

NOUVEAUX MOTEURS NUCLÉAIRES POUR L'ESPACE

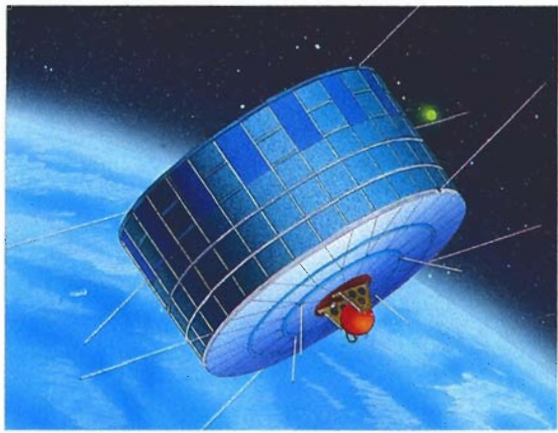
Vingt-quatre satellites soviétiques sont propulsés par des moteurs nucléaires. Les Américains, eux, étaient prêts à aller encore plus loin en construisant des lanceurs nucléaires. Et puis, ils y avaient soudainement et mystérieusement renoncé. Or, tout dernièrement, ils viennent de reprendre l'étude du nucléaire spatial, parce que les photopiles ne donnent décidément pas satisfaction.

● Voici quelques mois, les Etats-Unis ont annoncé le démarrage d'un programme d'études pour la réalisation d'un réacteur nucléaire de 100 kilowatts. Pourquoi si peu alors que les réacteurs des centrales actuelles atteignent parfois des puissances 14 000 fois supérieures ? Parce que ce réacteur baptisé SP-100, sera "portable". Il est conçu pour les stations orbitales et les sondes spatiales que la NASA prévoit de lancer dans la décennie 90 et au-delà de l'an 2 000.

Les militaires sont ici associés aux civils, car une source d'énergie compacte et durable diminuerait la vulnérabilité de leurs satellites en cas de conflit spatial. Les panneaux de photopiles qui alimentent actuellement en électricité la plupart des satellites artificiels (en rechargeant des batteries-tampons) sont très fragiles.

En fait, il s'agit de la relance de recherches entreprises depuis le programme *Apollo* il y a une vingtaine d'années. On sait depuis longtemps que les photopiles ne conviennent pas aux sondes spatiales qui doivent aller au-delà de Mars. A la distance de Saturne, par exemple, l'intensité lumineuse reçue du Soleil vaut seulement 1 % de ce qu'elle est près de la Terre. La sonde *Mariner 9*, par exemple, qui fut la première à se mettre en

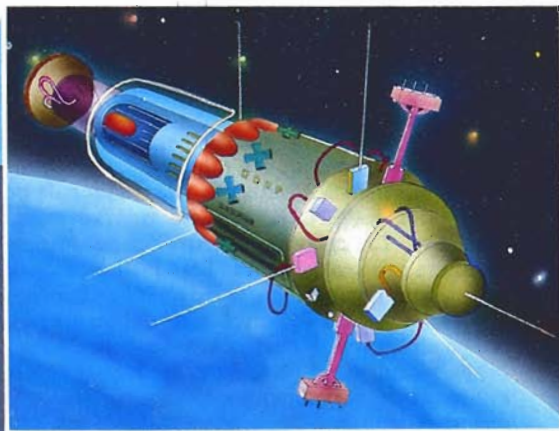
(suite du texte p. 24)



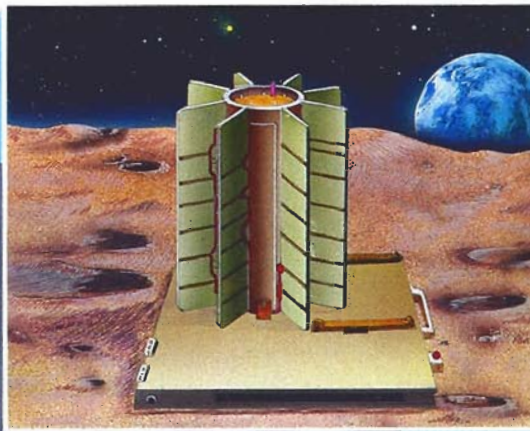
TRANSIT (U.S.A.), équipé d'un générateur nucléaire SNAP de 3 W.

Dessin I. Correia

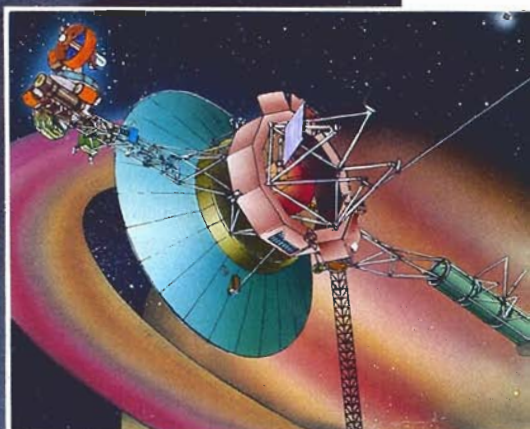
Les moteurs nucléaires équipent déjà de nombreux satellites, car les panneaux de photopiles sont fragiles et d'un faible rendement quand on s'éloigne du Soleil.



COSMOS (U.R.S.S.), équipé de réacteurs "Romachka" de 1 kW, puis à partir de 1977, de réacteurs "Topaze" de 10 kW.



ALSEP (station lunaire, U.S.A.), avec générateur SNAP 27, de 70 W.



VOYAGER (U.S.A.), avec générateur SNAP de 130 W.

SATURNE

MARS

VIKING (U.S.A.), équipé d'un générateur SNAP de 70 W.



Des générateurs nucléaires à cœur solide les remplacent déjà. Bientôt ce sont de véritables centrales nucléaires "mobiles" que l'on enverra dans l'espace.

orbite autour de Mars, en 1971, possédait quatre panneaux solaires totalisant 8 m². Les quelque 38 000 cellules photovoltaïques de ces panneaux fournissaient 800 watts autour de la Terre, mais seulement 400 W près de Mars, et n'auraient plus délivré que 10 W au niveau de Saturne. Pour obtenir 1 kW équivalent à la distance de cette

LES GÉNÉRATEURS RADIO-ISOTOPIQUES AMÉRICAINS		
NOM	PUISSANCE ÉLECTRIQUE (W)	UTILISATION
SNAP-3	2,7	Transit
SNAP-5		Transit
SNAP-9 A	25	Transit
SNAP-27	70	Alsep
SNAP-11	25	Surveyor
SNAP-RTG	130	Voyager

dernière, il faudrait 2 millions de cellules solaires et 300 m² de panneaux porteurs !

Sur la lune, où la nuit dure deux semaines, il ne pouvait également être question d'alimenter par photopiles, même en rechargeant des batteries, les appareils scientifiques des stations ALSEP (Apollo Lunar Scientific Experiment Package) déposés lors des missions *Apollo*. Ces stations, tout comme les sondes *Viking* posées sur Mars, ou les *Pioneer* et les *Voyager* voguant à travers le système solaire lointain, furent donc dotées de générateurs électriques d'un type entièrement différent.

LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES SOVIÉTIQUES		
CARACTÉRISTIQUES	ROMACHKA	TOPAZE
Matière fissile	²³⁵ U	²³⁵ U
Type réacteur	Rapide	A modérateur
Température	1 750 °C	1 550 °C
Rendement	2 %	12 %
Refroidissement	Par radiateur	Par métal fondu
Poids total réacteur	508 kg	550 kg
Charge d'Uranium	49 kg	49 kg
Dimensions réacteur (diamètre x hauteur)	60 x 70 cm	28 x 26 cm
Puissance thermique	40 kW	85 kW
Puissance électrique	800 W	10 kW

Il s'agit de générateurs radio-isotopiques, qui tirent leur énergie de la conversion nucléothermique. En clair, cela signifie qu'ils convertissent en électricité, au moyen de diodes spéciales, dites thermo-ioniques, la chaleur dégagée par la désintégration lente de quelques dizaines de grammes de matière radioactive, plutonium et strontium notamment. Ces générateurs, les Américains les ont expérimentés depuis longtemps déjà (voir tableau en haut), puisqu'ils ont commencé par en équiper leurs satellites de navigation *Transit*, au début des années 60. Ces générateurs, baptisés "SNAP" (System for Nuclear Auxiliary Power) sont légers (une dizaine de kilos), peu encombrants (moins de 50 cm dans leur plus grande dimension), et d'une grande sûreté de fonctionnement en raison du nombre réduit de pièces qui les composent. Toutefois, leurs puissances sont faibles : 3 W

seulement pour le SNAP 3 du premier satellite *Transit*, en juin 1961, 25 W pour les SNAP 11 des sondes lunaires *Surveyor*, 70 W pour les SNAP 27 des stations lunaires *ALSEP*, et 130 W pour ceux des sondes *Voyager*, qui en emportaient trois chacune.

Pour des puissances supérieures, il faut de véritables réacteurs nucléaires, c'est-à-dire des mini-centrales atomiques mobiles. Le rendement, qui est inférieur à 2 watts par kilogramme de poids total pour les SNAP, dépasse 6 W/kg pour les réacteurs. Là encore, les Américains furent les premiers : ils envoyèrent le SNAP 10-A, satellisé à titre expérimental en avril 1965. Puissance : 650 W. Mais cette expérience ne déboucha pas sur la généralisation des réacteurs nucléaires en orbite ; seuls peut-être, leurs nouveaux satellites militaires de surveillance océanique SSU et OPS en possèdent-ils.

On sait par contre avec certitude que les Soviétiques (voir tableau ci-contre en bas) utilisent des réacteurs nucléaires pour alimenter le puissant radar qui équipe les *Cosmos* de surveillance océanique. Ces satellites, à partir de 1967, furent d'abord équipés de réacteurs du type "Romachka", délivrant 1 kW de puissance. Puis, à partir de 1977, ils ont été remplacés par un nouveau modèle, le "Topaze", qui ne délivre pas moins de 10 kW. C'est précisément cette gamme de puissance que visent les Américains avec leur futur réacteur SP-100.

L'espace circumterrestre s'encombre donc progressivement de matières radioactives : plutonium 238, strontium 90 et curium 242 pour les SNAP et uranium 235 enrichi à 90 % pour les Romachka et Topaze soviétiques. Il n'est pas question, bien sûr, de ramener sur Terre ces engins, sous peine de pollution radioactive. La technique consiste à les placer sur des orbites suffisamment hautes, de manière à ce que leur chute, sous l'effet de l'inévitable freinage atmosphérique, n'intervienne pas avant plusieurs siècles. Les éléments radioactifs ont alors le temps de perdre de leur intensité, compte tenu de la période (1) des éléments utilisés. Les *Transit* américains circulent entre 800 et 1 200 km d'altitude, les SSU entre 1 100 et 1 400, les *Cosmos* entre 900 et 1 000 km. Les satellites soviétiques, au contraire des satellites américains, sont d'abord placés sur une orbite basse, ce qui permet au radar de balayer les océans avec une plus grande finesse. Après quoi, au terme d'un temps de service qui ne dépasse jamais cinq mois, un moteur-fusée incorporé est mis à feu pour les expédier sur une orbite nettement plus élevée, qui leur assure une durée de vie de l'ordre de 5 siècles. La radioactivité du réacteur se trouve alors réduite au millionième de sa valeur initiale.

Quant aux générateurs radio-isotopiques de stations ALSEP déposées dans les mers lunaires, ils ne dérangent personne, pas plus ceux des sondes *Surveyor* et *Viking*, ou des *Pioneer* et *Voyager* qui, sur les traces de *Pioneer 10*, vont

(1) La période est le temps que met un élément pour voir sa radioactivité baisser de moitié : 90 ans pour ²³⁸Pu, par exemple.

quitter le système solaire dans quelques années pour filer vers les étoiles.

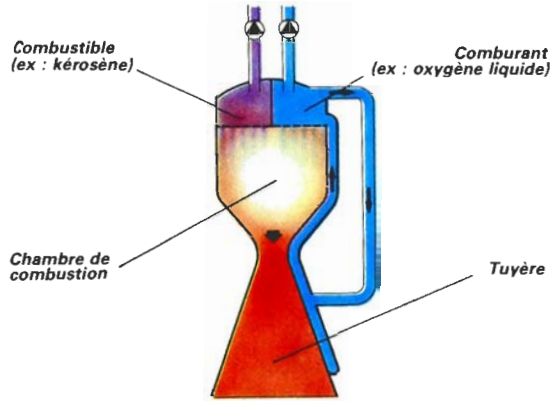
L'atome sera aussi utilisé, dans un avenir plus ou moins proche, pour la propulsion des fusées. Les fusées à propergols chimiques sont en effet condamnées pour les futures missions spatiales humaines à travers le système solaire. Pour expédier des vaisseaux spatiaux de plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines de tonnes vers Mars, par exemple, il faudrait au départ de la Terre des engins monstrueux, inconstructibles. La fusée géante *Saturn V* qui emporta des hommes vers la Lune dans le cadre du programme *Apollo*, ou le mystérieux lanceur "G" que les Soviétiques semblent sur le point de lancer après 15 années de déboires pour transporter les tronçons de leur future grande station spatiale, représentent le maximum possible en ce domaine : entre 3 000 et 5 000 t au décollage, pour satelliser quelque 150 t en orbite basse (entre 5 et 3 %).

Sur le plan du rendement, la navette spatiale est ce qui se fait de mieux en matière de propulsion chimique. Le couple cryogénique oxygène-hydrogène liquide qu'elle utilise permet en effet de satelliser 100 t pour un poids au décollage de 2 000 t, soit 5 %. Il ne sera guère possible d'aller au-delà car l'éventail des propergols utilisables a été complètement exploré ; seul le remplacement de l'oxygène par le fluor permettrait de faire un peu mieux, mais les inconvénients posés par son utilisation (toxicité des résidus de combustion, et difficultés de manipulation) ne compense guère le faible gain en performances.

L'amélioration des performances d'une fusée passe, soit pas l'augmentation de son rapport de masse (ce qui revient à diminuer le poids mort, donc à alléger les structures), soit par l'accroissement de la vitesse d'éjection des gaz de combustion. Or, nous l'avons vu, le couple oxygène-hydrogène fournit la vitesse d'éjection la plus élevée (de l'ordre de 4,5 km/s), et le rapport de masse a été abaissé au plus bas avec la navette.

Un moteur-fusée nucléaire permettrait de tripler les performances d'une fusée chimique, en triplant aussi la vitesse d'éjection. Le principe de son fonctionnement (voir schéma ci-dessous) est très

simple : par la chaleur qu'il dégage, le cœur d'un réacteur nucléaire à uranium enrichi réchauffe un fluide qui vient à son contact, avant d'être éjecté par une tuyère. Alors que, dans une fusée chimique (**ci-dessous**), c'est la matière propulsive (propergols) qui est la source d'énergie ; ici les deux sont dissociées, et l'on est donc libre du choix



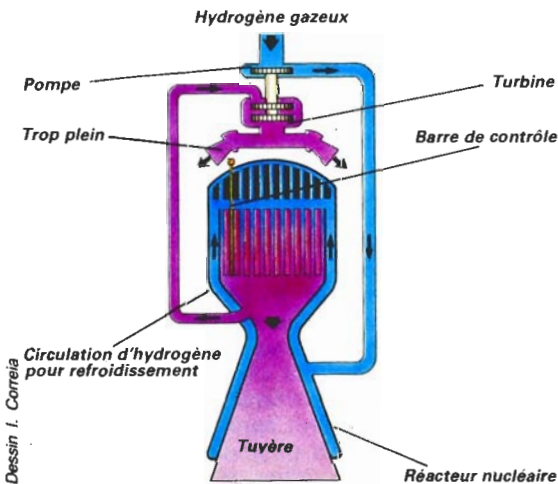
de la matière éjectée. Il suffira de choisir celle qui a la plus faible masse moléculaire, car la vitesse d'éjection est inversement proportionnelle à la racine carrée de cette masse moléculaire.

Le propulsif idéal, pour un réacteur nucléaire, c'est donc l'hydrogène, de masse moléculaire 2 ; il n'y a pas de masse plus faible. Dans une fusée chimique, cet hydrogène doit être associé à de l'oxygène, jouant le rôle de comburant, faute de quoi il ne pourrait pas brûler dans le vide. La masse moléculaire du couple atteint alors 18. Le rapport entre la racine carrée de 2 et celle de 18 est de 3 très exactement : voilà pourquoi, tout en utilisant également de l'hydrogène, un propulseur nucléaire permettra de tripler la vitesse d'éjection.

La fusée nucléaire n'a cependant pas que des avantages. Car le réacteur et des blindages (indispensables si l'on se place dans le cas d'un vaisseau spatial habité) sont très lourds. On perdra donc partiellement, par un mauvais rapport de masse, ce que l'on avait gagné avec la vitesse d'éjection.

En outre, la réserve d'énergie quasiment inépuisable du réacteur n'est pas aussi avantageuse qu'il y paraît, car elle n'est utile que lorsqu'il y a de la matière à éjecter. Entre deux phases propulsives les produits de fission continuent à se désintégrer en dégageant de la chaleur, et il faut continuer à refroidir le réacteur pour éviter qu'il ne se détériore ; la consommation de fluide de refroidissement pourrait ne pas être négligeable.

Il faut aussi compter avec les problèmes de protection contre les rayonnements libérés par le réacteur : rayons gamma primaires des produits de fission, et rayonnements gamma secondaires provenant du blindage principal, d'où de nouvelles servitudes de poids. Une solution intéressante consisterait à utiliser le volumineux réservoir d'hydrogène liquide comme écran absorbant, entre le réacteur et le vaisseau des astronautes. Mais comment faire en fin de mission, lorsque le



Dessin I. Correia

réservoir sera vide ?

Sur un plan purement technique, il faut savoir aussi que pour obtenir les vitesses d'éjection annoncées ci-dessus il faut chauffer l'hydrogène aux environs de 3 000 °C. Il convient donc d'utiliser pour le réacteur des matériaux résistant à de telles températures ; seuls les carbures de tantale et de zirconium, alliés à des matériaux composites réfractaires, pourraient convenir, mais ils ne permettraient guère de dépasser 2 000 °C. Dans ces conditions, la vitesse d'éjection serait ramenée aux environs de 9 km/s, et les performances, en

la firme General Dynamics recevait un premier contrat d'un million de dollars pour les études de faisabilité. Deux autres tranches de crédit furent attribuées jusqu'en août 1959 (soit une moyenne mensuelle de 100 000 dollars).

En 1963, la NASA fut associée au projet, et demanda à General Dynamics de s'orienter vers la possibilité de propulser ainsi un vaisseau spatial habité ! Mais le projet Orion prit fin en octobre de cette même année 63, après la signature du traité interdisant les expériences nucléaires dans l'espace. Car pour le reste tout allait bien : Roy

LES SATELLITES SOVIÉTIQUES DE SURVEILLANCE OCÉANIQUE DOTÉS DE RÉACTEURS NUCLÉAIRES

NOM DU SATELLITE	DATE DE LANCEMENT	ORBITE INITIALE (PÉRIGÉE/APOGÉE EN km)	ORBITE FINALE (PÉRIGÉE/APOGÉE EN km)	INCLINAISON EN DEGRÉS	DURÉE DE VIE OPÉRATIONNELLE EN JOURS
Cosmos 198	28/12/67	265/281	888/950	65,1	
Cosmos 209	22/3/68	250/282	879/928	65,3	3
Cosmos 367	3/10/70	246/264	921/1018	65,3	
Cosmos 402	1/4/71	261/279	968/1010	65,0	
Cosmos 469	25/12/71	259/276	929/1028	64,5	10
Cosmos 516	21/8/72	256/277	932/1013	64,8	31
Cosmos 626	27/12/73	257/280	913/978	65,4	44
Cosmos 651	15/5/74	256/276	892/947	65,0	71
Cosmos 654	17/5/74	261/277	931/1000	65,0	74
Cosmos 723	2/4/75	256/277	905/958	64,7	44
Cosmos 724	7/4/75	258/276	865/935	65,6	66
Cosmos 785	12/12/75	259/278	901/1012	65,1	1
Cosmos 860	17/10/76	252/265	904/1017	64,7	24
Cosmos 861	20/10/76	251/265	924/995	64,9	60
Cosmos 952	16/9/77	252/265	923/979	64,9	22
Cosmos 954	18/9/77	251/265	Retombé	64,9	Retombé après 128 j.
Cosmos 1176	29/4/80	260/265	898/940	64,8	135
Cosmos 1249	5/3/81	251/264	893/982	65,0	106
Cosmos 1265	21/4/81	248/267	913/943	64,9	8
Cosmos 1299	24/8/81	251/265	914/977	65,1	13
Cosmos 1365	14/5/82	259/276	900/962	65,1	
Cosmos 1372	1/6/82	258/277	926/959	64,9	
Cosmos 1402	30/8/82	254/279	Retombé	65,0	Retombé après 146 et 159 j.
Cosmos 1412	2/10/82	255/280	890/997	64,8	

définitive, ne seraient plus triples mais seulement doubles de celles des propulseurs chimiques.

Pour faire mieux il faudrait renoncer aux réacteurs nucléaires classiques, transférant leur chaleur au flux gazeux qui les traverse et réaliser un réacteur dont le cœur lui-même serait gazeux, les produits de fission chauffant alors directement le gaz à éjecter. Mais alors, comment empêcher ce gaz d'emporter avec lui les matériaux fissiles ? Peut-être en l'animent d'un mouvement de rotation créateur d'une force centrifuge (voir dessin ci-contre). On a été jusqu'à envisager de faire exploser en chapelet des bombes A placées à l'arrière du véhicule spatial, un écran absorbant l'énergie émise pour propulser le vaisseau par réaction... Idée digne de la science-fiction. Pourtant, les Américains ont bel et bien étudié un tel projet, classé "Secret défense", sous le nom de code "Orion". L'idée en fut émise dès 1955 par le Dr Stanislas Ulam, du célèbre laboratoire de Los Alamos, où fut précisément étudiée la première bombe atomique américaine. Trois ans plus tard,

Johnson de l'ARPA (Agence pour les projets de recherche avancés) confia quelques années plus tard qu'une expérimentation allait avoir lieu avec des explosifs chimiques, et que l'on serait passé aussitôt à une expérimentation avec de vraies bombes A... C'est tout à fait vraisemblable quand on sait que, quelques mois auparavant, les Etats Unis avaient fait exploser deux bombes nucléaires au-dessus de l'île Johnston, dans le Pacifique, dans le cadre du projet "Starfish".

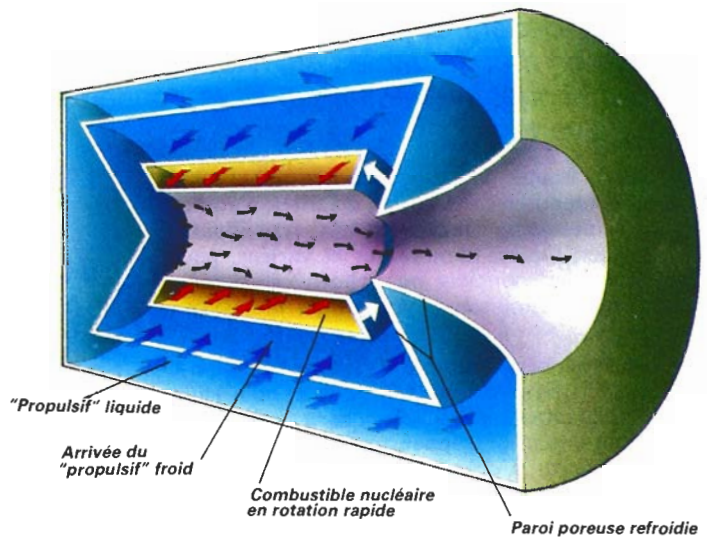
Parallèlement à cet audacieux projet Orion, les Américains étudièrent d'autres possibilités d'utiliser l'énergie nucléaire pour la propulsion spatiale. En 1959, alors que les satellites artificiels se comptaient encore sur les doigts de la main, débutèrent les essais d'un petit réacteur baptisé "Kiwi", du nom d'un oiseau de Nouvelle-Zélande qui ne peut voler, car il est dépourvu d'ailes... Nom de baptême prophétique s'il en fut, car un quart de siècle plus tard, après avoir absorbé un milliard de dollars, les programmes de moteurs-fusée nucléaires américains n'ont toujours pas

débouché sur une réalisation concrète...

Le Kiwi constituait la première étape du projet "Rover", dont l'ambition était d'aboutir au "Nerva", un propulseur opérationnel qui aurait pu expédier des hommes sur Mars avant la fin du siècle.

Les essais eurent lieu à Jackass Flats, terrain d'essai grand comme la moitié d'un département français, en plein désert du Nevada. En octobre 1960, après la série d'expériences réussies, la NASA entre en piste et passa un contrat avec l'AEC (Atomic Energy Commission) pour la livraison en 1967 d'un moteur Nerva opérationnel. L'agence spatiale prévoyait de l'utiliser comme troisième et dernier étage de sa fusée géante Saturn V, qui dans cette configuration aurait pu expédier vers Mars un vaisseau spatial de 26 t. Utopie ? Pas du tout. Ce projet fantastique a bel et bien été envisagé, à une époque où le programme

Dans le réacteur nucléaire à cœur gazeux, l'uranium enrichi est en phase gazeuse, et traversé par le propulsif (hydrogène par exemple). L'hydrogène liquide est envoyé dans la double paroi, vaporisé, puis injecté tangentiellement au corps cylindrique qui contient le mélange gazeux mis en rotation. Il le traverse et arrive dans la tuyère à une température qui atteindrait plusieurs fois celle d'un réacteur ordinaire. La force centrifuge doit s'opposer à l'entraînement à l'extérieur du combustible nucléaire lui-même. Ce projet étudié dès 1955 au laboratoire de Los Alamos a finalement été abandonné en 1973, à deux ans du but.



Apollo n'avait même pas encore démarré officiellement...

Mais des difficultés sont apparues lorsqu'il fallut passer du Kiwi A au Kiwi B (qui, une fois opérationnel, serait devenu le Nerva), c'est-à-dire d'une puissance de 200 à 1 100 mégawatts. A titre de comparaison, 1 100 MW représentent la puissance d'une grosse centrale nucléaire terrestre ! Il fallut deux ans pour régler les problèmes techniques, et à la fin de l'été 1964 le moteur-fusée nucléaire fonctionnait. Il pouvait même être arrêté puis remis à feu, condition indispensable pour la réalisation de manœuvres dans l'espace. La construction d'un modèle de vol fut alors immédiatement entreprise, pour conduire au moteur Phœbus 1, version améliorée de l'ex-Nerva. En février 1966, Phœbus 1 fonctionna pour la première fois de façon autonome, comme étage de fusée, car jusqu'alors le moteur était alimenté par des réservoirs fixés au sol. Une poussée de 25 t fut obtenue pendant 30 minutes, durée encore jamais atteinte par un moteur-fusée quelconque. Certes,

une poussée de 25 tonnes-force peut apparaître comme relativement faible (c'est à peine la moitié d'un moteur du premier étage d'Ariane) mais l'important est ce que les spécialistes appellent l'impulsion spécifique, c'est-à-dire l'énergie totale fournie : la poussée multipliée par le temps, en quelque sorte. L'objectif, avec Phœbus 1, était d'arriver à 34 t de poussée pendant 40 minutes, mais il n'était pas question de rendre opérationnel un tel propulseur avant 1975. Ce retard de huit ans était sérieux, mais pas dramatique.

Parallèlement, débuta la mise au point d'un Phœbus 2 dont la poussée devait atteindre 90 tonnes-force. Le président Johnson, qui comme son prédécesseur John Kennedy était un fervent défenseur de la conquête spatiale, donna son appui personnel à ce programme de propulseur nucléaire qui, après Apollo, aurait permis de réaliser des programmes de vols habités encore plus auda-

cieux. Faire débarquer des astronautes sur Mars apparaissait encore, à l'époque, comme une opération réalisable avant l'an 2000.

Puis, sans que l'on sache vraiment pourquoi, le programme nucléaire américain s'est trouvé ralenti, et finalement arrêté, en 1973, à deux ans du but. Choix délibéré ? Contraintes budgétaires ? Problèmes techniques insurmontables ? Nul ne le sait. Depuis maintenant dix ans on ne parle plus de propulseurs nucléaires aux Etats-Unis, alors qu'ils paraissent si prometteurs, les essais déjà réalisés ayant confirmé la possibilité de doubler les performances des fusées à propulsion chimique.

Pourquoi ces programmes ont-ils été arrêtés ? Reprendront-ils un jour ? Deux questions qui attendront peut-être longtemps une réponse. Il n'en reste pas moins que l'atome aura de plus en plus sa place dans l'espace, ne serait-ce qu'à bord des futures stations orbitales géantes. Car les usines du cosmos seront très gourmandes d'énergie.

Pierre KOHLER ■