

Beste de savoir

L'énergie nucléaire dans l'espace

12 août 2019

Table des matières

1.	Description rapide	3
1.1.	Les piles à radio-isotopes	3
1.2.	Les réacteurs nucléaires	3
2.	Historique	4
3.	Les piles à radio-isotopes	5
3.1.	Puissance d'une pile	6
3.2.	Conversion de la chaleur en électricité	9
3.3.	Sécurité	9
3.4.	Production de Pu-238	9
4.	Les réacteurs spatiaux	10
4.1.	Des nouvelles contraintes	10
4.2.	Certaines solutions	11
5.	Quelques systèmes auxiliaires	13
5.1.	Transformation d'énergie de radiation en énergie utilisable	13
5.2.	Propulseurs électriques	15

Avoir accès à une forme utilisable d'énergie dans l'espace est vital. Il en faut pour la propulsion de la fusée ou la correction de l'orbite d'un satellite, pour alimenter les appareils de mesure ou encore pour chauffer les zones habitables. Il est donc vital de réfléchir au meilleur moyen de fournir cette énergie. À l'heure actuelle, dans la majorité des cas, la propulsion est assurée par des combustibles liquides tandis que l'apport en électricité est garanti par des batteries ou des panneaux solaires.

Cependant, la durée de vie des batteries en utilisation est très limitée et l'intensité des rayons solaires diminue avec le carré de la distance au Soleil (Figure 1). Un autre problème est que pour les dispositifs sur -ou en orbite autour d'- un astre, les panneaux subissent l'alternance jour-nuit, et ont même un risque de [se retrouver à l'ombre de manière permanente](#) [↗](#). Dès lors, pour des missions loin du Soleil et de longue durée, ou même des missions plus proches mais pour lesquelles une puissance élevée est requise, il faut trouver une autre solution. En gardant à l'esprit que le coût de l'envoi est grandement déterminé par le poids, le nucléaire semble être une proposition logique.

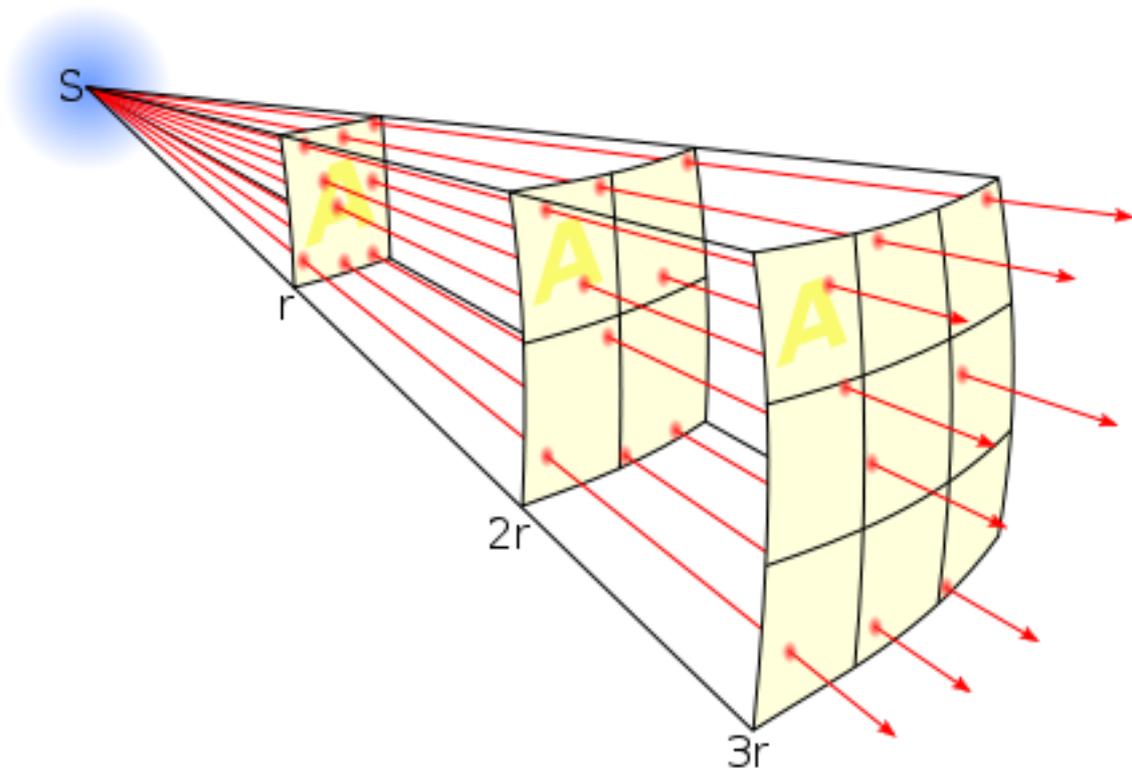


FIGURE 0. – Figure 1 : Variation de l'intensité des rayonnements solaires en fonction de la distance au Soleil. Paternité : Borb. Licence CC-BY-SA 3.0

En effet, la densité d'énergie du nucléaire est la plus élevée que l'on sache récupérer de nos jours (quelques comparaisons ont été faites par les membres de ZdS [ici](#)), et il est possible de créer des systèmes qui fonctionnent en continu pendant des décennies. Que l'on utilise la radioactivité naturelle ou la fission contrôlée, les conditions extérieures telles que la température ou la pression ont une influence quasi-nulle.

La NASA a identifié un certain nombre de missions pour lesquelles l'énergie nucléaire serait souhaitable ou même nécessaire :

- bases lunaire et martienne ;
- exploration des lunes de Jupiter et Saturne ;
- ramener des échantillons de comètes et d'astéroïdes sur terre ;
- explorer la [ceinture de Kuiper](#) .

Dans le reste de cet article, vous allez apprendre tout ce qu'il vous faut savoir ! Que vous demandiez quelles ont été les étapes historiques amenant à l'utilisation de l'énergie nucléaire dans l'espace aux différentes utilisations de cette dernière, vous découvrirez tout ! La dernière partie pourrait être vue comme une sorte d'annexe, qui présente quelques systèmes nécessaires, sans toujours être directement nucléaires.

1. Description rapide

L'énergie d'origine nucléaire peut venir de quelques systèmes différents, rapidement détaillés ici pour aider à la compréhension de la partie suivante.

1.1. Les piles à radio-isotopes

Les éléments radioactifs se désintègrent naturellement. Ce faisant, ils émettent des rayonnements α , β et γ qui en interagissant avec la matière vont produire de la chaleur. Les piles à radio-isotopes utilisent les éléments les plus radioactifs -typiquement l'isotope 238 du plutonium- pour produire de l'électricité à partir de cette chaleur. On peut noter que bien que le Pu-238 soit très radioactif en comparaison du C-14 ou du K-40, ou même des isotopes les plus courants de l'uranium, il existe des éléments qui possèdent des isotopes beaucoup plus radioactifs, comme le curium. La manière dont le choix est fait est détaillée plus loin.

i

Le plutonium, curium et les autres actinides encore plus lourds ne sont pas présents à l'état naturel, avec de très rares exceptions. Ils sont créés par absorption d'un neutron par l'uranium-238.

L'avantage de ce système est qu'il va produire de la chaleur dans n'importe quelles conditions extérieures, sans la moindre interruption, pendant des décennies. L'inconvénient est que sa production d'électricité est limitée par la masse du matériau radioactif et par la capacité à transformer ou évacuer la chaleur produite avant que la température ne soit trop élevée. Le fait que la production soit continue et ne puisse pas être arrêtée est parfois aussi un inconvénient.

1.2. Les réacteurs nucléaires

Il y en a ici deux types principaux.

- Ceux qui sont utilisés pour fournir de l'électricité. Cette électricité peut être par la suite réservée pour un approvisionnement des différents systèmes à bord, ou pour alimenter un propulseur électrique. L'avantage de ce système est que la production en électricité est relativement élevée, et qu'elle peut être maintenue sans arrêt pendant des années. Ça permet par exemple une trajectoire plus directe dans l'espace, au lieu d'essayer d'utiliser les champs gravitationnels pour déterminer le passage du vaisseau, et du coup, des temps de vols plus courts. La puissance produite n'est toutefois pas suffisante pour quitter l'attraction terrestre.
- La même chose peut être dite des réacteurs dont la chaleur est utilisée directement pour chauffer du gaz et se déplacer en l'émettant. L'avantage de ce système est que l'efficacité du système réacteur/propulseur est plus élevée si l'on peut éviter une conversion en énergie électrique au milieu. Par contre, il ne peut pas être utilisé pour fournir de l'électricité aux autres engins et appareils à bord. On peut aussi noter que le gaz éjecté peut, selon les schémas, être radioactif.

Quelques projets un peu plus exotiques ont existé et sont mentionnés dans la partie suivante.

2. Historique

L'idée d'utiliser l'énergie nucléaire pour fournir de l'énergie dans l'espace est presque aussi vieille que la découverte de la dite énergie. Le premier réacteur à avoir été envoyé dans l'espace était le [SNAP10A-FS4](#) , en 1965. Il a fonctionné 43 jours à une puissance de 550W (plus ou moins l'équivalent de la consommation d'un ordinateur moderne) avant de subir une avarie dans son système électrique.

Depuis, les États-Unis et le bloc soviétique ont travaillé sur un nombre de projets. Dans les années 60, les USA se sont concentrés sur l'augmentation de la puissance électrique et de la durée de vie dans les projets [SNAP-8](#) , [SNAP-50](#) (1200kWe) et plus tard le projet SNAP-100 (3 ans à 100 kWe). Ces réacteurs n'ont jamais été envoyés dans l'espace, et certains d'entre-eux n'ont même pas été testés sur Terre. Les réacteurs de la famille SNAP avait pour but de fournir de l'électricité. Pour la propulsion, le programme s'appelait [NERVA](#) , et se reposait sur le principe de chauffer de l'hydrogène avant de l'éjecter.



Vous vous demandez sûrement, et légitimement, ce que représente un We.



C'est l'abréviation pour un watt électrique. C'est donc une unité de puissance, et le terme "électrique" est en opposition au terme "thermique". Un réacteur produit de la chaleur (puissance thermique) qui est transformée en électricité (puissance électrique) avec un facteur entre 30 et 40% pour les réacteurs terrestres, un peu moins pour les réacteurs spatiaux.

L'URSS s'est quant à elle concentrée sur les réacteurs plus modestes, avec une durée de vie maximale d'environ un an et une puissance limitée à 5kWe. Cette ambition plus limitée lui a permis de réussir à envoyer 34 réacteurs dans l'espace pendant les années 70 et 80 (32 [Bouk-RORSAT](#) et 2 [TOPAZ-I](#)), principalement pour espionner les armées occidentales. Le développement du TOPAZ-II avait atteint un stade avancé (prototype terrestre) sans parvenir au lancement. Tous ces réacteurs ont été utilisés pour l'approvisionnement en électricité des satellites.

Après une période d'accalmie, les États-Unis ont commencé au début des années 2000 le développement d'un nouveau réacteur pour l'exploration des lunes de Jupiter : le projet Prometheus. Il prévoyait d'utiliser l'énergie produite par le réacteur pour l'alimentation en électricité du vaisseau et du système de propulsion. Forcément, la puissance requise était dès lors plus élevée. Les spécifications techniques du projet précisait que le réacteur devrait être capable de fournir 200 kWe pendant une durée maximale de 20 ans. Le projet a été abandonné en 2005, après la publication d'un rapport détaillant tous les choix techniques qui avaient déjà été faits¹. En 2007, un réacteur plus modeste d'une puissance de 100 kWe, [SAFE-400](#) a été prévu pour propulser un véhicule spatial en utilisant directement les gaz de fission.

La Russie, après un arrêt plus ou moins complet suivant la chute de l'URSS, a commencé à travailler sur un remorqueur nucléaire. Le projet en est toujours à ses balbutiements, mais ses objectifs ont été définis en 2010².

3. Les piles à radio-isotopes

L'Europe n'a pas vraiment participé à ces développements, si ce n'est avec le [projet Daedalus](#) , qui avait pour but d'utiliser la fusion nucléaire pour accélérer une sonde à un peu plus de 10% de la vitesse de la lumière. Son successeur, le [projet Icarus](#) a débuté en 2009. On peut préciser que les États-Unis ont essayé de faire [une variante](#) utilisant la fission dans les années 80. Plus récemment, le projet [MEGAHIT](#) a pour objectif de mettre au point un système de propulsion électrique alimenté par la fission nucléaire, et attend la décision du programme de recherche de l'Union Européenne -Horizon 2020- pour savoir si il sera continué.

Il faut toutefois noter que cette liste n'est absolument pas exhaustive, mais que seuls les projets les plus avancés sont présentés. De nombreux autres projets ont existé et atteint différents stages de développement, certains étant même très ambitieux, tels le [SOAR](#) (Space Orbiting Advanced fusion power Reactor).

Aucun de ces réacteurs n'avait pour but d'être utilisé pour sortir de l'attraction terrestre. La puissance demandée serait bien trop importante. À la fin des années 50, le [projet Orion](#) proposa d'utiliser des explosions nucléaires derrière le vaisseau spatial pour le propulser, avant d'être abandonné quand ils se rendirent compte de l'effet néfaste des retombées radioactives.

Concernant les piles à radio-isotopes, à ce jour, seuls les États-Unis en ont envoyé massivement dans l'espace, à partir de 1961. Elles fonctionnaient (et fonctionnent toujours pour certaines) toutes avec du plutonium 238. Une liste complète de ces 44 systèmes est présente dans cet article³. La Russie quant à elle en a envoyé quelques unes, dont certaines fonctionnaient avec du polonium 210.

Et la France dans tout ça ? Elle a bien entendu pris part aux projets Européens, mais on pourrait aussi mentionner rapidement les [projets ERATO, MAPS et OPUS](#) (pp209-213).

3. Les piles à radio-isotopes

Comme mentionné dans la première partie, les piles à radio-isotopes utilisent l'énergie par les désintégrations naturelles. En effet, les éléments radioactifs peuvent émettre des rayonnements α , β ou γ , et ces rayonnements sont énergétiques. Dans de très rares cas, ils peuvent aussi fissionner tout seuls. Ces rayonnements interagissent avec la matière et produisent de la chaleur qui peut être récupérée. Selon le but de la pile, cette chaleur peut soit être utilisée telle quelle, soit être transformée en électricité. Dans le cas où l'on veut produire de l'électricité, les rayonnements peuvent aussi être directement utilisés.

Les rayonnements α et β consistent de particules chargées électriquement, et qui vont donc être arrêtées très rapidement par n'importe quel matériau. Les rayonnements γ et les neutrons ne sont pas chargés et il est donc beaucoup plus compliqué de les arrêter. C'est néanmoins essentiel de le faire, puisqu'ils peuvent avoir des effets néfastes sur les formes de vie présentes à bord, et sur les systèmes électroniques. Pour cela, un bouclier est utilisé, souvent composé d'un matériau très dense pour maximiser les chances d'interaction.

3. Les piles à radio-isotopes

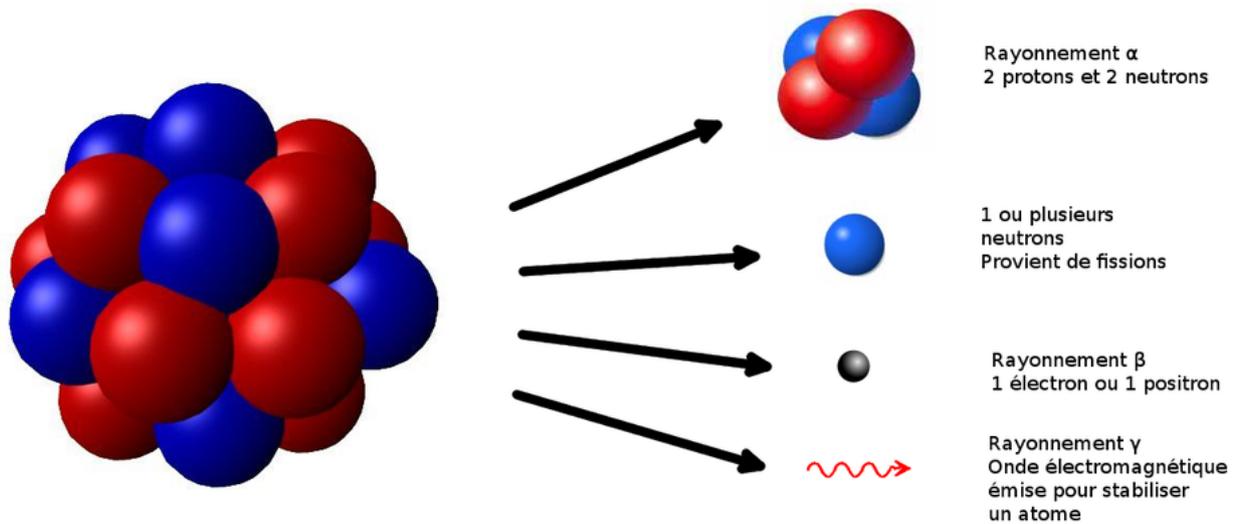


FIGURE 3. – Figure 2 : Différents types de rayonnements émis

i

Il existe une autre possibilité pour obtenir ces particules : les réactions directes. En une seule étape, l'atome peut transférer de l'énergie, de la quantité de mouvement, des électrons ou des nucléons à une particule incidente, ou le contraire. Ces réactions sont écrites sous la forme (particule incidente, particule sortante). Par exemple, (n, α) représente un neutron incident à qui sont transférés 2 protons et 1 neutron dans la collision. Le neutron n'est pas absorbé, et une particule α n'est pas émise dans un second temps, tout se passe en une seule étape. Ces réactions peuvent également être plus exotiques, comme dans le cas d'un kaon \bar{K} incident et d'un pion π^+ sortant. Ces réactions, bien qu'existantes et passionnantes, ne seront pas abordées dans la suite de cet article, puisqu'elles ne sont pas déterminantes pour la bonne compréhension.

3.1. Puissance d'une pile

Bien qu'il soit complètement impossible de prévoir quand un atome va se désintégrer, il est tout à fait possible de prévoir le comportement statistique d'un grand nombre de ces atomes, qui suivent la loi de décroissance radioactive.

$$N(t) = N_0 \exp\left(-\frac{\ln(2)}{t_{1/2}}t\right)$$

Dans cette équation, N_0 est le nombre d'atomes initial, $N(t)$ est le nombre d'atomes restant au temps t et $t_{1/2}$ est le temps de demi-vie, c'est à dire le temps qu'il faut attendre pour que la moitié des noyaux radioactifs se soient désintégrés. Si on trace une exponentielle décroissante, on peut remarquer que le nombre d'atomes radioactifs décroît d'abord très rapidement avant de se rapprocher de plus en plus de 0 sans jamais l'atteindre lorsque le temps s'écoule.

3. Les piles à radio-isotopes

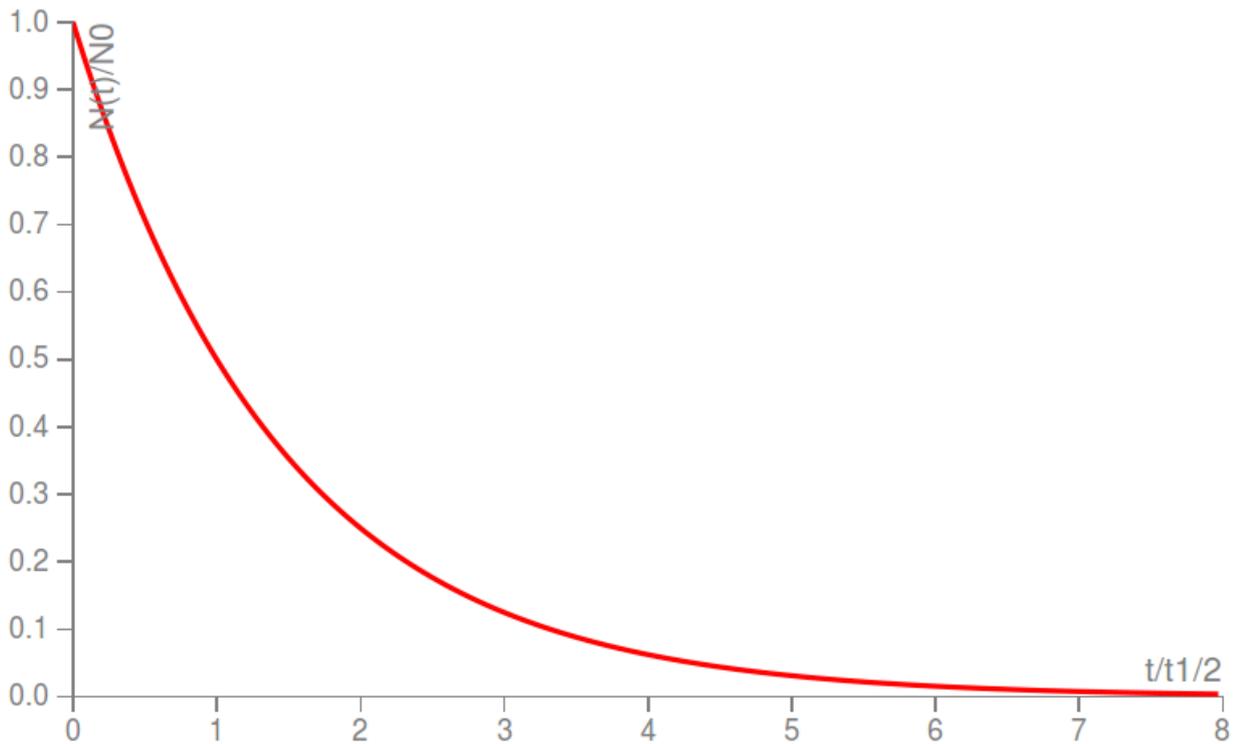


FIGURE 3. – Figure 3 : Exponentielle décroissante

?

Attends une seconde, sans jamais atteindre 0 ? Tu veux dire que certains atomes ne seront jamais désintégrés ?

i

Pour commencer, il faut être très clair. La loi de décroissance radioactive est une loi statistique. En tant que telle, elle n'est plus valable quand le nombre d'atomes est trop petit. Elle est même en théorie uniquement valable pour un nombre infini d'atomes, mais dans notre cas, le nombre d'Avogadro ($N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$, qui représente le nombre d'atomes dans une mole, soit quelques dizaines/centaines de grammes, de l'ordre de grandeur des quantités manipulables et utiles) est une très bonne approximation de l'infini. On peut aussi ajouter qu'une décroissance exponentielle est typique d'un phénomène sans vieillissement, tant que la loi statistique est valable. Après une demi-vie, la moitié des atomes se seront désintégrés. Après deux demi-vies, la moitié de la moitié restante se sera désintégrée, soit les trois quarts du nombre initial d'atomes. Cette fraction augmente à $7/8$, $15/16$, $31/32$ et cetera pour respectivement 3, 4 et 5 demi-vies, comme on peut le voir sur la figure 3. Quand il ne reste que quelques atomes, leur désintégration se produit de manière aléatoire, et tous finiront par se désintégrer, mais ça prendra très longtemps. On peut reformuler ce qui précède en disant que chaque atome non désintégré a 50% de chances de se désintégrer durant la prochaine demi-vie, indépendamment de son passé. Mais comme une pièce qui pourrait tomber sur "face" 100 fois d'affilée, un atome peut survivre à 100 périodes de demi-vie, et même théoriquement une infinité de ces périodes.

Du coup, en connaissant l'énergie du rayonnement émis (qu'il soit α , β ou γ), la demi-vie de

3. Les piles à radio-isotopes

l'élément constituant la pile et la masse de la pile, on peut estimer la puissance de la pile à n'importe quel moment. Si l'on veut utiliser la chaleur, on suppose que toute l'énergie est transmise aux matériaux environnants. Du coup, on privilégiera les désintégrations α et β , qui nécessite beaucoup moins de bouclier pour récupérer la chaleur, puisque ces particules sont électriquement chargées et interagissent donc plus fortement.

$$P_{\text{Pile}}(t) = \lambda N(t) \cdot E_{\text{Désintégration}}$$

$$N_0 = \frac{m_{\text{Pile}}}{M_{\text{Pile}}} \mathcal{N}_A$$

Ici, P est la puissance, E est l'énergie de désintégration, m et M sont respectivement la masse et la masse molaire, λ vaut $\frac{\ln(2)}{t_{1/2}}$ et \mathcal{N}_A est le nombre d'Avogadro.

Comme on peut le remarquer dans l'équation précédente, en jouant sur l'élément radioactif et la masse de cet élément que l'on met dans la pile, on peut avoir des piles plus ou moins puissantes et plus ou moins constantes dans le temps. Ainsi, si une pile à base de Cm-242 peut en théorie produire bien plus de chaleur que son équivalente à base de Pu-238, le temps de demi-vie relativement court va diminuer cette production très rapidement, ce qui est le contraire de ce que l'on recherche en utilisant l'énergie nucléaire. À l'opposé, l'uranium 235 est tellement stable que sa production de chaleur, bien que remarquablement constante dans le temps, est bien trop basse pour être exploitée, à moins d'avoir des tonnes de matériau dans la pile, ce qui n'est pas envisageable.

Il faut aussi considérer que si les isotopes peuvent se désintégrer en suivant un processus qui conduit à l'émission d'un neutron ou une particule γ , il faut qu'il y ait un bouclier. C'est surtout sur cet aspect que le Pu-238 tire son épingle du jeu, puisqu'il se désintègre presque exclusivement en émettant une particule α . Le Cm-244 a au contraire une probabilité non négligeable de subir une fission spontanée, avec un risque très léger de créer une réaction en chaîne (qui disparaîtrait presque instantanément, puisque les piles n'emportent pas assez de matériaux pour limiter les fuites de neutrons et atteindre un état critique), mais plus important, une émission de γ et de neutrons. Pour avoir accès à une liste complète de toutes les désintégrations possibles pour chaque isotope, et donc pour vérifier que je ne vous mens pas en disant que le Pu-238 est parfaitement adapté pour une pile à radio-isotope, vous pouvez aller vérifier [ici](#) .

Tableau 1 : Comparaison de quelques isotopes

Isotope	$t_{1/2}$ [ans]	Type de radiation	E [keV]	Chaleur massique de désintégration [W/g]
H-3	12,3	β -	5,7	0,32
C-14	5700	β -	49,5	0,0013
Ni-63	101,2	β -	17,4	0,006
Sr-90	28,8	β -	195,8	0,16

3. Les piles à radio-isotopes

Pm-147	2,6	β^-	61,9	0,34
U-235	703E6	α	4600	5,9E-8
Pu-238	87,7	α	5500	0,56
Cm-242	163 jours	α	6100	119,50
Cm-244	18,1	α	5800	2,78

i

Les désintégrations de type β peuvent soit émettre un électron et un anti-neutrino en "transformant" un neutron en proton, ou un positron et un neutrino en "transformant" un proton en neutron. "Transformant" n'est pas le mot adapté, mais dans un soucis de simplification extrême, il est utilisé ici. Les lecteurs qui voudraient en savoir plus sont invités à aller lire [ce genre de pages](#) .

Les piles à radio-isotopes ne fonctionnent pas toujours avec les isotopes sous forme pure. Par exemple, dans le cas le plus fréquent, les piles au Pu-238 fonctionnent en fait avec du dioxyde de plutonium, comportant également une part non négligeable de Pu-239, mais dont le Pu-238 représente environ 70% de la masse.

3.2. Conversion de la chaleur en électricité

Les méthodes de production d'électricité sont détaillées plus tard. Pour l'instant, il est simplement intéressant de savoir qu'il existe deux familles générales de convertisseur : ceux qui utilisent la chaleur produite et ceux qui utilisent directement les radiations. Un avantage de la première catégorie de solution est que les technologies peuvent avoir beaucoup d'autres applications, et bénéficient donc d'un programme de recherche beaucoup plus développé. La seconde catégorie quant à elle est intéressante puisque l'on évite une conversion énergétique, ce qui pourrait en théorie amener à une meilleure efficacité. Néanmoins, il est impossible d'empêcher les radiations d'interagir avec la matière, et il y a une production de chaleur dans tous les cas, ce qui limite très fortement l'efficacité des systèmes de conversion qui ne l'utilisent pas.

3.3. Sécurité

Les piles à radio-isotopes sont intrinsèquement très sûres. En effet, il n'y a pas de réactions en chaîne dans ces systèmes, ce qui limite les risques. Cependant, dans trois cas, des accidents ont mené à des rejets radioactifs mesurables : Transit, Cosmos et une autre sonde russe.

3.4. Production de Pu-238

Un mot très rapide sur la production et la situation politique. Aujourd'hui, l'usine de production de plutonium 238 des États-Unis est fermée. Leurs réserves sont utilisées pour la défense du territoire, et la NASA se fournissait en Russie. Le dernier accord s'est terminé en 2009, puisque la

4. Les réacteurs spatiaux

Russie a également arrêté d'en produire. Les États-Unis prévoient de recommencer la production d'environ deux kilos par an, mais à ce jour, rien n'est arrêté.

Il y a beaucoup de Pu-238 produit dans les réacteurs conventionnels, mais la séparation de cet isotope particulier se révèle difficile. À la place, on enrichit du Np-237 dans un réacteur expérimental.

4. Les réacteurs spatiaux

En comparaison avec tous les réacteurs évoqués dans la partie précédente, un réacteur tel que l'EPR en construction à Flamanville va fournir, quand il entrera en opération, 1650 MWe pendant une soixantaine d'années. Quelles sont les difficultés rencontrées avec les réacteurs spatiaux qui font qu'il est si compliqué d'en faire un plus de 1000 fois plus modeste que ceux que l'on construit sur Terre ?

4.1. Des nouvelles contraintes

Les réacteurs terrestres utilisent des technologies éprouvées. Que ce soit le combustible (UO₂ ou MOX), le cycle thermodynamique, les matériaux structurels ou l'électronique, tout a été testé pendant des années et on est maintenant bien loin des [balbutiements de Chicago](#) [↗](#). Construire un réacteur moderne et l'envoyer dans l'espace est cependant complètement impossible aujourd'hui. Outre la puissance produite beaucoup trop élevée pour les besoins, il existe des contraintes de poids et de sécurité qui rendent cette idée ridicule.

La première, et la plus importante, est l'exigence qu'en cas d'accident, il n'y ait pas de retombées radioactives dangereuses. Ça n'a pas toujours été pris en considération (par exemple pour le projet ORION décrit dans la première partie) mais aujourd'hui, les dangers sont mieux connus et il est important de ne pas contribuer à l'augmentation de la radioactivité naturelle. Pour faire ça, le moyen le plus simple est de ne pas démarrer le réacteur avant d'avoir quitté le champ gravitationnel terrestre. Ainsi, même en cas d'accident pendant le lancement, seuls une quantité minimale de déchets radio-toxiques (dans le cas des piles) ou du combustible non-utilisé et donc non-dangereux retomberont sur Terre. Les autres solutions consistent à améliorer drastiquement le taux de réussite des lancements, pour que le risque devienne acceptable. Cependant, comme évoqué dans la partie sur l'histoire des engins nucléaires, ils ne sont très souvent pas adaptés pour fournir la poussée initiale et une fusée traditionnelle sera quand même nécessaire.

L'autre contrainte très importante est le poids. Déjà dans les programmes SNAP, la recherche d'un réacteur plus léger a conduit à considérer d'autres combustibles et d'autres caloporteurs (matériaux utilisés pour refroidir le cœur) pour permettre une réduction de la taille du cœur du réacteur. Il en va de même pour tous les éléments du réacteur. La démultiplication des systèmes pour permettre une panne n'est pas considérée non plus, rendant la fiabilité primordiale. Un autre effet des limitations en poids et en volume fait qu'il est compliqué de convertir efficacement la chaleur en électricité, et que pour cette raison, le rendement des réacteurs spatiaux est souvent mauvais. Les différents systèmes existants sont mentionnés dans une des sections suivantes.

D'autres contraintes existent. Par exemple, le cycle de refroidissement doit être complètement fermé. Il est en effet impossible de récupérer l'eau d'une rivière quand on est au milieu de l'espace. Il y a bien sûr une exception : si l'on veut utiliser directement la chaleur du réacteur

4. Les réacteurs spatiaux

pour la propulsion, l'émission de particules chauffées va contribuer au refroidissement. Il est aussi essentiel de protéger les appareils électroniques (et peut-être un jour l'équipage) des radiations. L'abandon du modérateur pour des questions de poids, forçant le réacteur à utiliser des neutrons rapides, imposent également des contraintes élevées sur tous les matériaux environnants (cet abandon n'est toutefois pas absolument nécessaire, et les réacteurs équipant les RORSAT et TOPAZ utilisaient/utilisent des neutrons thermalisés). Pour en finir avec les contraintes purement techniques, il est quasiment impossible de réaliser une opération de maintenance dans l'espace, et le réacteur nucléaire que l'on y envoie doit donc reposer sur des technologies éprouvées.

Ce dernier point, bien que semblant évident, est à considérer quand on pense à la difficulté pour obtenir des fonds pour le développement d'un tel réacteur. Par exemple, pour Prometheus, selon le planning (et donc le budget), les scientifiques ne disposaient que de 10 ans entre le début du développement et le lancement, initialement supposé être en 2015, sur la base d'un programme qui ne connaîtrait aucun retard. Le projet a été annulé, mais ça illustre la difficulté de développer de nouvelles technologies qui doivent être testées et retestées, dans un laps de temps très court.

4.2. Certaines solutions

Les paragraphes suivants n'ont pas vocation à représenter une liste exhaustive, et les informations présentées, bien que valables dans la majorité des cas, trouvent très probablement des contre-exemples.

Le combustible utilisé sur Terre est principalement de l'oxyde d'uranium enrichi à moins de 5%. Ce niveau d'enrichissement est choisi pour limiter les coûts et les risques de prolifération. Dans l'espace, ces deux contraintes, bien que non négligeables, sont partiellement levées, et il est possible d'utiliser un combustible enrichi à plus de 90%, et donc renfermant plus d'énergie directement accessible pour un poids similaire (c'est la solution adoptée pour les satellites soviétiques). Pour limiter encore plus le volume et le poids, il est possible -et c'est le choix qui a été fait dans la plupart des projets occidentaux- d'utiliser des nitrures d'uranium. Il n'y a cette fois plus qu'un atome léger par actinide, contre deux pour les combustibles à base d'oxygène. Forcément, la densité d'énergie disponible est plus élevée.

i

Risques de prolifération ? Qu'est-ce que c'est ? Il y a un effort international pour limiter le nombre de pays qui ont accès à un armement nucléaire. Régulièrement, un pays ou une organisation tente d'acquérir une bombe. De l'uranium très fortement enrichi est suffisamment stable pour être utilisé dans ce but, et on essaie donc d'éviter d'en avoir, pour ne pas tenter le diable. Par contre, il faudrait vraiment être motivé pour aller récupérer cet uranium dans un satellite, et c'est la raison pour laquelle cette contrainte est levée.

i

La détermination de la densité en métaux lourds d'un combustible n'est pas aussi simple que de compter le nombre d'atomes légers. La structure cristalline est également très importante. Ainsi, l' UO_2 a une densité théorique de 10.97 g/cm^3 contre 14.3 g/cm^3 pour l'UN. Les contraintes de fabrication font qu'il est plus ou moins facile d'éliminer les

i

impuretés, plus ou moins facile (et souhaitable) d'éliminer la porosité, et tout cela a un impact sur la densité.

L'eau utilisée dans l'extrême majorité des réacteurs terrestres pour ralentir les neutrons et refroidir le combustible est également trop lourde. Le refroidissement est assuré par des matériaux qui présentent de meilleures propriétés de transfert de chaleur par unité de poids, tels que les métaux liquides (sodium par exemple) ou le gaz (principalement du dihydrogène). Le ralentissement des neutrons est quand à lui assuré par des matériaux tels que ZrH (en Russie) ou pas du tout en occident. Dans ce cas, les neutrons rapides (avec beaucoup d'énergie cinétique) sont utilisés directement.

Les systèmes électroniques peuvent être très sensibles aux radiations, et il est donc important de les protéger. Si les rayonnements α et β ne sont évidemment pas un problème, les rayonnements γ ainsi que les neutrons doivent être stoppés, ou tout au moins fortement mitigés. Dans le cas d'un projet comme Prometheus, la solution adoptée était double. La première est purement géométrique : en positionnant le réacteur tout au bout du vaisseau, l'angle solide à protéger est beaucoup plus petit. La seconde est la protection en elle-même, faite de LiH, Be, B₄C, W ou ¹⁰B. Malgré tout, le poids de la protection est à elle seule équivalente au poids du réacteur, pour atténuer les rayonnements par un facteur 100 (γ) et 100 000 (neutrons). La distance entre le module de la mission et le réacteur permet une atténuation supplémentaire par un facteur 1000. Pour diminuer les contraintes créées par le poids de la protection, le choix a été fait de l'utiliser aussi en tant que support structurel. Si ce bouclier peut aussi être utilisé pour renvoyer des neutrons directement vers le cœur, limitant ainsi les fuites et permettant donc d'avoir un cœur plus petit, c'est parfait ! Malheureusement, on veut que le bouclier soit très absorbant, tandis qu'on veut que le réflecteur ne le soit que le moins possible, donc ce n'est pas vraiment envisageable. De même, on veut que le réflecteur soit tout autour du cœur, ce qui n'est pas le cas du bouclier. Il faut donc que le matériau utilisé n'absorbe pas les neutrons mais interagisse quand même avec eux pour les renvoyer d'où ils viennent, qu'il soit très léger et qu'il soit résistant aux radiations. Encore une fois dans le cas de Prometheus, on a considéré MgO, Al₂O₃ et MgAl₂O₄.

5. Quelques systèmes auxiliaires

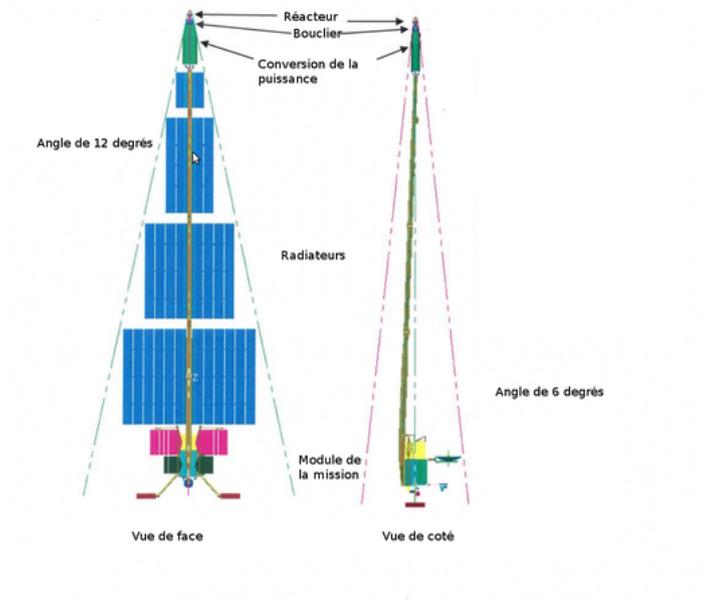


FIGURE 4. – Figure 4 : Schéma du projet Prometheus¹

5. Quelques systèmes auxiliaires

C'est à peu près tout pour les systèmes nucléaires présents dans l'espace ! Dans la dernière partie de cet article, on va parler rapidement de quelques parties nécessaires au bon fonctionnement de notre vaisseau ou satellite. Et donc pour entrer directement dans le vif du sujet...

5.1. Transformation d'énergie de radiation en énergie utilisable

Parce que les particules α , β et γ , les produits de fission, neutrinos ou neutrons, c'est bien gentil, mais ça va pas nous aider des masses pour admirer les lunes de Jupiter, il va falloir convertir leur énergie. En chaleur, c'est facile, il suffit de mettre un matériau à côté du combustible. Le problème serait d'ailleurs plutôt le refroidissement et de diriger cette chaleur vers un usage utile. Par contre, pour produire de l'énergie électrique, c'est une autre paire de manches...

5.1.1. Systèmes basés sur la chaleur

Comme on vient de le dire, on va produire de la chaleur presque sans le faire exprès. Du coup, on peut se demander si on ne pourrait pas utiliser cette chaleur pour produire de l'électricité. Et on est probablement plutôt futés, puisqu'il existe plein de systèmes qui le font. Il va malheureusement être impossible d'être exhaustif ici, mais allez lire du côté des [générateurs thermoélectriques à isotope](#) [☞](#), des [cellules thermophotovoltaïque](#) [☞](#), ou encore des [convertisseurs alkali-métal](#) [☞](#). Nous pendant ce temps là, on va se concentrer sur les convertisseurs thermoïoniques puisqu'ils ont été massivement utilisés, et sur les moteurs Stirling, puisqu'ils permettraient d'atteindre des rendements de conversion très élevés (pour un système situé dans l'espace).

5. Quelques systèmes auxiliaires

5.1.1.1. Convertisseur thermoïonique Le principe général est très simple. On prend deux plaques métalliques, que l'on sépare légèrement. L'une est chauffée, l'autre est refroidie. Celle chauffée émet des électrons, celle refroidie les absorbe. Du coup, on crée une différence de potentiel entre les deux plaques, et on peut donc avoir un courant.

Facile, n'est-ce pas ? Maintenant, quelques difficultés... Si les deux plaques sont trop éloignées, un certain nombre d'électrons n'atteindront pas l'autre électrode (parce qu'ils s'arrêtent au milieu ou rebondissent et ensuite s'arrêtent) et formeront donc une sorte de nuage d'électrons, donc chargé négativement entre les deux plaques. Ce nuage va empêcher les électrons suivants de passer d'une électrode à l'autre. La solution évidente serait de ne pas mettre plus de quelques micromètres entre les deux plaques. Pas facile quand on en chauffe une à plus de 1000 degrés... L'autre solution, adoptée dans les satellites soviets TOPAZ, est d'insérer des ions positifs dans cet espace entre les deux plaques, pour neutraliser les électrons qui y seraient bloqués. Traditionnellement, des ions de césium sont utilisés. L'inconvénient, c'est que ces ions sont absorbés par les plaques, ce qui réduit l'efficacité du convertisseur par un facteur deux environ.

Une [autre solution](#) proposée récemment est d'utiliser une différence de potentiel entre les deux plaques qui accélérerait puis ralentirait les électrons émis, les aidant à atteindre l'autre électrode, et à y rester. Avec cette idée, un rendement de 40% pourrait être atteint. Par contre, de l'aveu des chercheurs, au moins 5 ans, probablement plus, seront nécessaires pour atteindre le stade de la commercialisation.

5.1.1.2. Générateur Stirling à radio-isotope Le générateur Stirling s'appuie comme son nom l'indique sur un [cycle thermodynamique de Stirling](#). Un des avantages principaux est qu'il n'y a ni combustion ni explosion, et que le cycle est complètement fermé. Grâce à ça, il n'est pas nécessaire de fournir de grande quantité de gaz, qui n'auraient pas pu être apportés là de toute façon. L'inconvénient majeur est que certaines parties de ce moteur se déplacent, créant des chocs et une usure, et donc un besoin de maintenance accru, ce qui est aussi impossible, ou tout au moins très compliqué dans l'espace.

Maintenant, pour une rapide [description technique](#) du moteur. Le gaz est dans un cylindre avec deux pistons. Une partie de cylindre est chauffée, l'autre refroidie. Le gaz est comprimé dans la partie refroidie, et détendu dans la partie chauffée. La première action demande moins de travail que la seconde n'en fournit, ce qui permet de récupérer de l'énergie mécanique. Cette énergie mécanique peut être convertie en énergie électrique en utilisant un alternateur.

5.1.2. Systèmes non basés sur la chaleur

Ces systèmes sont en développement et leur usage a été au mieux très limité dans l'espace. On vous en liste quelques uns ici, mais sans détailler, libre à vous de vous renseigner dessus si ça vous intéresse.

- [Générateurs à chargement direct.](#)
- [Batteries betavoltaiques.](#)
- [Batteries alphavoltaiques.](#)
- [L'opto-électronique.](#)

5.2. Propulseurs électriques

Traditionnellement, pour propulser un engin spatial, on brûle du carburant, et la chaleur produite est utilisée pour chauffer les produits de réaction, qui sont ensuite émis en transférant une quantité de mouvement à l'engin, en suivant le principe de conservation.

Ici, on a donc de l'électricité mais on ne brûle rien, donc on n'a pas de produit de réaction sur lesquels travailler. À la place, on va donc emmener du gaz, que l'on éjectera après l'avoir accéléré. Puisque l'on veut limiter le poids que l'on emmène dans l'espace, le but sera de donner le plus d'énergie cinétique possible à ce gaz, pour maximiser la quantité de mouvement transférée, et ainsi pouvoir éjecter moins de matériau pour un effet équivalent. Il est aussi possible d'éjecter un photon, ce qui présente l'avantage de nécessiter encore moins de matériau. Même si les propulseurs électriques sont plus économiques que ceux traditionnels, la puissance demandée pour quitter l'attraction terrestre est telle que leur utilisation est cantonnée à la propulsion quand l'influence gravitationnelle des astres environnants est faible.

Pour accélérer le gaz, il y a différentes solutions. On peut lui fournir de l'énergie cinétique en le chauffant, en utilisant l'interaction coulombienne ou en créant des champs électromagnétiques. Ces méthodes ne sont pas le sujet de cet article, et plus de détails peuvent être trouvés [ici](#) .

Et c'est tout ce que je voulais raconter sur les systèmes annexes !

Ainsi se termine notre exploration de l'utilisation de l'énergie nucléaire dans l'espace. Vous savez maintenant comment fournir de l'énergie aux frontières du système solaire ou sur la face sombre de la Lune (pas la peine de râler, on sait bien qu'elle est au Soleil la moitié du temps, c'est une image), et vous pouvez donc maintenant briller dans les dîners mondains !

-
1. Prometheus Project Reactor Module Final Report
 2. New stage in the use of atomic energy in space, Koroteev
 3. Background on Space Nuclear Power, Steven Aftergood

Liste des abréviations

NASA National Aeronautics and Space Administration. 2, 9