

Smart-1 : une sonde européenne en route pour la Lune

C'est lors du Colloque de Padoue qui s'est déroulé en novembre 2000 pour célébrer le 400^e anniversaire de l'Académie Galileo des sciences, des lettres et des arts, qu'a été présentée pour la première fois une maquette grande nature de la future sonde européenne Smart-1. C'est au même moment que fut créée Lunex (Société des explorateurs lunaires) dont certains des membres les plus actifs (Bernard Foing, Giuseppe Racca, David Heather) sont précisément impliqués sur Smart-1 par le biais du centre de recherches Estec de l'Esa. Depuis le succès incontestable sur le plan scientifique des sondes Clementine et Lunar Prospector, Smart-1 sera la première sonde à reprendre le chemin de la Lune et son lancement est prévu pour décembre 2002 en tant que passager résiduel d'une charge utile Ariane 5. Elle sera suivie par deux sondes japonaises : Lunar-A (initialement prévue en 2002 mais qui sera en fait lancée en avril 2003) et Selene (lancement en 2004), plus sophistiquée que la précédente. Smart-1, qui n'a pas les mêmes ambitions scientifiques que les deux sondes japonaises, est la première composante du programme de l'Esa baptisé « Small Missions for Advanced Research in Technology ». Celui-ci a été mandaté

PHILIPPE JAMET

par l'Agence, sous l'impulsion de son ancien directeur scientifique Roger-Maurice Bonnet, comme apport à son programme scientifique, et cela dans le cadre de l'application de nouvelles technologies transférables à plusieurs types d'activités scientifiques spatiales. Parmi ces nouvelles technologies innovantes pour des missions scientifiques à venir figurent la propulsion électrosolaire, en l'occurrence un propulseur à plasma pulsé SPT (Stationary Plasma Thruster) et un propulseur électrique par effet de champ, ainsi que l'essai de roues de réaction miniatures pour la stabilisation de futurs microsattellites. Comme futures missions scientifiques devant utiliser ces technologies, on envisage des projets de sondes opérant dans l'espace lointain sur les parties externes du système solaire, vers des comètes et des astéroïdes ou à proximité du Soleil. Toutes ces missions demandent des accélérations de vitesse importantes que peuvent fournir des propulseurs électriques, à partir du moment où ils ont été préalablement placés hors du champ gravitationnel terrestre.

L'avenir des propulseurs électriques

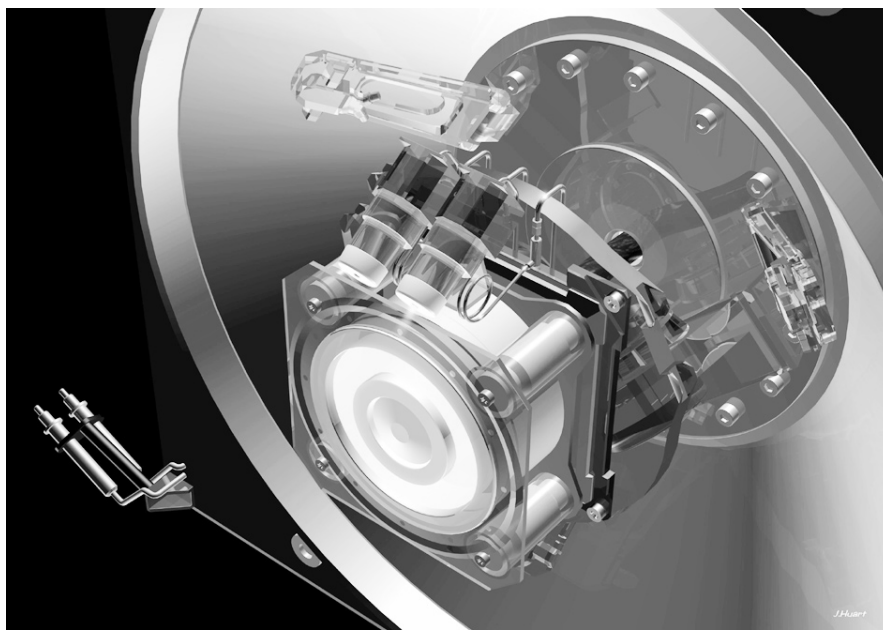
Le principe des propulseurs électriques désigne plusieurs catégories spécifiques de technologies de propulseurs faisant appel à une source électrique pour chauffer et accélérer un propergol ou un gaz par le biais de processus électrothermiques, électrostatiques ou électromagnétiques. La plupart des auteurs s'accordent à diviser la propulsion électrique en trois catégories :

- propulsion électrothermique (résistojets, arcjets) ;
- propulsion électrostatique (engins ioniques à grilles, moteur à effet de Hall, propulseurs à émission de champs) ;
- propulsion électromagnétique (propulseurs à magnétoplasma dynamique, propulseurs à plasma pulsé).

A chacun des processus en question correspond un type particulier de propulseur qui peut lui-même se diviser en plusieurs variantes, ayant des poussées ou des impulsions spécifiques différentes et adaptables à divers types de missions. De notre point de vue, il faut aussi tenir compte du nucléoélectrique car avec ce type de propulseur, selon

les estimations de l'ingénieur Ernst Stühlinger, on pourrait envoyer un vaisseau de 350 t vers Mars à partir d'une orbite terrestre.

Les pionniers en matière de propulsion électrique ont bien sûr été les Américains (programme Sert) mais plus encore les Russes (programme Yantar et Ion) qui ont diffusé leurs technologies SPT grâce aux travaux de la société Fakel et du professeur Morozov. Pour l'exploitation en Occident de la technologie SPT, Fakel a conclu un accord de joint-venture en 1993 dans le cadre de la société internationale ISTI associant Fakel, les Russes de Riame, les Américains Space Systems-Loral et ARC, et la SEP (qui deviendra Snecma Moteurs). En 1996, la SEP, toujours avec Fakel, a signé un accord de développement des technologies russes pour construire en France le propulseur à plasma au xénon SPT-Mark 2, puis le moteur plasmique PPS-1 350 qui, outre la sonde Smart-1, équipera aussi le satellite de télécommunications expérimental du Cnes « Stentor » (lancement par une fusée Ariane 5 prévu courant 2002). Depuis 1972, Fakel peut revendiquer un taux de succès de 100 % avec ce type de technologies qui ont surtout été utilisées pour le contrôle d'attitude des satellites géostationnaires et des satellites russes quasi polaires Meteor (propulseurs SPT-50 et SPT-70). Il est évident que la propulsion électrique qui sera utilisée sur la sonde lunaire Smart-1 (dans ce cas, il s'agit de propulsion plasmique) a un avenir immense. Elle ne servira plus seulement au contrôle d'attitude des satellites mais aussi à la mise à poste de ceux-ci en servant, en quelque sorte, d'étage supérieur, rôle qui était dévolu jusque-là à la propulsion chimique. Ce choix permettra un gain de masse de 300 à 500 kg pour des satellites dépassant les 3 t. Ces perspectives sont rendues particulièrement intéressantes si l'on sait, par exemple, que selon une étude publiée en 1998 par Arianespace, les satellites de plus de 5 t représenteront à partir des années 2005-2006 un peu plus de 20 % des lancements de satellites géostationnaires. Pour la mise à poste de ceux-ci lors de la phase ultime d'ascension vers leur orbite finale, Dominique Valentian et Christophe Koppel de Snecma Moteurs croient beaucoup à la propulsion électrique car elle aura



La sonde Smart-1 avec son système de propulsion électrique. Smart-1 est notamment équipé d'un propulseur PPS 1350 issu de technologies russes développées en commun par les firmes Fakel et Snecma Moteurs.

aussi comme avantage de limiter pour ces satellites l'emport d'ergols encombrants, lesquels augmentent la masse, pénalisent la charge utile et réduisent la flexibilité.

Le satellite expérimental de télécommunications Artemis (Advanced Research Technology Mission) offre un exemple prospectif et inattendu de ce que nous venons d'affirmer. Lancé le 12 juillet 2001 par une fusée Ariane 5 pour être conduit vers l'orbite géostationnaire, le satellite a été victime d'un dysfonctionnement du moteur à poudre Aestus de l'étage supérieur du lanceur, et s'est retrouvé parqué sur une orbite trop basse. Artemis possède bien évidemment un moteur à propergols chimiques mais il a aussi deux moteurs électriques Rita (expérimentés auparavant sur la plate-forme de microgravité Eureka), ainsi que deux moteurs ioniques au mercure, tous prévus pour le contrôle du positionnement nord-sud et est-ouest et le contrôle d'attitude. Le moteur à propergols chimiques a permis de rehausser l'altitude de l'orbite jusqu'à 31 000 km et d'une durée de 24 h, alors que l'orbite atteinte avait un périégée de 590 km pour un apogée de 17 487 km. L'Esa a conçu un plan de sauvetage en quatre étapes visant à récupérer la mission et à amener

progressivement Artemis sur l'orbite prévue. Pour passer d'une orbite de 31 000 km à une orbite de transfert géostationnaire (GTO) inclinée sur 2° pour un périégée de 858 km et un apogée de 35 853 km, il faudra utiliser son système de propulsion ionique au xénon qui n'était pas initialement prévu pour cette tâche. A partir de cette orbite GTO, les propulseurs ioniques au xénon d'Artemis, après téléchargement de nouvelles instructions informatiques de rehaussement d'orbite au prix d'une utilisation totale de 20 kg de xénon, entraîneront le satellite sur une orbite en trajectoire spirale qui le conduira sur l'orbite géostationnaire. Ensuite, on procédera à la recette du satellite, c'est-à-dire activer l'ensemble des appareillages et vérifier s'ils fonctionnent normalement. Alors qu'il n'est pas encore sur l'orbite géostationnaire, et que sa durée de vie devra être revue à la baisse à cause de l'usage imprévu d'ergols et de xénon, le satellite vient au cours du mois de novembre 2001 d'enregistrer un premier succès, en transmettant par liaison optique laser avec le satellite Spot-4 des images par le système Silex (Semi Conductor Laser Intersatellite Link Experiment). Ces images ont ensuite été transmises à la station de récep-

tion de Spot Image située à Toulouse. Artemis a pour point commun avec Smart-1 l'acquisition du fonctionnement de nouvelles technologies de pointe en orbite ou dans l'espace lointain.

Il est certain que la généralisation des systèmes de propulsion électrique va dans le sens d'une réduction des coûts des lancements et de la masse des satellites, et plus encore vers une augmentation de la durée de vie des satellites et des sondes scientifiques. Un bon exemple nous en est donné par la sonde américaine Deep Space 1, dotée d'un système de propulsion par moteurs ioniques, qui a survolé plusieurs astéroïdes comme l'astéroïde 1992-KD puis, en septembre 2001, la comète Borelly. La sonde a en principe terminé sa mission mais fonctionne toujours grâce à ses moteurs ioniques, son système de panneaux solaires à arséniure de gallium et phosphore d'indium, et ses batteries au lithium. La Nasa envisage même de la réutiliser pour d'autres missions si les crédits nécessaires lui sont accordés.

Dans un tout autre d'ordre d'activités, celui de la mise à poste de satellites géostationnaires, la Snecma et Fakel travaillent actuellement à la conception d'un système de propulsion plasmique dénommé « SPT High Power », destiné à servir d'étage supérieur au lieu des étages chimiques conventionnels. Certaines variantes de SPT High Power pourraient servir à la propulsion de sondes opérant dans l'espace lointain.

La mission de Smart-1

Smart-1 est une petite sonde puisqu'elle ne pèse que 350 kg et, de ce fait, pourra être lancée en même temps qu'un gros satellite de télécommunications. La sonde est installée sur une plate-forme trois axes et lorsqu'elle se sera libérée pour être placée sur son orbite primitive, bien avant le transfert vers la Lune, deux panneaux solaires d'une envergure de 14 m seront déployés dans l'espace. Ce sont ces panneaux, générant 1 850 W, qui alimenteront le système de propulsion électrique de Smart-1 – un moteur plasmique PPS-1 350 dit à « effet de Hall », issu de la technologie russe SPT. Le rôle de ces pan-

neaux explique pourquoi le système de propulsion de la sonde est aussi appelé SEPP (Solar Electric Primary Propulsion) puisque ceux-ci serviront également pour l'alimentation de la petite charge utile scientifique de la sonde. Certes, celle-ci n'est pas importante en masse mais d'un niveau scientifique élevé. Comme le dit Giuseppe Racca, responsable du projet Smart-1 à l'Estec : « *Cette mission permettra d'expérimenter de nouveaux moyens de propulsion et de navigation dans le système solaire. Le véhicule spatial affrété à cet effet emportera également à son bord des instruments de conception inédite qui permettront d'obtenir des cartes inédites de la composition du sol, de la topographie et des ressources de la Lune.* »

Smart-1 détonne de ce que l'on fait habituellement car la trajectoire qui va l'amener vers la Lune n'est pas une orbite directe mais fait plutôt penser à une fronde effectuant des mouvements de plus en plus grands, s'éloignant puis revenant en direction de la Terre, avant de repartir pour s'éloigner encore davantage, pour finir sur une trajectoire qui va la mettre en orbite lunaire après un long cheminement d'environ douze mois. De ce fait, le système de propulsion électrique de Smart-1 servira aussi de test pour ses composants en ce qui concerne la résistance à un environnement caractérisé par de sévères radiations. Etant donné que la trajectoire d'échappement située dans sa partie la plus proche de la Terre ne s'effectuera qu'au prix d'un lent déplacement, la sonde sera amenée à traverser de nombreuses fois ce type d'environnements (Ceintures de Van Allen). Une fois la Lune atteinte au niveau orbital, la sonde se circularisera autour de notre satellite en principe pour une durée de six mois, extensible si le décident les experts de l'Esa. Il faut souligner que les Européens ont envisagé une large palette de possibilités pour Smart-1. Même si le niveau relativement faible du budget alloué a conduit à rechercher les solutions les plus économiques, cela n'empêche pas un programme à objectifs multiples. En effet, il a même été envisagé de survoler des astéroïdes et des noyaux cométaires dégazés dénommés « géocroiseurs », comme ce notamment fut le cas pour les NEO (Near Earth Objects) 1996XB27, 1993BX3,

1989ML, et les comètes Tempel 2 et Haneda Campos.

Pour ce genre de missions, le Delta-V peut être de 36 km/s et acquis à partir d'un moteur électrique ou, mieux encore, par un propulseur électromagnétique. Cette dernière technologie n'est toutefois pas encore totalement maîtrisée. Les Européens pensaient un moment à un lancement par une fusée Rokot, un ancien missile stratégique russe reconverti en lanceur civil. Rokot peut placer une charge utile de 1 900 kg sur une orbite basse de 200 par 200 km. A partir d'une telle orbite, il aurait été possible de placer un vaisseau de 350 kg comme Smart-1 sur une trajectoire parabolique d'échappement à l'influence du champ gravitationnel terrestre. On aurait pu aussi envoyer Smart-1 vers les Points de Lagrange L4 ou L5, après capture par l'orbite elliptique lunaire. Dans l'éventualité d'un survol de NEO à partir d'une orbite de transfert géostationnaire où la sonde lunaire aurait été placée grâce à un lanceur Ariane 5, la charge utile atteindrait un maximum de 10 kg et la durée de la mission dépasserait deux ans et demi. Dans le cas d'un survol avec un NEO, tel qu'il a été envisagé avec un lanceur Rokot, la masse de la charge utile varierait selon les objets choisis entre 15 et 20 kg. Le temps minimum de cette mission serait environ d'un an et demi.

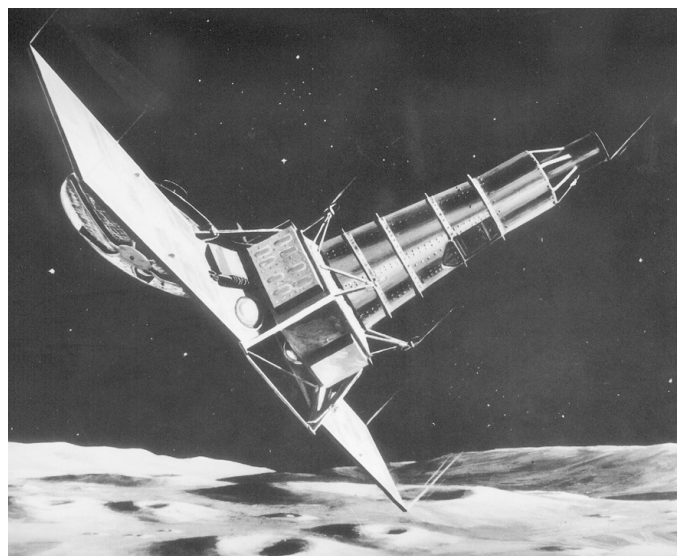
Pour Smart-1, dont la mission sera exclusivement centrée sur la Lune, même si l'observation ultérieure de géocroiseurs ne peut être totalement écartée, l'orbite lunaire visée est une orbite polaire de 1 000 par 10 000 km. En dépit de son caractère novateur, Smart-1 ne va pas révolutionner nos connaissances sur la Lune comme l'ont fait Clementine et Lunar Prospector mais les fera avancer tout de même pour deux raisons.

D'abord, les scientifiques européens ont eu accès aux données des deux sondes américaines grâce auxquelles ils ont pu composer un programme de recherches très poussé visant à répondre à un certain nombre d'interrogations sur l'évolution passée de notre satellite. Bernard Foing et David Heather, qui sont les chevilles ouvrières de Smart-1, soulignent que Lunar Prospector a effectué une cartographie de la distribution des éléments clés de la Lune en faisant appel à un spec-

tromètre à rayons gamma. Certains spécialistes envisagent la possibilité que la Lune soit riche en éléments réfractaires (thorium et uranium) en comparaison à la Terre. La Lune primitive était chaude et molle avec un océan global de magma. Le processus contribua à emporter dans les profondeurs les éléments lourds (riches en fer et en titane) tandis que les éléments les plus légers flottaient à la surface et formèrent l'ancienne croûte. Les éléments lourds remontèrent à la surface pour former des mers de basalte qui sont assez abondantes sur la face visible de notre satellite. Le fait que le fer et le titane lunaires soient particulièrement abondants dans les mers semble confirmer l'hypothèse d'un impact géant et d'un océan de magma. Parmi les mystères lunaires auxquels devra s'attaquer Smart-1 figurent les fameux « mascons », anomalies gravitationnelles découvertes à l'époque du programme Apollo. Lunar Prospector en a découvert plusieurs inconnues jusque-là et les données recueillies par son magnétomètre tendent à faire penser que le cœur de la Lune aurait entre 220 et 450 km et qu'il ne serait pas très dense, ce qui tend encore ici à corrélérer l'hypothèse de l'origine de la Lune à la suite d'un impact géant avec la Terre.

Ensuite, la masse des appareils scientifiques embarqués ne dépasse certes pas 15 kg mais ils sont très sophistiqués. En tenant compte des missions passées, ces instruments permettront d'effectuer des observations astrophysiques lors de la trajectoire vers la Lune. Ne l'oublions pas, outre une cartographie lunaire et une étude par spectromètres, le principal objectif de Smart-1 est de valider des technologies qui seront utilisables pour d'autres missions : système de propulsion PPS 1350, système de cellules en « cascade » disposées sur les générateurs photovoltaïques des panneaux solaires, batteries Li-C, système de communication novateur.

Smart-1 est doté de nombreux instruments scientifiques issus de technologies avancées : une caméra miniature à haute résolution (AMIE) pour une imagerie de la surface lunaire, un spectromètre point par point dans le proche infrarouge (IR) pour des investigations minéralogiques, un spectromètre à rayons X très compact (D-CIXS) avec un



Vers la fin des années 60, les ingénieurs de l'Onera Marchal et Le Grives effectuèrent des recherches poussées sur la propulsion électrique

nouveau type de détecteur qui permettra une certaine forme de spectroscopie et une imagerie de la composition des éléments de la surface de la Lune.

La charge utile inclut aussi l'expérience Kate qui a la charge de démontrer un nouveau concept de télémétrie et de télécommunications dans les bandes X et Ka, une expérience de radioscience (RSIS), une expérience d'optique spatiale faisant appel à un rayonnement laser (Laser-Link Experiment) et utilisant la station Esa de Ténériffe, et la validation d'un système autonome de navigation. Les expériences de science lunaire de Smart-1 incluent aussi des analyses des processus chimiques à l'aide d'un système d'imagerie. Les investigations scientifiques de Smart-1 sur la science lunaire incluent aussi des études sur la composition chimique et l'évolution de la Lune, des processus géophysiques (volcanisme, tectonique, cratérisation, érosion, dépôts de glaces et d'éléments volatils), un programme de planétologie comparée et des études haute résolution pour la préparation des étapes futures d'exploration lunaire. La mission s'intéressera par ailleurs aux processus de formation à l'origine du système Terre-Lune. La maîtrise d'œuvre de la sonde a été confiée à la firme suédoise Swedish Space Corporation.

Outre ses aspects proprement scientifiques et de démonstration technologique, l'importance de la mission Smart-1 réside principalement dans la préparation de futures missions plus ambitieuses,

en particulier orientées vers l'espace lointain et demandant un Delta-V important auquel peut répondre la propulsion électrosolaire avec une poussée continue. Parmi les projets possibles auxquels s'intéresse l'Esa figurent des missions de sondage de la banlieue solaire ainsi que des missions solaires stéréo faisant appel à plusieurs sondes opérant simultanément : dans ce cas, le Delta-V se situe entre 30 et 40 km/s. On peut aussi envisager des missions extra-écliptiques pour l'étude de certains astéroïdes ou noyaux cométaires avec un Delta-V variant de 36 à 45 km/s, des missions vers les planètes extérieures qui impliquent un Delta-V de 50 km/s si l'on n'utilise pas la technique du levier gravitationnel. L'Esa envisage également des missions d'astronomie interférométrique et utilisera certaines des technologies développées sur Smart-1 pour sa sonde mercurienne Beppi Colombo. Celle-ci combinera la propulsion électrique avec l'assistance gravitationnelle de la Lune, de Vénus et de Mercure. Elle sera équipée d'un système de propulsion électrosolaire SEPM, doté d'un réseau solaire délivrant 6 à 10 kW à une distance d'une unité astronomique. La même technologie sera utilisée pour la mission Lisa (Laser Interferometer Space Antenna), un projet de l'Esa dont l'un des objectifs est la détection des ondes gravitationnelles émises sur basses fréquences par des trous noirs massifs. Lentement mais sûrement une innovation technologique majeure est en train de bouleverser les techniques spatiales. ■