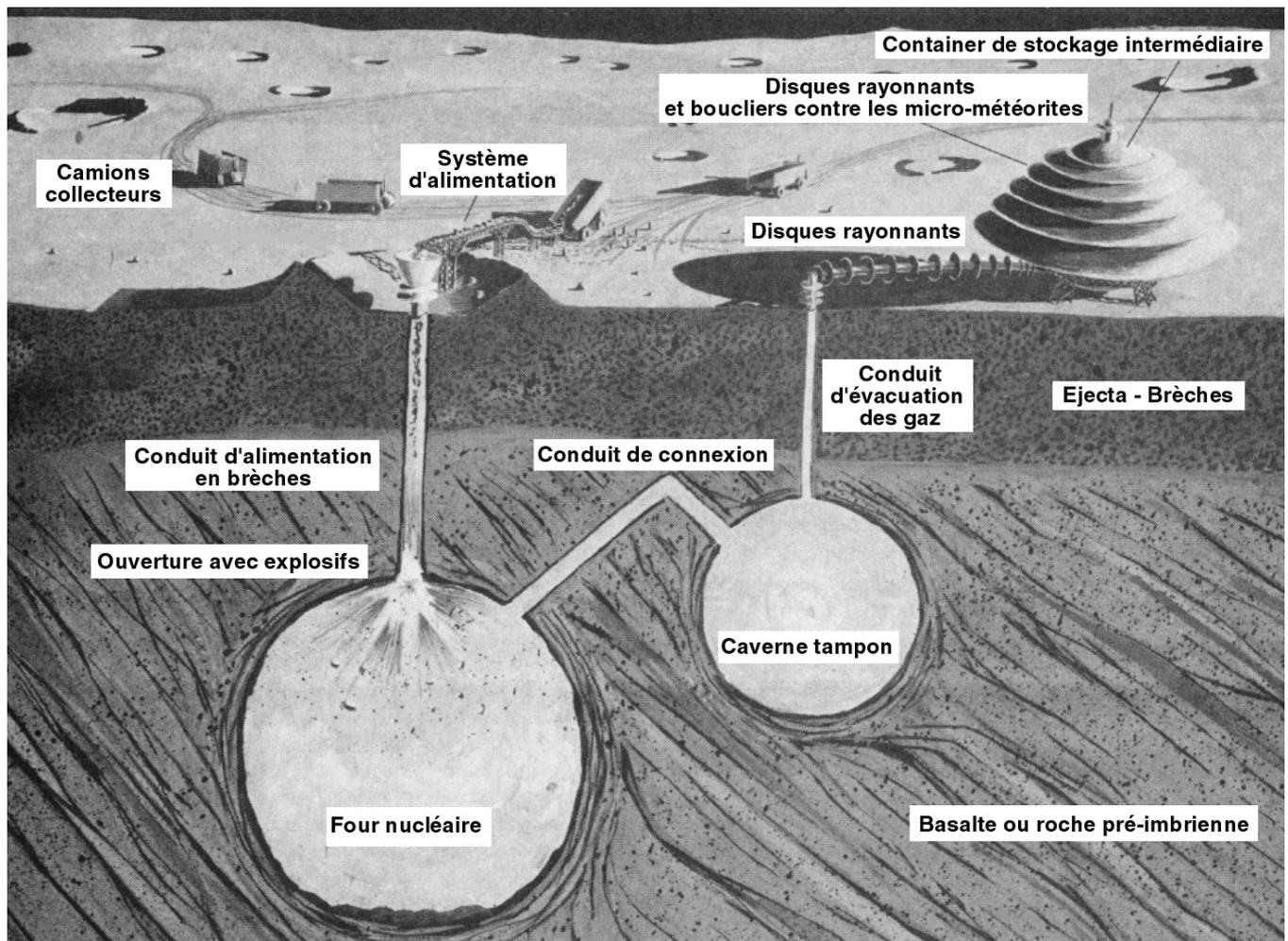


Schéma d'un four atomique souterrain destiné à extraire des gaz et réduire des matières premières.

quinze à vingt-trois explosions de 10 kt), le quotient de la masse produite (oxygène et matériaux réduits) par la masse investie initialement est considérable (80 à 100). Ce coefficient reste très élevé si l'on prend en ligne de compte tous les équipements et l'énergie nécessaires à la séparation des éléments contenus dans la masse réduite. Après installation de l'équipement de base, lorsqu'il ne reste qu'à fournir les charges explosives, le quotient produit par investissement devient beaucoup plus élevé. De plus, les explosions sont trop faibles pour affecter les laboratoires et observatoires astronomiques établis à 1 000 ou 2 000 km du complexe central d'extraction minière lunaire.

Les cavernes des FAS seront creusées dans le sous-sol lunaire (les basaltes des mers, une roche pré-imbrienne). Du fait de la sécheresse totale de la roche lunaire, il n'y a pas de génération de vapeur, ce qui représente un avantage important par rapport à la Terre. En

effet, dans un environnement de pesanteur plus forte, la vapeur risquerait de fissurer les parois entraînant l'effondrement du plafond de la caverne et, avec la formation de cheminées, son refroidissement.

Sur la Lune, les explosions produiront des cavernes dont les parois seront vitrifiées et fortement comprimées. On peut s'attendre à ce qu'elles soient suffisamment imperméables pour constituer un réservoir d'eau, sans danger que celle-ci soit perdue par absorption dans les roches desséchées et non comprimées qui entourent l'ensemble. La conductivité thermique du matériau est très basse en comparaison à la Terre, si bien que la chaleur produite reste concentrée dans les parois du four et dans le réservoir de lave en fusion qui se formera. Cela signifie que l'énergie de l'explosion sera dissipée de manière essentiellement productive dans le matériau traité.

On a constaté que la croûte lunaire

contient, par rapport à la Terre, beaucoup moins d'éléments chimiques susceptibles de se transmuter en radio-isotopes indésirables (strontium, césium, yttrium, antimoine, etc.) sous l'effet de l'intense flux neutronique de l'explosion atomique. L'explosion libère évidemment des radionucléides s'il s'agit d'une explosion de fission, et c'est pour cela que la fusion lui sera préférée.

L'expérience terrestre de telles explosions montre que la majorité des produits de fission radioactifs a tendance à se rassembler en flaques de roches liquéfiées au fond de la cavité. Sur la Lune, du fait de la gravité plus faible, il est probable que ces produits de fission seront plus largement distribués dans les parois inférieures de la calotte. La plupart des produits de fission ont une demi-vie relativement courte. Cent jours seulement après l'explosion, 63 % des matériaux radioactifs sont constitués de trois radio-isotopes : le strontium 90, le

strontium 89 et le césium 144, dont les demi-vies sont respectivement de 28 ans, de 50 jours et de 284 jours. Après cent jours, le strontium 90, de longue demi-vie, représente alors 20 % de l'ensemble du rayonnement.

Au fur et à mesure que la caverne se remplit de matériaux réduits, les parties radioactives de la caverne sont de plus en plus ensevelies. Etant donné que les demi-vies sont en général courtes et que les nouvelles couches de matériaux jouent le rôle de protection, la radioactivité dans le four décline rapidement et atteint un minimum quand l'extraction commence. De plus, la mine ainsi créée est exploitée par des robots. Le minerai désoxydé lui-même n'est pas radioactif et peut être traité sans problème après son extraction. Il n'y a presque pas de limites quant à la quantité de matériau lunaire que l'on peut traiter annuellement dans ce genre d'installations combinant FAS et centrales nucléaires.

## Une stratégie de développement lunaire

Les quatre principes énoncés plus haut pour la stratégie de développement lunaire visent à permettre, en établissant un marché, une rapide viabilité économique et en amélioration constante ainsi qu'une capacité de résistance aux crises d'approvisionnement. Ce n'est que sur cette base que l'on peut rapidement et efficacement engager une industrialisation de la Lune acceptable sur le plan financier. Et seuls une productivité croissante et un essor économique soutenu pourront assurer l'existence d'une population lunaire croissante et le développement d'un niveau de vie élevé pour les Séléniens.

L'établissement d'un marché garantit que les installations lunaires onéreuses resteront fonctionnelles et productives en cas de modification de demande sur le marché. La résistance aux crises d'approvisionnement garantit que le personnel lunaire ne devra pas être « rapatrié » sur Terre, que ce soit en cas d'interruption des livraisons terrestres ou dans le cas d'une incapacité à assurer un rapide retour sur investissement – ce qui fut l'argument utilisé pour arrêter le

programme Apollo. Des interruptions dans un processus de développement coûtent plus cher en temps et en argent que l'interruption elle-même. C'est pourquoi il faut que la capacité de résistance à une crise soit suffisamment forte et, en conséquence, maximiser la productivité.

L'industrie lunaire doit être vue comme un organisme qui évolue avec le temps vers un degré d'organisation plus complexe, fournissant les bases au développement d'une population et de ses activités culturelles. C'est pourquoi la base industrielle nucléaire de la Lune et les systèmes d'approvisionnement métallurgiques ont la première priorité, ainsi que les équipes chargées de les mettre sur pied.

A partir de la stratégie ainsi élaborée, on peut définir cinq phases d'évolution de la sélénosphère (la sphère lunaire).

La *première phase* consiste en une prospection des provinces riches en métaux ou en minéraux de façon à cartographier les sites prometteurs pour les stations d'approvisionnement. Cette étape nécessitera l'utilisation de véhicules d'alunissage simplifiés, de satellites d'observation et de communication, ainsi que d'un satellite réflecteur chargé d'illuminer les régions perpétuellement dans l'ombre se trouvant aux hautes latitudes et dans les zones polaires, afin de pouvoir les photographier, les cartographier et détecter d'éventuelles calottes glaciaires.

L'élément central de la *seconde phase* sera l'établissement de stations spatiales sur des orbites basses lunaires. Ces stations seront des centres de contrôle et d'opération. Elles seront également des laboratoires d'ingénierie et de biologie dans lesquelles les scientifiques mèneront des expériences sur les matériaux lunaires expédiés de la surface de la Lune par des vaisseaux automatiques. Elles serviront aussi de centres d'hébergement et d'opération pour la navette – le « ferry lunaire » – car il n'y aura au départ, pour des raisons de coût, qu'un nombre assez limité de missions sur la Lune elle-même.

Ces stations seront le lieu de formation indispensable de la « première génération » de personnel lunaire pour la troisième phase. Les expéditions à partir de la station serviront à mettre en route et à maintenir les équipements lunaires qui seront envoyés

directement de la Terre. Bien que cette seconde phase doive utiliser des moyens de transport existants, il faudra, dès ce moment-là, développer et mettre au point des systèmes de transport très rentables, concevoir un vaisseau à alunissage glissé, des cargos nucléaires géolunaires ainsi que des installations destinées à récupérer la vapeur d'échappement des véhicules au décollage.

Il faut que le rythme de développement s'accélère dans la seconde phase pour des raisons économiques, celle-ci étant plus chère que la première et n'étant pas encore une étape d'exploitation et de production. C'est au cours de la phase suivante que commencera la production et que les marchandises ne seront plus seulement transportées de la Terre à la Lune, mais qu'il y aura également les premières exportations lunaires vers l'espace géolunaire et la Terre elle-même.

La *troisième phase* verra l'établissement d'un complexe central de traitement lunaire de première génération doté d'une centrale nucléaire.

Les fondations de cette phase auront été installées au cours de la précédente. La station circumlunaire aura réalisé tout le travail préparatoire pour la station lunaire à un coût beaucoup plus faible que s'il avait fallu établir directement la base sur la Lune. Le personnel de la station sera donc prêt à passer des périodes de neuf à douze mois sur la Lune dans la mesure où il aura été préparé en passant des périodes similaires en alternance sur la station orbitale et sur la base lunaire.

Ces équipages seront parfaitement familiarisés avec toutes les expériences biologiques, médicales, techniques et les opérations d'exploration. Ils maîtriseront le maniement des outils et équipements ainsi que les techniques de construction, allant du découpage et soudage à froid de roche lunaire à la production de briques lunaires ainsi que de ciment (utilisant du soufre lunaire comme liant au lieu de l'eau) et au compactage du sable ou de la poussière lunaire pour réaliser des blocs destinés à la construction d'« igloos lunaires ». Le personnel sera formé pour travailler avec des télémanipulateurs et diriger des robots dans différentes conditions, de jour et de nuit, pour exploiter des mines et forer des puits, pour surveiller et entretenir l'équipement et les modules agricoles.



**Projet d'installation d'extraction d'oxygène à la surface de la Lune. Le minerai lunaire est prélevé, trié et traité. L'oxygène liquide est ensuite stocké dans les réservoirs au premier plan à droite.**

Avec des équipages ainsi formés, la production pourra commencer dès le début de cette phase en ce qui concerne l'oxygène, le silicium, l'aluminium, le fer, les verres, etc. A partir de là, on passera progressivement à la métallurgie sur matières pulvérisées ou en phase gazeuse à la production de cellules solaires, de composants d'ordinateurs et finalement de structures d'habitation spatiales, de plates-formes de communications, d'antennes, de pièces détachées pour satellites, de structures de réflecteurs, etc.

Au cours de la troisième phase, de nouveaux systèmes de transports seront mis en œuvre, qui abaisseront fortement les coûts.

La station orbitale circumlunaire de la deuxième phase deviendra alors une base d'entraînement pour la deuxième génération de Séléniens et une usine de production en apesanteur. La phase trois commence à produire pour des différents marchés.

Pour élargir ces marchés, des stations d'approvisionnement seront construites lors de la quatrième phase sur les sites où l'exploration menée pendant les phases un et deux aura permis de découvrir une relative abondance de certaines matières premières. Ces stations d'approvisionnement seront très simples, pour la plupart non habitées et contrôlées à partir des stations orbitales. Les

matières premières seront extraites aux alentours de la station d'approvisionnement et expédiées de façon balistique, sur des cratères de réception dans les environs du complexe central de traitement. Là, les installations industrielles et les centres de lancement seront regroupées de façon à éviter une multiplication de ces centres sur différents sites.

Au cours de cette quatrième phase, la population lunaire va commencer à croître en fonction de l'essor économique et des perspectives de poursuite d'expansion industrielle. Avec l'expansion et l'amélioration du génie civil lunaire, la vie sur notre satellite deviendra de plus en plus urbanisée.

La cinquième phase dépend d'une assise économique solide, laquelle nécessite l'utilisation de l'énergie de fusion thermonucléaire. C'est à ces conditions que pourra se bâtir Séléнопolis, un état-cité de civilisation lunaire. Au départ, la longueur sera comprise entre 500 m et quelques kilomètres et la hauteur pourra atteindre 500 m ou plus. Cette longueur pourra atteindre, par la suite, plusieurs kilomètres sur le sol lunaire et, parfois, en sous-sol. Des sections supplémentaires bénéficiant de l'expérience initiale et de l'amélioration des technologies lunaires seront ajoutées au fur et à mesure de la croissance de la population lunaire.

Les points d'embranchement serviront de centre de contrôle climatique et d'approvisionnement énergétique. Ils maintiendront des climats variés (continental, subtropical sec et semi-aride au départ) et reproduiront les cycles climatiques. On pourra, au même moment, avoir une section hivernale continentale et une section estivale continentale. D'autres sections seront adaptées à des fonctions agricoles particulières de façon à maximiser la croissance des plantes, le rendement annuel et le nombre de récoltes. On pourra notamment enrichir l'atmosphère en dioxyde de carbone, améliorer les paramètres de température, d'humidité et de rayonnement pour obtenir la combinaison optimale.

A partir de cette cinquième phase, il n'est plus nécessaire de définir des phases de développement ultérieures, cette planification n'aurait pas de sens. Le nouveau monde sera lancé, et il se développera selon ses propres lois.

n

#### Références

Krafft Ehrlicke et Elizabeth Miller, 1969, *Exploring the Planets*, Boston, Little, Brown and Co.

Krafft Ehrlicke, 1970, « In-depth Exploration of the Solar System and its Utilization for the benefit of Earth », *Proceedings of the Third Conference on Planetology and Space Mission Planning*, The New York Academy of Sciences.

\_\_\_\_\_, 1971a, « Philosophy and Outline of Long-range Space Planning for the Needs of this Nation and Mankind », Présentation devant le responsable adjoint de la Nasa (planification), Report PD71-16, Space Division, North American Rockwell Corp., juillet, p.157.

\_\_\_\_\_, 1971b, « The Extraterrestrial Imperative », *Bulletin of Atomic Scientists*, novembre.

\_\_\_\_\_, 1972a, « Lunar Industries and their Value for the Human Environment on Earth », Présenté au 23ème Congrès astronautique international, Vienne, *Acta Astronautica*, 1, 1974, p.585.

\_\_\_\_\_, 1972b, « The Social Pertinence of Space Capability, Extraterrestrial Imperative and Space Industrial Developments », Déclaration devant le Committee on Aeronautical and Space Sciences, chambre des représentants, 92ème Congrès, mars.

\_\_\_\_\_, 1979, « The Extraterrestrial Imperative, Part 1, Evolutionary Logic », *Journal of the British Interplanetary Society*, 32, p.311.

\_\_\_\_\_, 1981, *Der Siebente Kontinent: Industrialisierung und Besie-*