

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY et ÉDOUARD KIERLIK
professeurs de physique à Sorbonne Université, à Paris

DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE À PETITE ÉCHELLE

**Sondes spatiales, sous-marins, porte-avions...:
l'exploitation de l'énergie nucléaire ne nécessite pas
forcément des installations industrielles de grande taille.**

Un panache de vapeur d'eau au-dessus de gigantesques tours de refroidissement de centrales plantées au cœur de grands sites industriels, telle est l'image qui nous vient en général lorsqu'on évoque l'énergie nucléaire. Pourtant, une telle énergie est produite à travers des dispositifs de tailles variées et fournit déjà bien plus que l'électricité du réseau. Elle alimente en effet des sondes spatiales, des sous-marins, des porte-avions... Et depuis quelques années, des ingénieurs réfléchissent au développement de petites centrales nucléaires modulaires de moyenne puissance. C'est l'occasion de découvrir quelques-uns des mécanismes physiques à l'œuvre dans ces systèmes.

La célèbre relation d'Einstein $E=mc^2$ montre que l'on peut convertir de

la masse en énergie, et réciproquement. Cette relation est valable en toutes circonstances. Dans les réactions chimiques, les énergies en jeu étant de l'ordre de 100 kilojoules par mole de matière, la variation de masse est de l'ordre du nanogramme, ce qui est négligeable.

DES DÉSINTÉGRATIONS QUI CHAUFFENT

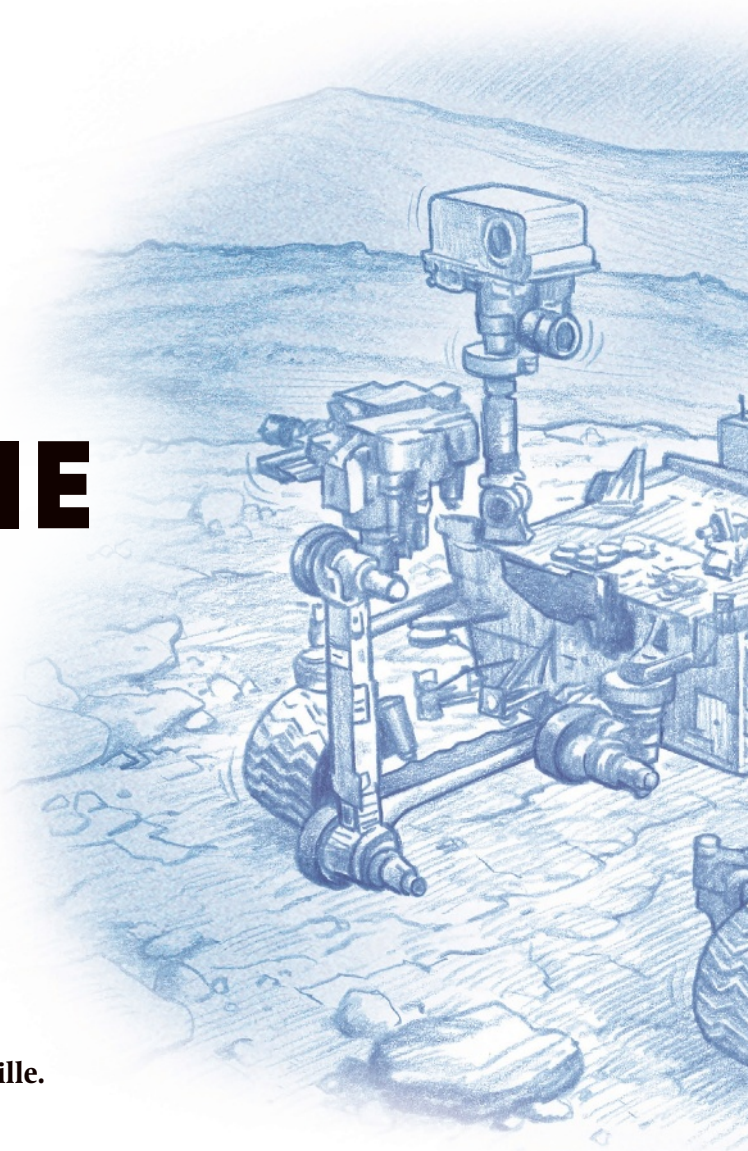
Tel n'est pas le cas des réactions nucléaires, où l'énergie libérée par les désintégrations des noyaux atomiques atteint des dizaines de milliers de gigajoules (l'équivalent de quelques dixièmes de gramme) par mole. Cette énergie se retrouve *in fine* sous forme de chaleur, qu'un dispositif adéquat peut convertir en énergie utile.

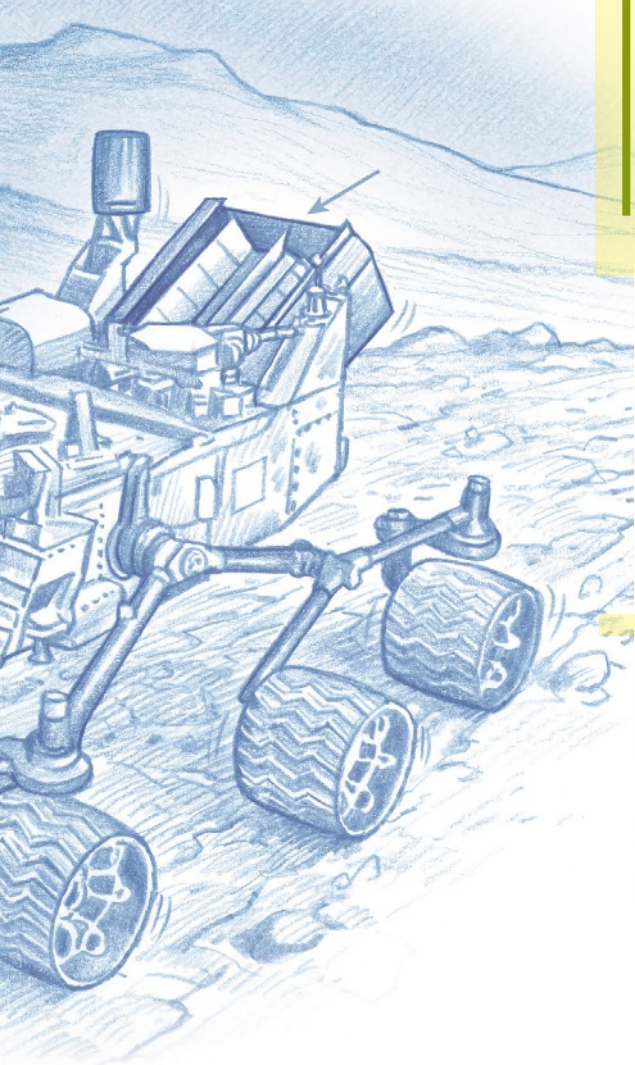
Parmi les dispositifs les plus simples, on trouve les générateurs thermiques à

Le rover *Curiosity*, de la Nasa, explore le sol de Mars grâce à de l'énergie nucléaire. Il porte à l'arrière (flèche) un générateur thermique à radio-isotopes (GTR), dispositif qui mesure une soixantaine de centimètres.

radio-isotopes, en abrégé GTR, où des thermopiles assurent la conversion en électricité. C'est ce type de générateur qui alimente en énergie les sondes spatiales comme *Cassini* ou *New Horizons* voyageant aux confins du Système solaire: des panneaux photovoltaïques seraient inefficaces, en raison de la diminution du flux solaire à mesure que l'on s'éloigne de l'astre du jour.

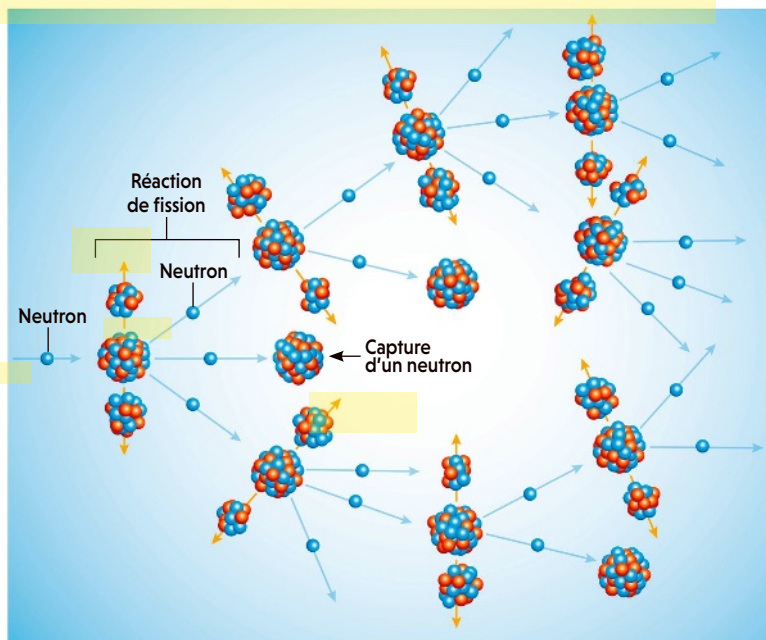
Les GTR équipent aussi les rovers martiens tels que *Curiosity* ou *Perseverance*, embarqué sur la mission *Mars 2020*, et y prennent une place non négligeable: ils se présentent sous la forme d'un cylindre de 64 centimètres





RÉACTIONS DE FISSION EN CHAÎNE

Lorsqu'un noyau d'uranium 235 est heurté par un neutron, il se déstabilise et peut fissionner en deux noyaux plus petits en émettant généralement deux ou trois neutrons (parfois, il peut aussi absorber le neutron incident, sans fissionner). Chacun de ces neutrons secondaires peut entrer à son tour en collision avec un autre noyau d'uranium 235, qui se désintègre à son tour en émettant des neutrons, et ainsi de suite. Ces réactions en chaîne se multiplient exponentiellement si l'élément fissile (l'uranium 235) est assez abondant et concentré, ce qui peut conduire à un échauffement excessif. Les réacteurs nucléaires sont des dispositifs qui contrôlent le taux de réactions en chaîne ; l'énergie libérée par ces réactions se transforme en chaleur, qu'exploite un générateur d'électricité.



de diamètre sur 66 de haut, pour une masse de 45 kilogrammes, dont 4,8 kilogrammes d'oxyde de plutonium 228 (voir l'illustration ci-dessus). La désintégration naturelle de cet isotope produit en début de mission une puissance thermique de 2 kilowatts, qui décroît ensuite lentement, sur des dizaines d'années; de quoi effectuer des explorations prolongées, même si les thermopiles ont un faible rendement et ne fournissent que 120 watts de puissance électrique.

L'avantage de ce type de générateur est l'absence totale de pièces mobiles: aucun risque d'usure, des pannes réduites et pas de vibrations susceptibles de perturber les instruments de mesure. Leur utilisation reste toutefois réservée à des situations exceptionnelles, où le risque de dispersion de matière radioactive est faible.

Pour des applications terrestres, on ne peut se contenter de la radioactivité naturelle et de la désintégration spontanée d'atomes radioactifs. C'est pourquoi on construit des réacteurs, qui permettent d'augmenter et de contrôler le rythme des désintégrations en maîtrisant des réactions en chaîne (voir l'encadré ci-dessus).

FAVORISER LES RÉACTIONS DE FISSION... MAIS PAS TROP

Ainsi, les réacteurs à eau, les plus courants, utilisent de l'uranium 235, dont le noyau atomique devient instable s'il absorbe un neutron. Il se scinde alors en deux noyaux plus petits et émet généralement lors de cette fission deux ou trois neutrons (2,4 en moyenne). Si tous les neutrons émis provoquaient eux aussi une réaction de fission, on aurait

une réaction en chaîne avec une augmentation exponentielle du nombre de réactions. Cet emballement est bien sûr à éviter; aussi les réacteurs nucléaires sont-ils conçus pour que chaque fission en provoque, en fin de compte, une autre exactement (un peu plus au moment du démarrage).

À cette fin, on peut jouer sur divers paramètres. Tout d'abord, la concentration en uranium 235: plus celle-ci est importante, plus il est facile de provoquer une réaction en chaîne, car on augmente la probabilité de capture des neutrons. >

Les auteurs ont notamment publié: **En avant la physique!**, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).



> On peut aussi jouer sur la taille du réacteur. Plus celui-ci est petit, plus les neutrons quitteront la zone active avant d'avoir provoqué une nouvelle fission. C'est l'un des rares aspects défavorables à la miniaturisation !

Enfin, on peut aussi ralentir les neutrons rapides émis par les fissions, ce qui a pour effet d'augmenter leur probabilité d'être réabsorbés. D'où l'utilisation d'un modérateur, c'est-à-dire d'un élément qui ralentit les neutrons sans les absorber. C'est le cas de l'hydrogène de l'eau.

Afin de contrôler activement le taux de réactions dans un réacteur, on utilise en sus des barres absorbantes (de neutrons) que l'on peut plonger plus ou moins dans le cœur du réacteur, là où le matériau fissile est placé. Ces « barres de contrôle » sont en général verticales, de façon qu'elles tombent naturellement sous l'effet de leur poids en cas d'urgence : elles interrompent alors totalement la réaction en chaîne. En les soulevant, on augmente le nombre de fissions, donc la température au sein du réacteur. La chaleur est alors évacuée grâce à un fluide caloporteur et le reste ressemble peu ou prou à des centrales thermiques classiques.

PUISSANCE RÉDUITE, TAILLE RÉDUITE

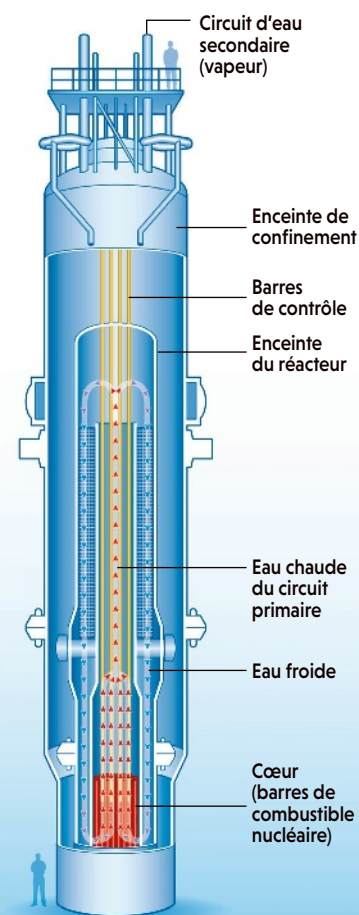
On remarquera que, dans tout ce qui précède, la taille du réacteur n'est pas déterminante dans le fonctionnement. Cependant, comme on a développé les centrales nucléaires afin de produire massivement de l'énergie, leurs réacteurs avaient les tailles requises pour des puissances de l'ordre du gigawatt. Ce gigantisme n'est pas nécessaire si la puissance visée est plus modeste. Ainsi, les réacteurs nucléaires K15 utilisés dans les sous-marins de classe *Le Triomphant* ou le porte-avions *Charles de Gaulle* n'occupent que quelques dizaines de mètres cubes, pour une puissance thermique de 150 mégawatts.

Ce type de réalisations a suscité ces dernières années le développement de projets de petits réacteurs d'une puissance thermique avoisinant la centaine de mégawatts. L'une des principales motivations est que ces réacteurs sont transportables et modulaires.

Celui que conçoit la compagnie américaine NuScale aura ainsi une charge en combustible nucléaire 20 fois plus faible qu'un réacteur nucléaire classique, pour une puissance thermique atteignant 200 mégawatts (ce qui donne environ 60 mégawatts électriques) avec deux ans d'autonomie. Il tient dans un cylindre de

UN RÉACTEUR NUCLÉAIRE COMPACT

La société américaine NuScale développe un réacteur nucléaire qui tient dans un cylindre haut de quelque 23 mètres et de moins de 3 mètres de diamètre. Il produira 60 mégawatts d'électricité, à peu près 15 fois moins qu'un réacteur nucléaire classique. La chaleur dégagée par les réactions de fission du matériau nucléaire (barres de combustible, en bas) chauffe l'eau d'un circuit fermé. L'eau chaude, moins dense, monte et cède sa chaleur à un second circuit (en haut) qui va produire de la vapeur et faire tourner une turbine (non représentée) ; refroidie, l'eau redescend, se réchauffe en bas, et ainsi de suite. Des barres de contrôle, qui absorbent les neutrons, sont insérées plus ou moins profondément parmi les barres de combustible pour réguler le taux de réactions de fission.



23 mètres de haut et de 2,8 mètres de diamètre qui englobe le cœur, le circuit caloporteur et le générateur de vapeur (voir l'encadré ci-dessus).

La compacité du dispositif réduit considérablement les longueurs de tuyauterie nécessaires et permet d'avoir des dispositifs de sécurité entièrement passifs. Par exemple, la circulation de l'eau du circuit primaire ne nécessite aucune pompe et s'effectue naturellement par effet de thermosiphon (dû à la différence de densité entre l'eau chaude et l'eau froide). Il n'y a donc pas besoin d'un générateur diesel de secours en cas d'incident pour faire fonctionner les pompes. D'un poids de 700 tonnes, le réacteur de NuScale peut être transporté en trois segments par camion ou barge. Cette approche permet d'industrialiser toutes les étapes de fabrication, chargement ou déchargement et démantèlement. Les étapes sensibles sont ainsi réalisées dans une usine dédiée et non plus là où l'électricité est produite.

Cette approche règle ainsi un certain nombre de problèmes inhérents à la fabrication, au fonctionnement et au démantèlement des centrales nucléaires classiques. C'est toutefois au prix d'autres inconvénients, notamment les risques de dissémination si les sites d'implantation de ces réacteurs se multiplient trop. ■

BIBLIOGRAPHIE

Multi-mission radioisotope thermoelectric generator (MMRTG), document de la Nasa, 2020 : <https://go.nasa.gov/3jj99RB>

J. Doyle et al., **Highly reliable nuclear power for mission-critical applications**, *Proceedings of ICAPP 2016*, San Francisco, 2016.

Les monographies du nucléaire, documents du CEA : <https://bit.ly/2Sc7xNJ>