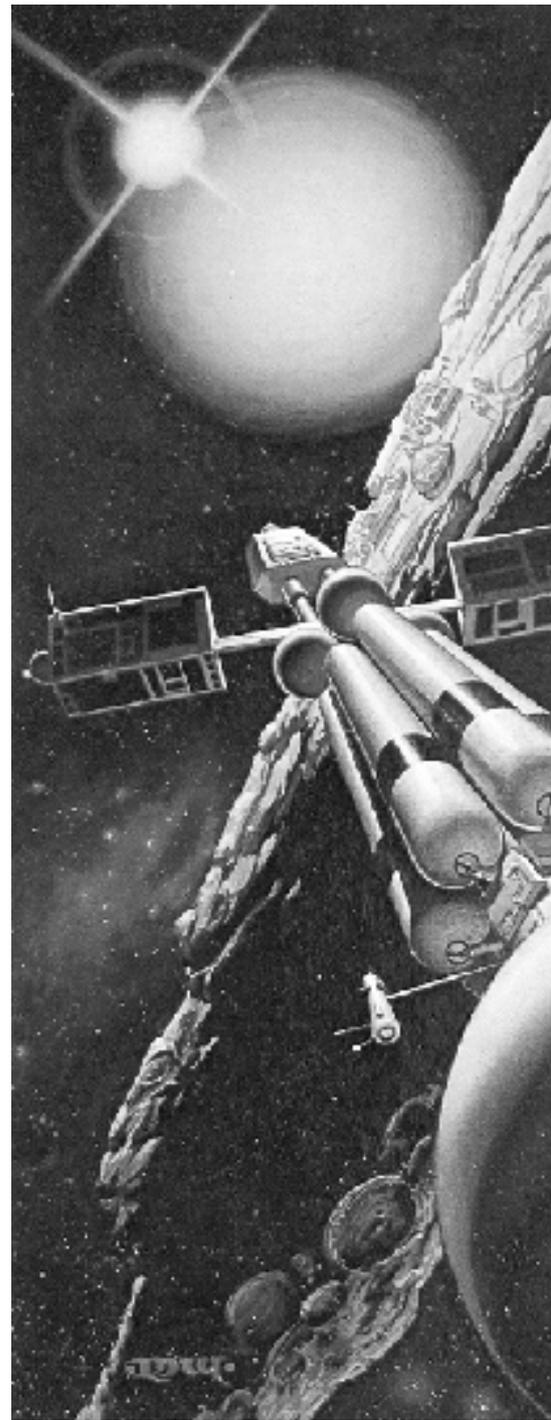


# Colonisation des astéroïdes : une des clés de la conquête du Système solaire

PHILIPPE JAMET

**Il serait vain de vouloir parler de la conquête de l'espace en se limitant à un grand projet Lune-Mars. En effet, si nous nous donnons les moyens grâce à des politiques spatiales adéquates, nous pourrions exploiter certaines ressources à portée de main sur les astéroïdes, à la fois en complément de ce qui manque sur la Lune et aussi pour des métaux de type platinoïde dont la valeur sur Terre est extrêmement élevée. L'orbite souvent excentrée des astéroïdes par rapport au plan orbital de la Terre nous interroge aussi sur les moyens de propulsion à mettre en œuvre même si, pour une petite minorité d'entre eux, nos techniques spatiales sont déjà suffisantes.**

Considérés au départ par les astronomes comme de simples objets de curiosité, mis en évidence par des plaques photographiques placées sur des télescopes, les astéroïdes sont devenus un sujet d'étude à part entière. Les données les concernant font d'ailleurs l'objet d'un archivage exhaustif dans les banques de données du Minor Planet Center dépendant du Smithsonian Astrophysical Observatory (Massachusetts) et de l'Institut d'astronomie appliquée de Saint-Petersbourg. A l'image des comètes, ils sont aujourd'hui regardés comme de véritables fossiles témoins des conditions qui prévalaient lors des premiers âges du Système solaire, à une époque où régnaient d'intenses bombardements. Leur étude scientifique, qui s'est longtemps limitée au seul calcul de leurs orbites, a évolué vers l'étude de leur composition. A partir des années 1965-1970, des astrophysiciens comme Fred Whipple, Clark Chapman, Thomas McCord, Michael Gaffey et Carle Pieters, ont développé d'importants travaux en faisant appel à trois techniques – spectrophotométrie, radiométrie et polarimétrie – adaptées spécifiquement à l'étude des phénomènes de réflexion de la lumière (solaire, dans ce cas) sur un corps. Par ces



Vaisseau à propulsion nucléaire en approche d'un astéroïde où sont déjà installées des usines d'extraction.

moyens, nous en savons plus sur la composition d'un astéroïde situé à des centaines de millions de kilomètres de distance que ne nous en apprendrait un carottage de 1 km de profondeur effectué sur Terre. Grâce aux travaux effectués sur leur albédo géométrique (fraction des radiations solaires qu'ils réfléchissent), sur leur brillance (qui permet, une fois



connue la distance à la Terre et au Soleil, de calculer l'aire de la surface projetée et, par là-même, la taille approximative) et sur leur réflectivité aux diverses composantes du rayonnement solaire, nous possédons un corpus de connaissances étonnant sur leur composition. Nous verrons, au cours de cet article, en quoi la notion de ressources propres de l'espace prend toute sa signification avec l'exploitation des astéroïdes au détriment de la notion de ressources rares, ce faux postulat si en vogue chez les partisans du libéralisme économique.

Les études des astronomes que nous avons cités ont permis de montrer que le spectre de la lumière réfléchie de ces astéroïdes est très souvent identique à celui des chondrites carbonées, lesquelles représentent 85 % des météorites tombées sur Terre. Or celles-ci sont particulièrement riches en fer, silicium, manganèse et nickel, possédant même une certaine quantité d'eau (jusqu'à 13 à 20 %), du carbone (en moyenne 2,4 %) et parfois de l'azote. Ce sont précisément ces deux derniers éléments qui manquent à la Lune ! Autre découverte à prendre en considération, celle des analyses effectuées sur des météorites en laboratoire et confirmées à partir d'observatoires terrestres. Elles révèlent que, dans certaines de ces météorites, l'abondance de platine et de métaux qui lui sont associés (palladium, iridium, rhodium, ruthénium et osmium) est deux mille fois plus élevée que dans la croûte terrestre. Ces substances sont en effet parmi les plus rares parce que l'évolution de la Terre a fait que la plupart des métaux lourds et plati-noïdes ont migré vers l'intérieur de notre planète (processus connu sous le nom de différenciation) et que l'on ne les trouve donc qu'en petites quantités dans la croûte. L'Américain Brian O'Leary, grand théoricien de l'industrialisation des astéroïdes, a souligné que, dans le cadre des seules techniques spatiales actuelles, la valeur potentielle de ces métaux, après extraction, serait comparable au coût de fabrication du matériel spatial et de son transfert au-delà de l'orbite géostationnaire, en comptant que l'on dispose déjà des infrastructures nécessaires en orbite terrestre haute.

L'étude des astéroïdes, outre ses justifications économiques de fourniture de richesses complémentaires à celles de la Lune ainsi que de nouveau moteur de développement spatial, se justifie aussi, évidemment, pour des raisons scientifiques. Les premières images *in situ* de ces étranges corps ont été apportées par la sonde jovienne Galileo qui, en 1991, a survolé l'astéroïde 951 Gaspra à une distance de moins de 600 km et, en 1993, l'astéroïde 243 Ida, membre de la famille d'astéroïdes dite de « Koronis ». Les deux astéroïdes présentent des aspects irréguliers du point de vue de leur forme : Ida, accompagné d'un astéroïde satellite dénommé Dac-

tyl, a une forme patatoïde de 58 sur 23 km, tandis que Gaspra, de forme encore plus irrégulière, mesure 20 × 12 × 11 km. L'un et l'autre révèlent leur histoire passée tourmentée par la présence de cratères d'impact : le plus gros cratère se trouve sur Gaspra, avec un diamètre de 1,5 km, et les deux astéroïdes sont grêlés de petits impacts qui se sont produits au cours de processus tumultueux se manifestant encore de temps à autre. A la suite de collisions, les astéroïdes ont laissé derrière eux des millions de micro-astéroïdes qui, à leur tour, percutent d'autres corps.

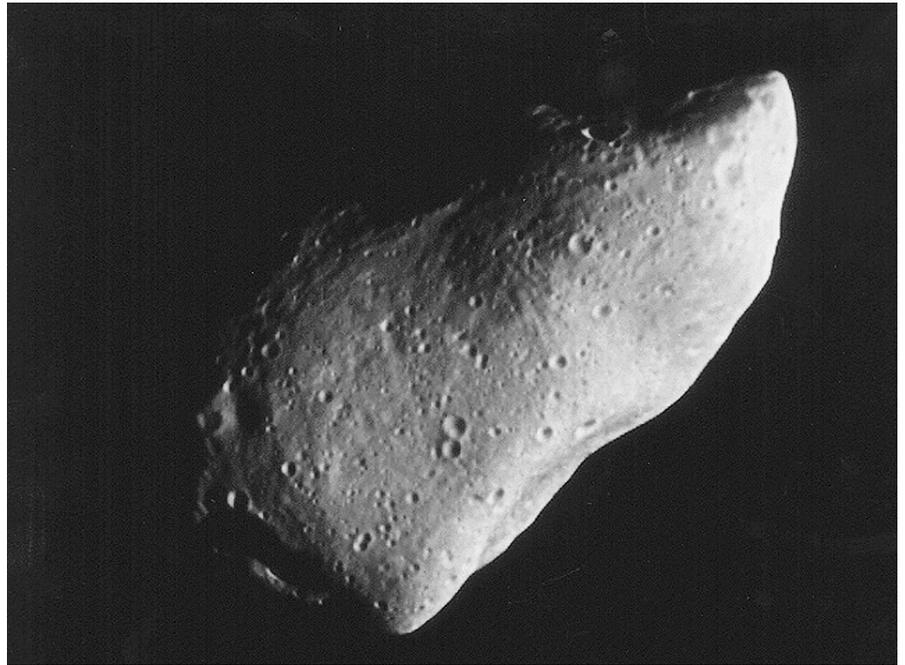
Gaspra et Ida font partie de la fameuse ceinture d'astéroïdes orbitant entre Mars et Jupiter, à l'emplacement où a échoué la naissance d'une petite planète en raison des forces gravitationnelles intenses de la planète géante jovienne. Toutefois, certains de ces astéroïdes (groupes Apollo et Amor) croisent régulièrement l'orbite de la Terre ou circulent à l'intérieur de celle-ci (objets Aten). L'astéroïde 1862 Apollo ( $\varnothing = 1,4$  km), qui a donné son nom au premier groupe, a été découvert en 1932 par l'astronome allemand Karl Reinmuth. L'astéroïde 1221 Amor ( $\varnothing = 1$  km) a été découvert en 1932 par l'astronome Eugène Delporte et a donné son nom au second groupe. L'astéroïde 2062 Aten ( $\varnothing = 0,8$  km) a été découvert en 1976 par Eleanor Helin et sa forme est caractéristique des astéroïdes orbitant à l'intérieur de l'orbite de la Terre. Les objets Apollo-Amor ont des distances de périhélie comprises entre 1 et 1,3 UA (une unité astronomique équivaut à la distance moyenne Terre-Soleil, soit environ 149 millions de kilomètres) et coupent régulièrement l'orbite terrestre à une distance inférieure à 1,08 UA.

On a déjà répertorié environ 7 000 astéroïdes mais on en découvre sans cesse de nouveaux depuis que des programmes de recherche, en particulier aux Etats-Unis, ont été mis en œuvre. Certains spécialistes ont d'ailleurs été entendus par des commissions du Congrès américain à propos des risques d'impact de ces objets avec la Terre. Le nombre de nouveaux objets découverts, mais n'ayant encore reçu aucune appellation, dépasse les 20 000. Les dimensions de ces corps s'échelonnent de presque 1 000 km, comme Cérès ( $\varnothing = 913$  km) découvert en

1801 par l'astronome italien Piazzi, à quelques centaines voire dizaines de mètres. Environ deux cents d'entre eux ont plus de 100 km, une dizaine de milliers ont une taille supérieure à 10 km et peut-être des millions se situent entre 500 m et 1 km. Selon la plupart des sources relatives aux astéroïdes, leur masse totale au sein du Système solaire ne dépasserait pas 3 % de la masse lunaire. Toutefois, nous estimons que ce chiffre devrait être révisé à la hausse et il ne nous étonnerait pas que des découvertes ultérieures fassent passer ce chiffre à 7 ou 8 % de la masse lunaire. Le chiffre résiduel correspondant à la masse d'astéroïdes encore en orbite et celle de l'hypothétique planétoïde avorté correspond également à la masse des impacts non cométaires, mais celle-ci est bien difficile à calculer !

Une autre caractéristique de nombreux astéroïdes, que ce soit aussi bien pour ceux de la grande ceinture que pour un nombre mineur d'objets Apollo, Amor ou Aten, réside dans le fait qu'ils se déplacent parfois en groupes avec la même distance par rapport au Soleil et des périodes orbitales similaires. Cela a été remarqué, pour la première fois, par l'astronome japonais Kiyotsugu Hirayama et ce dernier donna à ces groupes d'astéroïdes le surnom de « familles » afin d'exprimer l'existence d'un lien très fort entre eux, sans doute dû à leur origine. Cette caractéristique cadre parfaitement avec l'hypothèse selon laquelle de gros astéroïdes seraient entrés en collision dans le passé et que ces collisions auraient rejeté dans l'espace des fragments sur la même orbite. De nombreux théoriciens et spécialistes des astéroïdes se sont penchés sur les théories et les calculs d'Hirayama sans pouvoir les mettre en défaut. Néanmoins, ils ont observé une dissociation avec le temps du lien de ces fragments d'astéroïdes, dont la taille peut varier entre quelques mètres et quelques dizaines de kilomètres. Cette situation concerne moins les astéroïdes des catégories Apollo, Amor et Aten que ceux de la grande ceinture.

Le théoricien soviétique Victor Safronov a tenté d'expliquer la formation de cette grande ceinture. Selon lui, la période d'intenses bombardements de planétésimaux et de cométésimaux a produit entre Mars et Jupiter des objets résiduels, dont

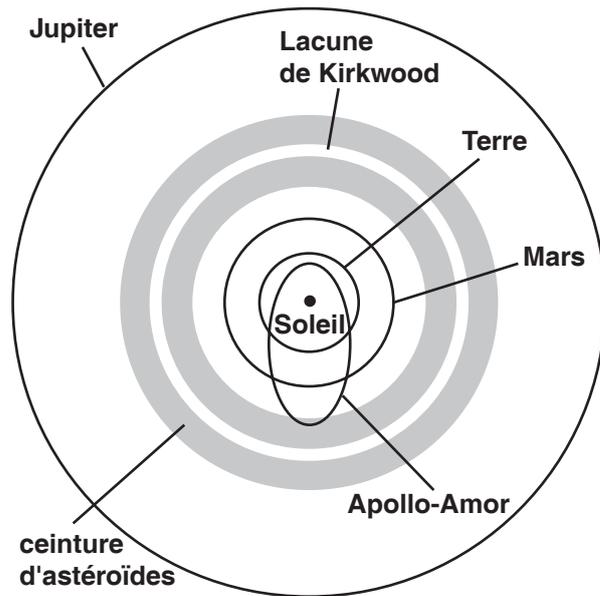


Ci-dessus, l'astéroïde 951 Gaspra et, ci-contre, l'astéroïde 243 Ida, accompagné d'un astéroïde satellite dénommé Dactyl.

le nombre est estimé à 400 000, qui n'ont pu s'agglomérer en planète en raison des forces gravitationnelles intenses de Jupiter. Toutefois, si ces forces ont pu jouer un rôle de maintien des astéroïdes dans cette zone, elles ont éjecté certains d'entre eux vers les parties internes du Système solaire et de nombreux phénomènes de collision ont fragmenté et expulsé des astéroïdes de cette zone. Certains d'entre eux seraient devenus les objets Apollo-Amor, même si d'autres théoriciens pensent que ceux-ci ne seraient que les noyaux de comètes dégazées et non le résultat de processus de collision. Cette grande ceinture est structurée en diverses composantes qui s'étendent sur des distances variant de 2 à 5 UA. C'est sur ce dernier point que pêche un peu la théorie de Safronov car ses contempteurs font remarquer que si sa théorie était exacte, on devrait avoir une répartition uniforme des différents types d'astéroïdes dans cette ceinture. Or il n'en est rien :

il existe une ceinture principale interne (située entre 2 et 3,3 UA), avec quelques endroits relativement vides appelés « lacunes de Kirkwood », et une ceinture externe (entre 3,3 UA et 5,2 UA, là où se trouve l'orbite de Jupiter) relativement faible en concentration d'astéroïdes à l'exception de 153 Hilda ( $\varnothing = 175$  km) et de 279 Thulé ( $\varnothing = 135$  km), tous deux découverts par l'astronome Johann Palisa à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle.

Grâce aux techniques particulières dont nous avons parlé, les scientifiques savent parfaitement analyser les spectres des astéroïdes par l'étude de la répartition des longueurs d'onde caractéristiques de la lumière visible et infrarouge, produisant des raies émissives ou des bandes spectrales spécifiques à la composition de leur surface. Ces différences spectrales ont permis, de même que l'analyse spectrale de météorites tombées sur Terre, de classifier les astéroïdes en un certain nombre de catégories. Il faut noter



**Emplacement de la ceinture d'astéroïdes.** Le théoricien soviétique Victor Safronov a tenté d'expliquer la formation de cette grande ceinture. Selon lui, la période d'intenses bombardements de planétésimaux et de cométésimaux a produit entre Mars et Jupiter des objets résiduels, dont le nombre est estimé à 400 000, qui n'ont pu s'agglomérer en planète en raison des forces gravitationnelles intenses de Jupiter.

toutefois que ces classifications sont variables selon les auteurs et qu'il n'y a pas unanimité sur cette épineuse et importante question de l'explication des bandes d'absorption des astéroïdes. Il y aurait en tout une quinzaine de types différents d'astéroïdes et le seul accord incontestable est que la classe S est la plus abondante et se caractérise par la présence de silicates agglomérés avec des métaux comme le fer et le nickel. Pour notre part, nous nous référons au système de classification du Jet Propulsion Laboratory (JPL) paru dans le document 82-41 dénommé *Extraterrestrial Processing* :

- Les chondrites ordinaires. Elles comprennent une forte proportion d'oxydes comme  $\text{SiO}_2$  (39 %),  $\text{MgO}$  (24 %),  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (14 %),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (2,8 %),  $\text{TiO}_2$  (0,1 %),  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , des métaux libres comme  $\text{Fe}$  (7 %),  $\text{Ni}$ ,  $\text{Co}$ , d'autres éléments comme  $\text{FeS}$  et  $\text{H}_2\text{O}$  (0,2 %).

- Les chondrites carbonées (ou type C). Elle concerne plus de la moitié de tous les astéroïdes et se compose d'oxydes comme  $\text{SiO}_2$  (28 %),  $\text{MgO}$  (20 %),  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (20 %),  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{Ni}$  (nickel à l'état libre), d'autres élé-

ments comme  $\text{FeS}$  (8 %), le carbone (2,4 %) et l'eau (13 à 20 %). Cette eau piégée au moment de la formation de l'astéroïde sera certainement d'un grand secours pour toutes les expéditions humaines visant à utiliser les ressources de ces petits astres étonnants.

- Les métalo-pierreux. Ils comprennent aussi des oxydes comme  $\text{SiO}_2$  (21 %),  $\text{MgO}$  (7 %),  $\text{FeO-Fe}_2\text{O}_3$  (7,5 %),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (4 %),  $\text{CaO}$  (2,8 %),  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiO}$ , une forte proportion de métaux libres comme  $\text{Fe}$  (48 %),  $\text{Ni}$  (4,4 %),  $\text{Co}$  (0,3 %), des éléments comme  $\text{FeS}$  (2,8 %) et  $\text{H}_2\text{O}$  (0,7 %).

- Les métalliques (ou type M). Ils sont presque exclusivement composés de fer (89 %) et de nickel (8 %). Nombre de spécialistes pensent qu'il existe dans cette catégorie de véritables blocs de fer et de nickel purs et il est fort probable que le fameux astéroïde de Sudbury (Canada), principal gisement de nickel au monde, a été créé par un impact de ce type d'astéroïde.

Il n'est pas inintéressant de souligner qu'un astéroïde composé de nickel pur ramené sur une orbite lunaire ou terrestre rapporterait plus

que la même masse composée d'or pur ! Certaines météorites, issues de la fragmentation d'astéroïdes, présentent également un profil particulier intrigant, avec des implications inattendues pour ce qui concerne la formation de la Lune. Il s'agit en l'occurrence de la météorite d'Allende, tombée en 1969 dans la région du Chihuahua au Mexique, et dont des fragments furent analysés par divers laboratoires choisis pour l'analyse des échantillons du programme lunaire Apollo. D'une masse supérieure à 1 t, la météorite d'Allende se révèle à l'analyse parsemée d'inclusions claires riches en calcium, aluminium, thorium, titane, uranium et en terres rares. Tous ces éléments sont des éléments réfractaires qui furent par la suite retrouvés dans les roches lunaires. Ces ressemblances entre les deux types d'objets conduisirent le scientifique américain Don Anderson (Caltech) à émettre l'hypothèse selon laquelle notre satellite se serait formé par agglomération de millions de petits objets de type Allende. Une théorie lunaire de plus...

## L'apport des astéroïdes à la conquête du Système solaire

Pour définir de façon rigoureuse, à partir d'une identification exhaustive des ressources de l'espace, les étapes d'une stratégie spatiale adéquate de colonisation du système Terre-Lune et les choix technologiques qu'elle implique, il est indispensable de mettre en évidence les écueils et les impasses à éviter. Les découvertes effectuées dans l'astronomie des petits corps et des astéroïdes ont complètement modifié les données relatives aux programmes de conquête spatiale envisagés dans les années 60 et 70. Ceux-ci concernent la colonisation de la Lune, celle bien sûr des astéroïdes, les perspectives offertes par l'installation de structures en orbite circumterrestre et cislunaire, les centrales solaires SPS, les villes de l'espace chères à Gerard O'Neill et, plus généralement, la prise en mains par l'homme de la conquête du Système solaire tout entier. Pour ce qui concerne l'implantation sur Mars, l'apport des astéroïdes ne

peut jouer qu'un rôle marginal du fait que la planète rouge possède en elle-même tous les ingrédients indispensables à un processus de colonisation. Par contre, toutes les technologies que l'on aura acquises grâce à l'utilisation des ressources des astéroïdes nous permettront également de nous implanter dans la grande barrière située entre Mars et Jupiter en construisant des cités mobiles, fonctionnant grâce à la fusion thermonucléaire, du type des Androcells de Krafft Ehrlicke. Il nous sera en outre possible d'établir des bases sur Ganymède et Callisto, deux satellites de Jupiter, de forer la carapace du satellite jovien Europa pour savoir si l'eau de son océan contient des micro-organismes (thèse des Américains Steven Squyres et Richard Hoagland), d'installer des bases sur les satellites de Saturne, sur Uranus et Neptune, avant de s'attaquer à Pluton et au nuage cométaire de Oort. D'ici là, on aura mis au point les moteurs de propulsion à fusion thermonucléaire, voire les moteurs à propulsion matière-antimatière qui rendraient possible les premiers voyages interstellaires à partir de bases situées précisément dans le nuage de Oort.

Bien avant ces étapes prestigieuses de la colonisation du Système solaire par l'homme, il nous faudra nous tourner vers les ressources des astéroïdes parallèlement à celles de la Lune. En effet, elles sont non seulement complémentaires à cause des éléments qui manquent à la Lune, mais peuvent aussi avoir des retombées majeures sur Terre, avant d'être compétitives avec les ressources lunaires pour la fourniture d'un certain nombre d'éléments, comme le pensait avec juste raison O'Neill. Dans les scénarios de colonisation lunaire datant des années 60 et 70 jusqu'au début des années 90, l'utilisation des ressources des astéroïdes était surtout envisagée pour fournir à la colonisation lunaire tout ce qui lui faisait défaut, à savoir l'hydrogène (7 g par tonne de matériau lunaire et amené par le vent magnétique solaire), l'azote et le carbone. En dépit de ces manques, il était généralement considéré que la Lune possédait des ressources énormes, comme l'hélium 3 (apporté par le vent solaire et piégé dans la régolite), l'oxygène, le fer, le titane, l'aluminium, le silicium sous forme d'oxydes, le chrome,

l'uranium, le thorium. Ces différents éléments se trouvent concentrés dans la croûte du fait que, sur la Lune, le processus de différenciation, qui tend à entraîner les éléments lourds vers l'intérieur, a été moins marqué que sur Terre à cause d'une plus faible gravité.

Les scénarios basés sur ces richesses ont été revus à la hausse depuis 1998 grâce à la sonde Lunar Prospector (lancée le 6 janvier 1998), laquelle a détecté aux pôles lunaires des neutrons d'hydrogène associés à l'oxygène dans de l'eau gelée située à quelques dizaines de centimètres sous la surface de notre satellite. Comme l'a souligné Alan Binder (responsable principal de la mission Lunar Prospector) : « *Je suis absolument convaincu que notre destin, en tant que civilisation, est d'aller dans l'espace et que nous coloniserons la Lune, Mars et peut-être d'autres planètes. [...] Tout ce que nous comptons faire sur la Lune sera facilité s'il y a de l'eau là-bas. [...] La présence d'eau gelée sur la Lune rend plus facile l'établissement d'une base lunaire par un facteur 100. L'eau est un facteur rendant la chose possible. L'eau est importante pour les systèmes d'alimentation en oxygène ainsi que pour extraire du carburant avec l'hydrogène et l'oxygène. La Lune devenant ainsi un entrepôt de carburant, la porte est ouverte pour l'exploration et la colonisation non seulement de la Lune mais aussi du Système solaire.* » La découverte d'eau sur la Lune – il y aurait 1,5 milliard de tonnes de glace d'eau à chaque pôle – change radicalement et favorablement les conditions d'implantation humaines et d'industrialisation en permettant de surmonter *in situ* un certain nombre de blocages. On pourra donc produire de l'oxygène et de l'hydrogène liquides pour les moteurs cryotechniques des vaisseaux en partance pour la Terre. L'économie lunaire sera grande consommatrice d'eau, en particulier les industries céramiques à base de silice et d'alumine qui devront répondre à une forte demande en orbite circumterrestre (blindages). Avant les découvertes effectuées par Lunar Prospector, l'économie lunaire, grande consommatrice d'eau, aurait été contrainte d'obtenir celle-ci par recombinaison électrolytique entre l'oxygène local (fort abondant et piégé dans les roches lunaires sous forme gazeuse) et l'hydrogène

importé à un coût élevé de la Terre et, mieux encore, des chondrites carbonées. Grâce à l'eau lunaire, il sera de plus possible de construire des citernes contenant de l'oxygène et de l'hydrogène liquides sur des orbites circumlunaires, géostationnaire (à 35 800 km de la Terre) ou circumterrestre basse. Par ailleurs, on assistera à un changement radical des conditions de mise en œuvre des industries cryotechniques qui bénéficient déjà du froid extrême des nuits lunaires, puisque la température peut y atteindre  $-183^{\circ}\text{C}$  (90 K) alors que l'oxygène se liquéfie à  $90,2\text{ K}$ . Quant à l'hydrogène, il se liquéfie à 70 K, ce qui demande une faible dépense d'énergie pour cette opération.

Ainsi, même si les astéroïdes ne sont plus d'actualité pour la fourniture d'eau à la Lune, il reste encore pour ceux-ci les marchés lunaires de l'azote et du carbone, et bien d'autres choses encore. L'azote moléculaire servira, en le combinant avec l'oxygène local, à la production d'air respirable pour les bases lunaires et à la fourniture d'engrais à base d'oxydes d'azote pour les plantes lunaires cultivées sous serre. Cette agriculture lunaire aura également besoin de carbone, de même que les industries chimiques faisant appel à des générateurs de plasma très consommateurs de cet élément. Importer l'azote et le carbone à partir de la Terre ne doit être qu'une solution provisoire. Pour des raisons politiques évidentes, il est impératif de ne pas faire reposer trop longtemps, une fois passé le cap des investissements de départ, le développement lunaire sur des importations de matières premières venues de la Terre, qui doit seulement fournir du matériel sophistiqué. Il faudra sans aucun doute que le développement lunaire puisse passer à un niveau d'ordre supérieur, contrairement à la stratégie lunaire envisagée par O'Neill selon laquelle le rôle de notre satellite se réduit à celui de simple mine d'extraction pour les éléments nécessaires à ses concepts de villes de l'espace. Certes, ceux-ci ne sont pas mauvais en soi mais seraient plus crédibles s'ils étaient intégrés dans une toute autre stratégie. Nous nous proposons de démontrer que ce problème des coûteuses importations disparaît dès lors que nous ne raisonnons plus en termes de ressources lunaires mais

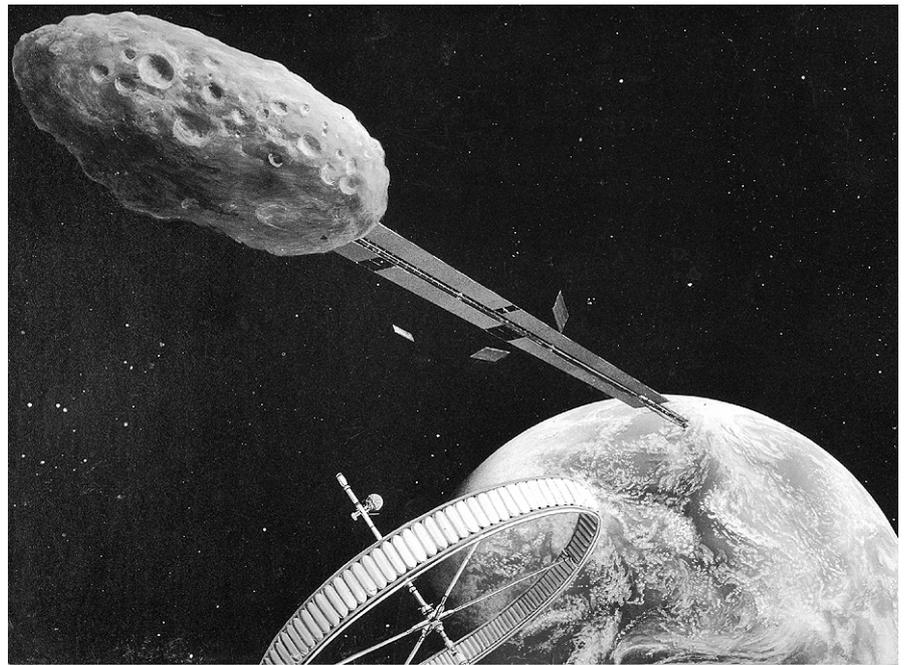
de ressources propres de l'espace, en étendant la notion d'espace utile à la colonisation des astéroïdes Apollo-Amor. Pour cela, nous définissons deux objectifs économiques :

- Une réduction du coût des premières implantations lunaires en amenant à partir de ces astéroïdes les éléments rares ou manquants sur la Lune, et cela très peu de temps après l'étape de débarquement lunaire massif proprement dit.

- La réalisation de bénéfices importants, dès la première implantation lunaire, par la création d'un nouveau moteur de développement spatial : l'importation sur Terre des éléments rares ou dont le coût est prohibitif sur notre planète mais qui existent en grandes quantités sur ces astéroïdes. Une partie des bénéfices ainsi réalisés (et qui pourraient aussi attirer des investisseurs privés) pourrait être affectée au programme lunaire et aider aussi au financement du programme d'implantation martienne que nous avons présenté dans un numéro de *Fusion* paru en 1996.

De notre point de vue, l'utilisation des ressources des astéroïdes Apollo-Amor, plus accessibles en termes de distance que ceux de la grande barrière, nous permettrait de gagner une bonne dizaine d'années par rapport aux meilleures options retenues pour l'industrialisation du système Terre-Lune (comme celle de Krafft Ehrlicke), et l'on raccourcirait d'autant l'étape de maturation du processus auto-cumulatif de croissance. Toutefois, l'un des plus grands défis sera sans doute de convaincre non seulement les politiques mais aussi un certain nombre de scientifiques, de l'impérative nécessité de l'effort à fournir... et il est absolument incompatible avec les réductrices fourches caudines du libéralisme. Le problème de la conquête de l'espace est éminemment politique même si nos « responsables » ignorent qu'un astéroïde de type métallo-pierreux de 1 km de diamètre peut contenir 7 milliards de tonnes de fer et 1 milliard de tonnes de nickel ! Sans compter également le cobalt, un tel type d'astéroïde pourrait satisfaire les besoins terrestres pendant trois mille ans en se basant sur les chiffres de la consommation actuelle.

Il est évident que si nous démultiplions les opérations sur ce type d'objet, il arrivera un moment où,



Accélérateur électromagnétique de masse transportant un astéroïde vers une orbite terrestre.

grâce à la baisse considérable des coûts, nous pourrions tout faire dans l'espace, sans peser sur les ressources terrestres : chantiers de construction de vaisseaux spatiaux gigantesques, centrales solaires SPS, usines spatiales de grande taille, grandes stations spatiales sept à huit fois plus grandes que l'ISS, cités de l'espace en rotation pouvant contenir plusieurs dizaines de milliers d'habitants, bases humaines dans les parties externes de notre Système solaire ainsi que d'autres applications encore inconnues car, même si le progrès technologique peut être orienté, on peut également avoir des invités inattendus...

### Les moyens et les stratégies à mettre en œuvre

Des centaines de milliers d'astéroïdes orbitent dans la ceinture située entre Mars et Jupiter mais, pour des raisons de distance, il sera plus intéressant de nous attaquer d'abord aux astéroïdes Apollo-Amor et Aten, malgré l'intervalle énergétique qui nous sépare d'eux en raison de l'excentricité de leur plan orbital par rapport à celui de la Terre. Cet intervalle énergétique nous rend

difficile à atteindre un grand nombre d'entre eux qui coupent pourtant régulièrement l'orbite terrestre à des distances relativement proches. Toutefois, certains de ces astéroïdes Apollo-Amor sont accessibles avec un Delta V propulsif se situant à la limite de ce que nous savons faire en matière de techniques spatiales. Nous en dressons la liste suivante en donnant entre parenthèses leur inclinaison en degrés sur l'écliptique : ce sont les astéroïdes 1976 UA (5,9), 1977 HB (9,4), Toro (9,4), 1973 EC (8,7), Eros (10,8), Adonis (1,4), Ivar (8,4), 1980 DB (1,2), Geographos (13,3), Quetzalcoatl (1,2) et Apollo (6,4). Sur ces onze astéroïdes, cinq d'entre eux peuvent être atteints par un vaisseau terrien au prix d'une trajectoire énergétiquement et économiquement comparable à une trajectoire lunaire. Il faudra donc se donner les moyens en termes de logistique et de propulsion, autrement dit se doter d'une politique spatiale digne de ce nom et encore plus ambitieuse que le programme Apollo.

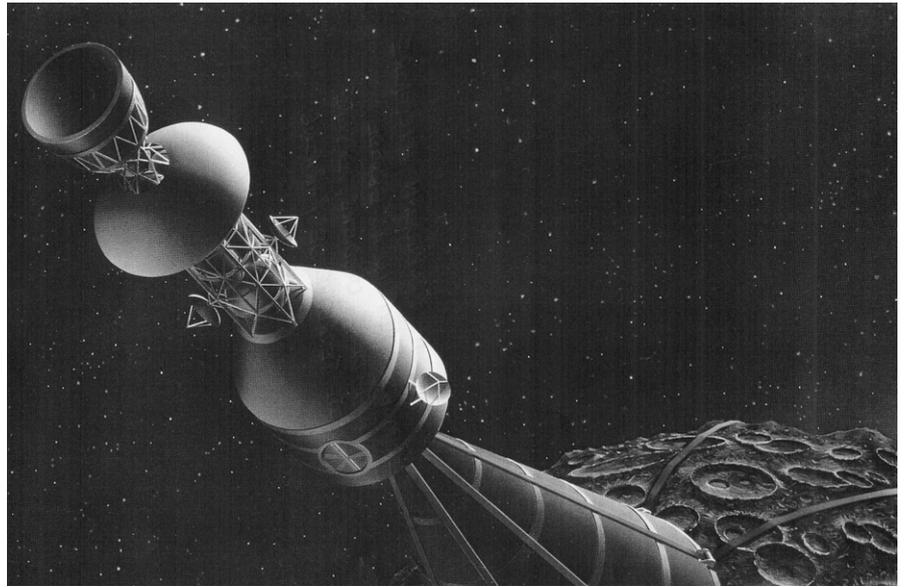
L'orbite particulière des candidats Apollo-Amor les plus intéressants nous oblige à raisonner sur les notions d'intervalle énergétique et de Delta V propulsif qui doivent être utilisés lors de « fenêtres » d'interception. En effet, tous les astéroïdes Apollo-Amor ont, pour des raisons d'inclinaison ou d'excentricité, une

phase de leur trajectoire orbitale au cours de laquelle ils sont plus accessibles à des vaisseaux venus de la Lune ou de l'orbite basse terrestre. Cette opportunité peut être utilisée au prix de savants calculs de temps et de trajectoires, comme l'ont fait les travaux des pionniers américains David Bender, R. Scott Dunbar, David J. Ross et Robert Salkeld. \*

Deux aspects sont à souligner. D'abord, ces études montrent que les ressources de certains astéroïdes peuvent être compétitives avec les ressources lunaires, confirmant sur ce point les analyses d'O'Neill et O'Leary. Ensuite, à part pour quelques astéroïdes à intervalle énergétique proche, il nous faudra renoncer à utiliser la propulsion cryotechnique (même avec des moteurs à méthane) pour nous tourner vers d'autres solutions, comme les accélérateurs électromagnétiques de masse et la propulsion nucléaire (nucléothermique ou nucléoélectrique) dans un premier temps, puis vers la fusion thermonucléaire qui nous permettra de réduire considérablement le temps des missions avec tous les avantages que cela comporte en matière de médecine spatiale. Rappelons qu'un des objectifs, mais pas le seul, consiste à utiliser les ressources des astéroïdes afin de fournir à la Lune les éléments qui lui manquent. Selon les ingénieurs américains Jesco Von Puttkamer et O'Leary, l'option Apollo-Amor s'impose dans un temps assez long à l'option ceinture d'astéroïdes. Cette dernière serait en fait intéressante dans le cas de concepts de propulsion révolutionnaires, une étape toutefois indispensable pour asseoir ultérieurement sur des bases solides la conquête du Système solaire.

Comme nous l'avons mentionné, la plupart des astéroïdes Apollo-Amor, proches en termes de distance mais pas toujours en termes énergétiques, ont comme particularité d'avoir des orbites extrêmement excentrées et parfois verticales par rapport au plan orbital terrestre : c'est le cas des « *Earth Grazers* » qui sont sans doute des noyaux de comètes dégazées. Pour atteindre ces objets, une mis-

\* Robert Salkeld est également connu pour avoir proposé des concepts de navettes lunaires révolutionnaires, dont nous avons parlé dans un article de Fusion paru en 2002 et consacré à la colonisation de la Lune.



**Un vaisseau à propulsion nucléaire, équipé d'un remorqueur et disposant d'une équipe d'astronautes habitués aux sorties extravéhiculaires, dépose à la surface de l'astéroïde toute une série de piolets reliés à des câbles. Une fois celui-ci attaché, il sera alors possible de l'immobiliser et de déposer à sa surface les équipements miniers semi-robotisés, d'y extraire l'hydrogène, l'eau et les métaux.**

sion devrait disposer, dans les cas les plus extrêmes, d'un vaisseau d'une puissance énorme pour atteindre le Delta V propulsif, lequel pourrait se situer jusqu'à 40 ou 50 km/s dans le cas d'une trajectoire Apollo-Amor verticale. Autre problème au moins aussi important, les astéroïdes Apollo-Amor se déplacent sur leurs orbites propres à des vitesses différentes de celle de la Terre (plus ou moins vite selon l'éloignement de l'astéroïde du Soleil pour notre planète). En conséquence, notre vaisseau devra franchir déjà deux fois cette différence pour les phases d'aller et de retour ainsi que modifier à deux reprises son orbite en dépensant un supplément d'énergie considérable pour passer du plan vertical moyen de notre système Terre-Lune à celui des astéroïdes, et inversement.

Sur le plan technique, il est évident que pour utiliser à un coût acceptable les ressources de ces astéroïdes, il faut utiliser des systèmes de propulsion adéquats et novateurs. Cet impératif reste toujours vrai même si, dans certains cas, il serait possible de diminuer la dépense énergétique et d'augmenter la masse d'emport par le biais de la gravité de Vénus selon la technique classique du levier gravitationnel, utilisée notamment par la sonde solaire polaire Ulysse à proxi-

mité de Jupiter. Il sera nécessaire de pouvoir amener sur place de grandes quantités de matériel de forage ou minier, offrir un confort de grande qualité aux astronautes qui participeront aux missions, posséder des tankers capables de ramener vers les bases en orbite lunaire ou terrestre les matériaux recherchés, emporter un important matériel robotique car le travail d'extraction se fera au prix d'une association homme-robot. De plus, il faudra choisir des solutions propulsives associées à des parties de vaisseaux en rotation, pour permettre une forme de gravité artificielle, tout en faisant les bons choix pour minimiser la durée de la mission.

Il n'est pas inutile de rappeler que le record de durée et de travail dans l'espace est détenu par le médecin et cosmonaute russe Valeri Polyakov, qui a effectué deux séjours sur la station Mir dont la deuxième (du 10 janvier 1994 au 22 mars 1995) lui a permis de devenir le détenteur incontesté du temps de présence humain dans l'espace avec 437 jours et 18 heures. Les résultats de cette expérience sont les suivants : un astronaute parfaitement entraîné peut s'adapter à un travail de longue durée dans l'espace ou dans une station, mais il y a une limite au-delà de laquelle il ne faut pas aller sous peine de

conséquences graves pour les organismes. Cette réalité incontournable nous interpelle quant à l'exploitation des ressources des astéroïdes et c'est pour cela qu'il est impératif, outre des mesures de gravité artificielle, de réduire les temps de mission par des solutions novatrices. Cet aspect du problème nous semble avoir été négligé lors de certains scénarios, imaginés notamment par O'Neill, pour ce qui concerne la solution de l'accélérateur électromagnétique spatial chargé d'assurer le transport aller-retour entre certains Points de Lagrange d'équilibre du système Terre-Lune (L4 et L5), où il souhaitait installer ses prodigieux projets de villes de l'espace, et la zone des astéroïdes située entre Mars et Jupiter, préférée, contrairement à O'Leary, aux astéroïdes Apollo-Amor.

O'Neill affirme à juste titre : « *Mesurée en termes d'énergie la distance entre L5 et les astéroïdes est presque exactement celle qui sépare L5 de la Terre.* » Cependant, il faut tenir compte du temps de poussée nécessaire sur lequel O'Neill ne s'étend pas trop longtemps, même s'il reste lucide sur la complexité des manœuvres à effectuer. Pour un ingénieur en astronautique, cet intervalle énergétique se mesure par les changements de vitesse qu'il faut opérer pour modifier le rayon de l'orbite et passer du plan de l'orbite de l'astéroïde à celui du système Terre-Lune. En moyenne, un astéroïde parcourt son orbite à la vitesse de 24 km/s. La Terre, plus proche du Soleil et par conséquent plus fortement attirée par lui, doit se mouvoir plus vite, à environ 30 km/s, pour ne pas tomber vers l'étoile. Que l'on aille vers un astéroïde ou que l'on en revienne, on doit franchir cette différence de 6 km/s. Il faut ensuite modifier sa vitesse pour compenser l'excentricité (défaut de circularité) de l'orbite de l'astéroïde. La plupart d'entre eux se déplacent dans des plans inclinés par rapport au plan de l'orbite terrestre (ou écliptique). Il faut enregistrer un changement de vitesse de 1,2 km/s pour chaque degré de l'inclinaison d'un plan sur l'autre. Si l'on recherche parmi tous ces astéroïdes ceux dont l'orbite est propice et si l'on calcule l'intervalle global qui les sépare de L5, on trouve presque dans tous les cas un chiffre avoisinant 10 km/s. L'intervalle de vitesse séparant la surface terrestre de L5 est tout à fait comparable puisqu'il

se situe à 11,4 km/s.

O'Neill, malgré ses qualités et ses talents de visionnaire, était obsédé par ses idées antinucléaires en matière de propulsion et ne croyait guère à l'énergie de fusion. Il ne faut pas s'étonner de ses choix en matière de propulsion, c'est-à-dire la solution de l'accélérateur électromagnétique spatial. Celui-ci est dérivé de l'accélérateur électromagnétique de masse envisagé pour envoyer les produits lunaires sur une orbite lunaire basse au moyen d'un incrément de vitesse de 1,7 km/s. En matière de colonisation et d'industrialisation des astéroïdes, la stratégie recommandée par O'Neill n'est pas idéale : elle pose problème pour son insertion correcte dans le processus de développement lunaire et il existe, de notre point de vue, des solutions plus porteuses et qui nous feraient gagner beaucoup de temps.

Le premier projet présenté d'accélérateur électromagnétique de masse spatial consistait en un véhicule de transfert orbital utilisant comme masse de réaction les matériaux concassés de l'External Tank de la navette, et en utilisant cet accélérateur électromagnétique comme étage supérieur au prix d'une architecture assez complexe. Le grand inconvénient du système, envisagé pour le transfert de matériel en orbite géostationnaire ou en orbite haute, est de polluer l'orbite basse et les plus élevées par des débris qui peuvent se révéler dangereux pour les missions spatiales. Autre inconvénient : du fait que les missions spatiales de navettes ne se produisent pas à intervalles proches et réguliers, le nombre de possibilités de lancement n'est pas très élevé et, de ce point de vue, reste moins intéressant qu'un vaisseau interorbital à propulsion chimique de type TUG. Déjà, à ce stade, apparaît une impasse technologique et économique même si elle ne remet pas en cause le principe de fonctionnement des accélérateurs électromagnétiques de masse pour d'autres vecteurs du développement spatial.

Dans son étude *Ames Summer Study on Space Settlements* (1976), la NASA a élaboré divers scénarios faisant appel à des accélérateurs électromagnétiques de masse pour mettre en œuvre les premières missions d'extraction des matériaux des astéroïdes. Les conclusions sont les

suivantes : les performances de ces accélérateurs pourraient nous permettre d'atteindre en six mois les objets Apollo-Amor offrant le plus faible intervalle énergétique, mais la plupart des missions sur des objets à intervalle plus élevé ne nous seraient accessibles qu'au prix d'une mission s'étalant de deux ans à trois ans. La même étude effectuant des investigations sur la conception de nouveaux équipements miniers, le traitement des éléments volatils et des métaux libres sur les astéroïdes eux-mêmes, en incluant toutes les variables et paramètres identifiés, concluait que l'option extraction à partir des astéroïdes était compétitive avec l'exploitation des éléments lunaires pour les usines spatiales et les centrales solaires SPS. Une autre conclusion était que les chondrites carbonées, même dans le cadre du système technique émergent, procureraient un avantage par rapport aux fournitures terrestres en matières premières comme l'azote, l'hydrogène et le carbone. Toujours selon le même document, il était prévu un scénario de développement d'un accélérateur électromagnétique de masse de 100 MW, assemblé dans l'espace avec environ 50 vols de la navette, et qui aurait été à la rencontre d'un astéroïde avec des propulseurs ioniques. L'objectif était d'extraire environ 22 % d'un astéroïde de 200 m de diamètre par le biais d'un accroissement de vitesse de 3 km/s au cours d'une mission de cinq ans. Tout ceci est fort déraisonnable car il nous faut une plus forte poussée et réduire le temps de voyage permis par ces accélérateurs dénommés MDRE (Mass Driver Reaction Engine) dans la nomenclature américaine. Il faut également éviter cette solution inconséquente d'utiliser un MDRE comme étage supérieur de la navette pour atteindre les astéroïdes les plus proches en termes énergétiques et de croire qu'il soit possible, par ces moyens, de commencer l'exploitation des astéroïdes avec un budget comparable à celui du programme Apollo. Il est également illusoire de penser, comme O'Neill, qu'il soit possible, toujours avec les mêmes moyens, d'exploiter de façon économique les matériaux des astéroïdes pour les habitats en orbite terrestre haute et les centrales énergétiques solaires.

Le problème fondamental de

↳ l'exploitation des richesses des astéroïdes se résume à quatre points :

1. Atteindre l'astéroïde visé dans le minimum de temps.
2. Extraire le maximum d'éléments intéressants de l'astéroïde, en bénéficiant d'un moyen de transport à grande capacité et assurant le coût au kilogramme le plus bas possible grâce à l'importance de la masse d'emport.
3. Autre solution : installer sur l'astéroïde un système de propulsion afin de le déplacer vers une orbite terrestre ou lunaire avant exploitation, en utilisant la masse de l'astéroïde par réaction au moyen d'un conducteur de masse.
4. Posséder un système de remorqueurs pour la phase départ vers l'astéroïde et la phase retour.

Ce dernier point a été bien vu par O'Neill mais son raisonnement pêche par le fait qu'il ne nous dit rien de la base (et des astronautes) d'où doit partir ce remorqueur pour la phase retour, ni des conditions de vie imposées à ces astronautes. Pour nos lecteurs, il convient de retenir que l'accélérateur électromagnétique, excepté pour les deux phases aller et retour de remorquage, fonctionne automatiquement dans l'espace pour le trajet qui va l'amener vers une installation dénommée SMF (Space Manufacturing Facility).

Sur le premier point, l'accélérateur électromagnétique spatial est bien moins performant qu'un vaisseau à propulsion nucléaire. En effet, certaines études montrent que, pour la même mission vers un astéroïde, il faudrait, avec un de ces accélérateurs, une durée de voyage aller-retour de deux ans et demi contre dix-huit mois, voire douze dans certains cas, à un vaisseau nucléaire (dont l'impulsion spécifique est de 900 s contre 450 s pour les meilleurs moteurs cryotechniques). Pour la phase retour, le vaisseau à propulsion nucléaire pourrait être alimenté par l'hydrogène trouvé sur l'astéroïde et liquéfié. Avant que la fusion ait été mise au point, il serait possible d'opérer avec des réacteurs de type NTR qui auraient, en outre, pour particularité de pouvoir fournir de l'électricité aux systèmes robotiques destinés à l'extraction et au traitement des matériaux des astéroïdes. En partant de nos connaissances actuelles, il faudrait un peu moins de dix ans de recherches pour aboutir à la mise au

point d'un tel réacteur, qui pourrait être disponible bien avant les débuts de la colonisation lunaire !

Sur le deuxième point, les deux systèmes se valent car leur capacité d'emport sera élevée dans un cas comme dans l'autre. Toutefois, le nucléaire présentera l'avantage de n'éjecter dans l'espace que l'hydrogène hyperchaud alors que le MDRE polluera sa route, aussi bien à l'aller (scories et déchets lunaires comme masse de réaction) qu'au retour (masse de réaction obtenue avec de la matière provenant de l'astéroïde) avec des petites pierres et de grosses poussières qui, pendant très longtemps, pourraient constituer un danger pour la navigation interplanétaire.

Sur le troisième point, ramener un astéroïde en orbite lunaire ou terrestre ou au SMF (qui devra traiter pendant un an au minimum 30 000 t de matériaux lunaires ou venus des astéroïdes), les critiques que l'on peut faire au MDRE sont les mêmes que pour le deuxième point. De plus, il serait facile d'installer des moteurs nucléothermiques à hydrogène ou même des moteurs nucléoélectriques pour pousser ces astéroïdes sur des orbites terrestres, après les avoir harponnés puis attachés avec des câbles. Ceux-ci pourraient devenir des sources de richesses telles qu'elles pourraient financer bon nombre de projets de colonisation lunaire et martienne, tout en amenant les éléments qui manquent à la Lune. Avec une politique audacieuse, nous pourrions faire beaucoup mieux et plus rapidement que la stratégie d'O'Neill, focalisée à l'extrême sur le fait que les premières expéditions vers les astéroïdes devraient attendre que les premières unités spatiales aient été installées à L5. Il est vrai que cette stratégie était concentrée sur ses concepts de villes de l'espace et de construction de centrales solaires SPS pour assurer la viabilité économique de ses cités.

Sur le quatrième point, l'avantage est incontestablement au nucléaire, pour les phases aller et retour, car il peut offrir à l'équipage des conditions de vie acceptables grâce à

\* Membres du groupe Apollo, comme Apollo lui-même, 2101 Adonis, avec un diamètre de 2 km, « perdu » en 1937 puis « retrouvé » en 1977, et 433 Eros, d'une masse de  $7 \times 16 \times 35$  km.

une partie rotative. Les barges de transport, qui pourraient atteindre 10 à 15 km de long, seraient d'abord construites avec des matériaux lunaires avant que le relais soit passé aux ressources des astéroïdes.

La colonisation et l'industrialisation des astéroïdes vont nous permettre également d'intégrer de nouvelles compétences dans notre stratégie de conquête de l'espace. Parmi les objets qui coupent régulièrement l'orbite terrestre à des distances proches \*, une de leurs caractéristiques va nous compliquer la tâche, à savoir que ces astéroïdes effectuent une rotation sur eux-mêmes en un peu plus de 4 h. Ceci constitue déjà un problème pour la phase de harponnage qui nécessite un très long câble afin que celui-ci ne soit pas trop tendu au point que la rotation de l'astéroïde n'entraîne sa rupture. Une des solutions possibles est qu'un vaisseau à propulsion nucléaire, équipé d'un remorqueur et disposant d'une équipe d'astronautes habitués aux sorties extravéhiculaires, dépose à la surface de l'astéroïde toute une série de piolets reliés à des câbles. Plus ceux-ci seront nombreux, mieux cela vaudra car l'astuce consiste, ici, à utiliser la rotation de l'astéroïde pour progressivement l'immobiliser en tirant dans le sens opposé à sa rotation. Une fois celui-ci attaché, il sera alors possible de l'immobiliser et de déposer à sa surface les équipements miniers semi-robotisés, d'y extraire l'hydrogène, l'eau et les métaux qui, à l'aide d'un four solaire, seraient séparés des minerais au sein desquels ils se trouvent. Pour effectuer ce type de mission, les vaisseaux à propulsion nucléaire seront plus efficaces que les accélérateurs électromagnétiques.

La colonisation du Système solaire repose sur trois piliers : l'industrialisation de la Lune, celle des astéroïdes et le nucléaire spatial. Ce dernier pourra, entre autres missions, faciliter cette industrialisation sans créer de dégâts pour l'environnement interplanétaire. Il apparaît clairement que si l'on renonçait à la propulsion nucléaire, la possibilité d'une présence humaine permanente dans l'espace ne serait guère envisageable qu'en orbite terrestre basse ou sur la Lune, et à un niveau limité. Dès lors, il serait présomptueux de parler sérieusement de conquête de l'espace. ■