



iesd

Institut d'études
de stratégie et
de défense

Faculté de droit
Université Jean Moulin - Lyon III

NOVEMBRE 2021

L'affirmation de la stratégie des États-Unis en matière de technologies nucléaires spatiales

Amaury Dufay

POLICY PAPERS

Analyse technico-capacitaire



Photographie : © Pat Rawlings for NASA Johnson

A propos de l'IESD

L'**Institut d'études de stratégie et de défense (IESD)** est une structure de recherche universitaire créée en 2018 et spécialisée dans le champ des études stratégiques. Soutenu par l'Université de Lyon (UdL), l'IESD appartient à la **faculté de droit de l'université Jean Moulin – Lyon III**. L'institut accueille une équipe multidisciplinaire de chercheurs lyonnais et extérieurs (droit, science politique, gestion, économie, sociologie, histoire), et fédère autour d'elle un réseau d'experts, de chercheurs, de doctorants et d'étudiants spécialisés dans l'étude des interactions conflictuelles contemporaines.

L'IESD a reçu le **label « Centres national d'excellence défense » de la DGRIS** (Ministère des armées), dans le cadre d'un programme de recherche intitulé « *L'interconnexion des capacités stratégiques hautes (puissance aérienne, espace, nucléaire, défense anti-missiles) : conséquences politiques et opérationnelles des couplages capacitaires de haute intensité dans les espaces homogènes et les Contested Commons* ».

Directeur de l'IESD : **Olivier Zajec**, Professeur des universités en science politique, Faculté de droit, Université Jean Moulin-Lyon III (Université de Lyon)

Site web : <https://iesd.univ-lyon3.fr/>

Contact : iesd.contact@gmail.com

IESD – Faculté de droit
Université Jean Moulin – Lyon III
1C avenue des Frères Lumière – CS 78242
69372 LYON CEDEX 08

POLICY PAPERS

Analyse technico-capacitaire

Amaury Dufay, « L'affirmation de la stratégie des États-Unis en matière de technologies nucléaires spatiales », *Policy Paper de l'IESD*, coll. « Analyse technico-capacitaire », n°3, novembre 2021.

Résumé

Depuis 2017, l'intérêt des États-Unis pour les applications de l'énergie nucléaire dans le domaine spatial apparaît renouvelé. Dans un contexte de compétition internationale grandissante, ces applications bénéficient même d'un soutien politique de plus en plus structuré. L'objectif de cette note est d'examiner ces développements afin de mettre en perspective les enjeux qui les accompagnent.

Bien que destinées en priorité à l'exploration interplanétaire (alimentation énergétique de surface et propulsion hautes performances) les technologies nucléaires spatialisées demeurent en effet duales. Par leur nature même, elles posent des problèmes de prolifération qui intéressent le champ du droit comme celui des études stratégiques et la science politique de l'international. Ces technologies constituent aussi un défi en termes de perceptions, dans la mesure où elles possèdent un impact certain sur la manière dont l'opinion publique perçoit l'orientation sécuritaire imprimée aux politiques spatiales par les gouvernements et les organisations internationales.

Abstract

Since 2017, U.S. interest in space-based nuclear power applications appears renewed. In a context of growing international competition, these applications are even receiving increasingly structured political support. The objective of this note is to examine these developments in order to put into perspective the issues that accompany them.

Although primarily intended for interplanetary exploration (surface energy supply and high performance propulsion), space nuclear technologies remain dual. By their very nature, they pose proliferation problems that are of interest to the field of law as well as to strategic studies and international political science. These technologies also constitute a challenge in terms of perceptions, insofar as they have a definite impact on the way in which public opinion perceives the security orientation of space policies imposed by governments and international organizations.

A propos de l'auteur

Amaury Dufay est chargé d'études au sein de l'Axe Spatial de l'Institut d'Etudes de Stratégie et de Défense (IESD). Il est titulaire d'une licence en Droit et Sciences Politiques et d'un master I en Relations Internationales (Université Jean Moulin – Lyon III). Dans le cadre de son master II en Défense, Sécurité et Gestion de Crise en 2019 (IRIS Sup' – Paris), il a soutenu son mémoire sur le sujet de l'US Space force et des dynamiques de la politique spatiale américaine.

Les opinions exprimées dans ce texte n'engagent que la responsabilité des auteurs.

Table des matières

L'affirmation de la stratégie des États-Unis en matière de technologies nucléaires spatiales.....	5
La <i>Space Policy Directive - 6</i> , cadre stratégique toujours effectif de l'administration Trump pour l'énergie et la propulsion nucléaire spatiale	6
La <i>Fission Surface Power</i> , développement prioritaire d'une technologie applicable aux systèmes de propulsion nucléaires électriques.....	7
Des recherches pour la mise au point d'un système de propulsion nucléaire thermique : une clé technologique pour des opérations spatiales à forts besoins énergétiques ?.....	8
Des développements technologiques au cœur d'enjeux de sûreté et de sécurité internationale	10
Une possible extension capacitaire en orbite basse et au-delà.....	12
Conclusion	13
Bibliographie et sources	14

L'affirmation de la stratégie des États-Unis en matière de technologies nucléaires spatiales

Le mercredi 20 octobre 2021, lors d'une audition du Comité Science, Espace et Technologie du Congrès américain intitulée « Accélérer les voyages dans l'Espace lointain avec la propulsion nucléaire spatiale », la conseillère principale de la NASA¹ pour le budget et les finances Bhavya Lal s'est positionnée sur cette question de manière relativement franche. Selon elle « *Les concurrents stratégiques, dont la Chine, investissent agressivement dans un large éventail de technologies spatiales, y compris l'énergie et la propulsion nucléaire* »². Corollaire de ce constat pour B. Lal : « *les États-Unis doivent avancer rapidement pour rester compétitifs et rester un leader dans la communauté spatiale mondiale.* »³. Ces déclarations sont à remettre dans un double contexte. Au plan interne tout d'abord, les discussions politiques portant sur le calibrage du budget de la NASA pour l'année fiscale 2022 battent leur plein. Or, le projet de loi publié par le Sénat propose 24,83 milliards de dollars pour la NASA, soit un peu plus que les 24,8 milliards demandés par l'administration Biden, mais moins que les 25,04 milliards du projet de loi de la Chambre des Représentants⁴. Le

projet de *Human Landing System* (HLS), qui doit aboutir à la conception d'un module lunaire habité pour le programme Artémis, est emblématique de ces débats, l'administrateur de la NASA Bill Nelson l'estimant sous-financé⁵. Dans ces conditions, l'argument des progrès chinois dans le domaine spatial peut remobiliser certains des parlementaires sceptiques. Au plan externe, en effet, cette audition s'est tenue quelques jours après que le *Financial Time* eut rendu compte de l'essai par la Chine d'un supposé vecteur nucléaire hypersonique en août 2021⁶. La nature exacte du véhicule lancé est encore discutée et n'a pas de rapport direct avec les technologies de propulsion spatiale nucléaire. Ce test illustre cependant la difficulté d'évaluer l'état d'avancement des recherches chinoises et l'ampleur des efforts financiers consentis. Les ambitions de Pékin sont, en tout cas, réelles.

Le 16 novembre 2017, la *China Aerospace Science and Technology Corporation* (CASC), une des deux corporations majeures du programme spatial chinois, publiait une précisément une feuille de route s'étendant jusqu'en 2045, et prévoyant la mise en service de navettes à propulsion nucléaire autour de 2040⁷. Cet horizon est souvent celui envisagé pour les premiers vols habités à destination de Mars.

¹ National Aeronautics and Space Administration

² « *Strategic competitors including China are aggressively investing in a wide range of space technologies, including nuclear power and propulsion.* » Source : United States House Committee on Science, Space, and Technology, *Accelerating deep space travel with space nuclear propulsion*, videoconference, 20 octobre 2021, 56 min 38s, science.house.gov, <https://science.house.gov/hearings/accelerating-deep-space-travel-with-space-nuclear-propulsion>, consulté le 2 novembre 2021.

³ Aud. Cit., 57min 25s.

⁴ FOUST Jeff, « Senate appropriators direct NASA to select second Artemis lunar lander », article, publié le

19 octobre 2021, spacenews.com, <https://spacenews.com/senate-appropriators-direct-nasa-to-select-second-artemis-lunar-lander/>, consulté le 2 novembre 2021.

⁵ Art. Cit. e.

⁶ WALL Mike, « China successfully tested hypersonic weapon in August: report », article, publié le 19 octobre 2021, www.space.com, <https://www.space.com/china-hypersonic-weapon-test-august>, consulté le 2 novembre 2021.

⁷ JONES Andrew, « China sets out long-term space transportation roadmap including a nuclear space shuttle », article, publié le 16 novembre 2017, findchina.info, <https://findchina.info/china-sets-out-long-term-space-transportation-roadmap-including-a-nuclear-space-shuttle>, consulté le 2 novembre 2021.

À plus court terme, et de son côté, le bureau d'études russe *KB Arsenal* de Saint Pétersbourg a dévoilé le 17 septembre 2020 les images d'une maquette d'un remorqueur à propulsion nucléaire électrique⁸. Baptisé TEM pour *Transport and Energy Module*, il doit être la pièce centrale du complexe d'exploration *Zeus*, dont l'objectif est d'emmener simultanément des sondes vers la Lune, puis Vénus et enfin Jupiter en un unique voyage de 4 à 5 ans⁹. L'expérience du bureau KB Arsenal, issue des satellites militaires russes à énergie nucléaire US-A, US-P et Plazma-A depuis les années 1960¹⁰, crédibilise en apparence le projet.

Dans ce contexte, il est pertinent de s'interroger de manière synthétique sur les développements américains, d'identifier leurs enjeux, ainsi que leurs implications capacitaires. Une étude comparative des programmes russes et américains, adossée à une remise en contexte historique complète, fera l'objet d'une publication ultérieure de l'IESD.

⁸ ZAK Anatoly, « Russia reveals a formidable nuclear-powered space tug », article, 17 septembre 2020, dernière mise à jour le 25 août 2021, www.russianspaceweb.com, <https://www.russianspaceweb.com/tem.html>, consulté le 2 novembre 2021.

⁹ TASS Russian news agency, « First mission of Russia's nuclear-powered space tug to take 50 months – The first flight has been scheduled for 2030 », article, publié le 22 mai 2021, tass.com, <https://tass.com/science/1292721>, consulté le 2 novembre 2021.

¹⁰ ZAK Anatoly, « US-A and US-P military satellites », article, janvier 2020, dernière mise à jour le 25 juin 2021, www.russianspaceweb.com, <https://www.russianspaceweb.com/us.html>, consulté le 2 novembre 2021. Il s'agit d'un de ces satellites, Cosmos 954, qui s'est désintégré au-dessus des régions arctiques du Canada en 1978, causant le premier incident nucléaire spatial. Un accord fut conclu le 2 avril 1981 entre le Canada et l'Union soviétique, prévoyant le paiement de 3 000 000 dollars canadiens en réparations.

La *Space Policy Directive* - 6, cadre stratégique toujours effectif de l'administration Trump pour l'énergie et la propulsion nucléaire spatiale

La Maison-Blanche est, historiquement, l'initiatrice de toutes les politiques spatiales américaines. La raison en est très simple : la technologie des fusées et l'énergie nucléaire ont été associées dès le début des années 1950, que ce soit par les missiles balistiques indispensables à la dissuasion, ou comme moyen de propulsion. Il est d'ailleurs frappant de constater que quasiment toutes les puissances astronautiques sont des puissances nucléaires, et que celles envisageant l'énergie atomique comme moyen de propulsion sont toutes au premier rang de la hiérarchie des relations interétatiques.

Si l'énergie nucléaire n'a jamais réellement disparu de l'esprit des planificateurs de missions planétaires, elle n'a en revanche fait l'objet d'un véritable soutien politique aux États-Unis qu'à deux reprises. La première concerne le projet Rover, lancé en 1955 (contrat entre l'*US Atomic Energy Commission* et Westinghouse). La deuxième concernait le programme NERVA (*Nuclear Engine for Rocket Vehicle Application*), à partir de 1961, en association avec la NASA. Les résultats du programme dépassèrent toutes les espérances, puisqu'en 1969, la NASA disposait déjà d'un moteur nucléaire testé et opérationnel aux performances supérieures à tout ce qui se fait de mieux encore aujourd'hui. Le projet fut cependant abandonné en même temps que l'*Integrated Program Plan*¹¹ en 1972, conséquemment au désintérêt politique relatif qui suivit le triomphe du programme Apollo. Les programmes ultérieurs n'atteignirent jamais un tel degré d'avancement.

¹¹ DRYE Paul, « Mars Expedition 1969 : NASA's Waterloo », article, publié le 8 août 2012, falsesteps.wordpress.com, <https://falsesteps.wordpress.com/2012/08/08/mars-expedition-1969-nasas-waterloo/>, consulté le 2 novembre 2021.

Depuis 2017 cependant, les programmes spatiaux nucléaires américains ont été renouvelés, profitant de la relance des ambitions lunaires par l'administration Trump avec le programme Artémis. Le 16 décembre 2020, le président Trump signait la *Space Policy Directive - 6*, ou SPD-6¹², définissant la stratégie spatiale américaine en matière d'énergie nucléaire dans l'Espace. Substantiellement, il s'agit d'abord d'une feuille de route prévoyant la reconstitution des capacités de traitement du combustible nucléaire nécessaires aux systèmes spatiaux d'ici le milieu de la décennie, et l'essai d'un système d'alimentation nucléaire de surface pour les missions lunaires d'ici 2030. L'objectif de la directive est double. Elle apporte, d'une part, un soutien et un cadre politique aux recherches nucléaires de la NASA en fixant la priorité sur la *Fission Surface Power* (FSP), et en l'engageant sur la voie de la Propulsion Nucléaire Thermique (NTP). Elle tente, d'autre part, de rationaliser et centraliser les initiatives du *Department of Defense*, du *Department of Energy* et de la NASA.

Le 12 janvier 2021, la SPD-6 a été complétée par un décret¹³ définissant un espace commun de coopération entre le *Department of Defense* et la NASA, centré sur les applications militaires des technologies nucléaires spatiales (sections 3 et 4). Il comprend notamment la démonstration de micro-réacteurs (d'une capacité de production électrique inférieure à 10 MW), c'est-à-dire une classe de Small Modular Reactors (SMR), destinés

à l'alimentation autonome des sites de défense. La coopération s'étend également au *Department of Energy* et au *Department of Commerce*.

Pour le moment, l'administration Biden n'est pas revenue sur ce cadre politique. Au contraire, le nouveau président semble maintenir la direction imprimée par son prédécesseur, une continuité inédite depuis le programme Apollo. Il sera donc intéressant d'observer les éventuelles inflexions de la politique spatiale américaine dans les prochaines années, bien que les progrès rapides de la Chine rendent improbable un changement majeur dans les développements en cours.

La Fission Surface Power, développement prioritaire d'une technologie applicable aux systèmes de propulsion nucléaires électriques

Le besoin d'un système capable de fournir une alimentation électrique dans des conditions où l'énergie solaire est indisponible a été identifié par la NASA bien avant que la SPD-6 n'en fasse une priorité. La *Fission Surface Power* FSP peut soutenir une petite base lunaire pendant au moins dix ans, comprenant les nuits de quatorze jours. Elle permettrait également l'extraction de l'oxygène et des minéraux contenus dans le régolithe¹⁴, autant pour la survie des astronautes que la production de carburant et de pièces *in situ*.

C'est pourquoi la NASA a lancé le programme *Kilopower* en 2017, avec une enveloppe initiale de 15 millions de dollars¹⁵. Son objectif est de mettre

¹² White House, *Memorandum on the National Strategy for Space Nuclear Power and Propulsion (Space Policy Directive-6)*, 16 décembre 2020, [www.whitehouse.gov, https://trumpwhitehouse.archives.gov/presidential-actions/memorandum-national-strategy-space-nuclear-power-propulsion-space-policy-directive-6/](https://trumpwhitehouse.archives.gov/presidential-actions/memorandum-national-strategy-space-nuclear-power-propulsion-space-policy-directive-6/), consulté le 2 novembre 2021.

¹³ White House, *Executive Order on Promoting Small Modular Reactors for National Defense and Space Exploration*, 12 janvier 2021, [www.whitehouse.gov, https://trumpwhitehouse.archives.gov/presidential-actions/executive-order-promoting-small-modular-reactors-national-defense-space-exploration/](https://trumpwhitehouse.archives.gov/presidential-actions/executive-order-promoting-small-modular-reactors-national-defense-space-exploration/), consulté le 2 novembre 2021.

¹⁴ Selon la définition de George P. Merrill datant de 1897, le régolite est le manteau de débris provenant de la fragmentation, par des actions physiques ou chimiques, de la roche sous-jacente ou roche mère. Il désigne donc la couche de débris géologiques qui recouvre la surface d'un corps céleste.

¹⁵ LISOIR Hugo et LISOIR Maxime, « US Space Corps/ Projet Kilopower / Télescope XRAM », *Dernières Nouvelles des Etoiles*, 11 juillet 2017, www.youtube.com,

au point un design capable de fournir entre 1 et 10 kW pour les premiers prototypes, et jusqu'à 150 kW pour les futures versions martiennes. L'horizon fixé est la seconde moitié de la décennie 2020, coïncidant avec les objectifs du programme Artémis. Le 2 mai 2018, le NASA's Glenn Research Center à Cleveland a annoncé que la première phase du programme avait été couronnée de succès,

puisque le prototype KRUSTY (*Kilowatt Reactor Using Stirling Technology*) a été capable de fournir

1 kW pendant vingt-huit heures¹⁶. La prochaine étape est la conception d'un modèle utilisant de l'uranium faiblement enrichi, d'une puissance de 10 kW, pour un premier test de déploiement au milieu de la décennie.

Les applications sont prioritairement tournées vers des infrastructures au sol, telles qu'une base lunaire, mais intègrent aussi la possible alimentation de systèmes de propulsion électrique avancés. Pour évaluer les performances d'un système de propulsion, deux données sont particulièrement importantes : l'impulsion spécifique - notée *Isp* et exprimée en secondes (s) - et la poussée - exprimée en newtons (N). L'*Isp* indique le temps pendant lequel le moteur peut produire une poussée équivalente à 1 kg en utilisant 1 kg de carburant. Plus elle est élevée, plus le moteur peut fournir une accélération importante avec une même masse de carburant. La poussée détermine quant à elle le temps qu'il faut au moteur pour atteindre l'accélération visée. Les moteurs électriques utilisent le courant, d'origine solaire ou nucléaire, pour ioniser des gaz et les éjecter à très grande vitesse, produisant des impulsions spécifiques considérables de l'ordre de 2000 à 10000 secondes. Elles sont cependant obtenues au détriment de la poussée, qui n'excède que rarement quelques dizaines de

newtons, impliquant des temps d'accélération très long. Couplée à la très forte densité énergétique d'un réacteur nucléaire, cette solution permet de propulser des vaisseaux légers pour des explorations très lointaines, d'où un intérêt certain pour les sondes interplanétaires. Le tableau ci-dessous compare les performances du système russe TEM avec celles des deux meilleurs moteurs à combustion chimique du monde : le Rd-0120 russe¹⁷ et le *Space Shuttle Main Engine* (SSME) américain¹⁸.

Système/moteur	TEM	Rd-0120	SSME
Pays	Russie	Russie	États-Unis
Type	Nucléaire électrique	Chimique	Chimique
Impulsion spécifique dans le vide (<i>Isp</i>)	7000 s	455 s	453 s
Poussée (en kilonewtons)	0,018 kN	1961 kN	2278 kN

Il existe cependant une famille de concepts de moteurs nucléaires capables d'allier très grande *Isp* et forte poussée : la propulsion nucléaire thermique.

Des recherches pour la mise au point d'un système de propulsion nucléaire thermique : une clé technologique pour des opérations spatiales à forts besoins énergétiques ?

La propulsion nucléaire thermique consiste à utiliser un cœur de réacteur nucléaire pour chauffer une masse propulsive, typiquement de l'hydrogène liquide. Il existe trois types de configuration pour un cœur : solide, liquide ou

<https://www.youtube.com/watch?v=JtpEvoPGMrA>
consultée le 2 novembre 2021.

¹⁶ FOUST Jeff, « NASA considering flight test of space nuclear reactor technology », article, publié le 3 mai 2018, *spacenews.com*, <https://spacenews.com/nasa-considering-flight-test-of-space-nuclear-reactor-technology/>, consulté le 2 novembre 2021.

¹⁷ WADE Mark, Rd-0120, article, *www.astronautix.com*, <http://www.astronautix.com/r/rd-0120m.html>, consulté le 2 novembre 2021.

¹⁸ WADE Mark, SSME, article, *www.astronautix.com*, <http://www.astronautix.com/s/ssme.html>, consulté le 2 novembre 2021

gazeux, chacun avec des performances théoriques plus hautes que les autres au prix d'une complexité grandissante. La configuration qui retiendrait actuellement l'attention des ingénieurs est celle des cœurs solides, proposant traditionnellement une *Isp* de 800 à 1200s, et une poussée modulable pouvant aller jusqu'à 300 000 N ou plus. Il s'agit d'une conception largement éprouvée expérimentalement par le programme NERVA entre 1961 et 1972, mais qui, après presque 50 ans d'arrêt de la recherche et développement, doit être intégralement repensée avec les progrès des matériaux et de l'informatique contemporaine. Les exigences de sécurité et de non-prolifération actuelles doivent aussi être prises en compte.

C'est dans cet objectif que, le 3 août 2017, la NASA a signé un contrat de 18,8 millions de dollars sur trois ans avec *BWX Technologies*¹⁹. Il concernait la réalisation d'un concept de réacteur nucléaire thermique à vocation spatiale. Ce budget a été alloué dans le cadre du programme *Game Changing Development* de la NASA, dont l'objectif est d'identifier et de tester les ruptures technologiques susceptibles de modifier la façon dont la NASA conçoit ses missions spatiales²⁰. *BWXT* est une société spécialisée dans la conception de solutions et de carburants nucléaires, et fabrique notamment les barres de combustibles des réacteurs des porte-avions et des sous-marins de l'*US Navy*.

¹⁹ ANON., « *BWXT Awarded \$18.8 Million Nuclear Thermal Propulsion Reactor Design Contract by NASA* », article, publié le 3 août 2017, www.businesswire.com, <https://www.businesswire.com/news/home/20170803005233/en/BWXT-Awarded-18.8-Million-Nuclear-Thermal-Propulsion-Reactor-Design-Contract-by-NASA>, consulté le 2 novembre 2021.

²⁰ LISOIR Hugo et LISOIR Maxime, « *Moteur plasma / Tau Ceti / Le retour de Nerva ?* », *Dernières Nouvelles des Etoiles*, 15 août 2017, www.youtube.com, <https://www.youtube.com/watch?v=u0-Tk46wal0&t=358s>, consultée le 2 novembre 2021.

Le 13 juillet 2021, l'administrateur de la NASA pour les technologies spatiales Jim Reuters a annoncé 3 contrats, d'environ 5 millions de dollars chacun sur un an, pour des études de concepts d'un moteur nucléaire thermique :

- Un contrat avec *BWXT* et *Lockheed Martin*.
- Un second avec *General Atomics Electromagnetic Systems*, en collaboration avec *X-energy* et *Aerojet Rocketdyne*.
- Et un dernier avec *Ultra Safe Nuclear Technologies*. Cette société travaillera avec sa société mère *Ultra Safe Nuclear Corporation*, ainsi qu'avec *Blue Origin*, *General Electric Hitachi Nuclear Energy*, *General Electric Research*, *Framatome* et *Materion*²¹.

Il est à noter ici la présence de sociétés qui ne sont pas nécessairement des acteurs historiques des technologies nucléaires américaines, témoignant de l'arrivée à maturité du *New Space* américain.

La NASA n'est cependant pas la seule agence américaine engagée dans la voie de la propulsion nucléaire thermique. Le 12 avril 2021, la DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*) a lancé le programme DRACO, pour *Demonstration Rocket for Agile Cislunar Operations*. L'ambition est claire et le fait qu'elle émane d'une agence du *Department of Defense* n'est pas anodin. L'objectif du programme est le lancement d'un vaisseau spatial à propulsion nucléaire thermique dès 2025. Le commandant Nathan Greiner, chef du programme DRACO, résume ainsi tout l'intérêt de ce système de propulsion pour les activités de défense : « *Manœuvrer rapidement dans le milieu spatial a toujours été un défi, car les systèmes actuels de propulsion spatiale électrique et chimique présentent, respectivement, des*

²¹ FOUST Jeff, « *NASA considering flight test of space nuclear reactor technology* », article, publié le 3 mai 2018, spacenews.com, <https://spacenews.com/nasa-considering-flight-test-of-space-nuclear-reactor-technology/>, consulté le 2 novembre 2021.

inconvenients en termes de rapport poussée/poids et d'efficacité propulsive²² ».

Pour mener à bien les premières études, la DARPA a sélectionné là aussi trois sociétés pour une période de 18 mois. *General Atomics*, acteur historique de la propulsion spatiale nucléaire, obtient 22 millions de dollars, *Lockheed Martin* 2,9 millions, et *Blue Origin* 2,5 millions de dollars. La présence de *Blue Origin* est emblématique des sociétés du *New Space* qui travaillent sur des technologies toujours plus sensibles, historiquement réservées aux seuls États. Le fait que plusieurs contractants soient communs aux initiatives de la NASA et de la DARPA nous permet de saisir la dualité des développements nucléaires spatiaux aux États-Unis.

L'enjeu de tous ces programmes est l'articulation de l'option nucléaire thermique et nucléaire électrique pour les futures explorations dans une feuille de route cohérente, en prenant en compte les enjeux de sûreté et de sécurité internationale.

Des développements technologiques au cœur d'enjeux de sûreté et de sécurité internationale

Un aspect spécifique des enjeux politiques auxquels doivent faire face les développements spatiaux américains est la gestion du risque environnemental. Celle-ci est étroitement liée à la question de la prolifération nucléaire dans l'Espace, en particulier du point de vue juridique.

²² « *Rapid maneuver in the space domain has traditionally been challenging because current electric and chemical space propulsion systems have drawbacks in thrust-to-weight and propellant efficiency, respectively* », ERWIN Sandra, « DARPA selects Blue Origin, Lockheed Martin to develop spacecraft for nuclear propulsion demo », article, publié le 12 avril 2020, *spacenews.com*, <https://spacenews.com/darpa-selects-blue-origin-lockheed-martin-to-develop-spacecraft-for-nuclear-propulsion-demo/>, consulté le 2 novembre 2021.

La gestion du risque, avance certains commentateurs, est d'avantage un problème de relations publiques que d'ingénierie. En 1997, le lancement de la sonde Cassini, dotée d'un générateur thermoélectrique à radioisotopes (RTG)²³ pour son alimentation en énergie, avait provoqué d'importantes manifestations d'opposants au nucléaire. Ceci, alors même que les RTGs avait été conçu et testés pour résister à l'éventuelle explosion du lanceur au décollage. Néanmoins, il est certain que lorsque les développements spatiaux nucléaires actuels quitteront les planches à dessin, la gestion de la relation avec les différentes composantes de la société civile sera un sujet central de la politique spatiale américaine. L'issue des débats dépendra très certainement de la structuration de l'opinion publique. En la matière, les États-Unis ont une certaine avance sur les autres puissances spatiales occidentales, avec une implication grandissante des structures fédérales dans l'entretien et la mobilisation de la passion populaire pour l'Espace. L'*US Space Force*, au-delà de sa fonction de commandement militaire, est aussi un formidable outil d'influence interne et externe. Son pouvoir centralisateur la positionne en défenseuse attirée du secteur spatial au côté de la NASA, engageant les luttes politiques et bureaucratiques nécessaires, tout en entretenant une communauté d'experts spatiaux à part entière²⁴.

²³ Un générateur thermoélectrique à radioisotope, ou RTG (pour *Radioisotope Thermoelectric Generator*), produit de l'électricité à partir de la chaleur résultant de la désintégration radioactive de matériaux riches en un ou plusieurs radioisotopes, généralement du plutonium 238. Cependant, aucune réaction de fission ne s'y produit. Les RTG présentent les avantages d'être simples et de permettre une alimentation électrique à des distances où l'énergie solaire est trop lointaine pour être exploitée.

²⁴ PENENT Guilhem, « *Space Force*, une mise en contexte », *Défense & Sécurité Internationale*, n°138, Novembre – Décembre 2018, pp. 96-100, p. 99

Quoiqu'il en soit, la technologie s'adaptera aux exigences politiques. Cela concernera les phases critiques des lancements des réacteurs, pour lesquelles les risques sont connus, les éventuelles conséquences prévisibles, et les équipes entraînables. La question des orbites sur lesquelles les systèmes seront stationnés fera certainement aussi l'objet d'arbitrages politiques. À ce sujet, les études menées par Boeing dans le cadre de la *Space Exploration Initiative* du président George H. W. Bush en 1989 donnent un aperçu de ce que pourrait être l'approche américaine : un rapport en particulier, concernant une architecture de mission pour un vaisseau spatial à propulsion ionique alimenté par un réacteur de 40 MW²⁵, prévoit ainsi une orbite elliptique avec un périégée²⁶ à 400 km d'altitude. Un tel positionnement, bien que plus coûteux à atteindre lors du lancement, minimise les risques de rentrée atmosphérique à risque.

Le problème du degré d'enrichissement du combustible pour le cœur du réacteur sera plus délicat à traiter. S'il existe un intérêt technique²⁷ à utiliser de l'uranium hautement enrichi (désigné HEU, de 20 à 85%), l'essentiel des designs proposés aux États-Unis aujourd'hui se focalisent sur de l'uranium faiblement enrichi (de 2 à 20% pour le *Low Enriched Uranium* (LEU), et de 5 à 20% pour le *High-Essay Low-Enriched Uranium* (HALEU)). Cette direction est confirmée par la

SPD-6 dans sa section 3 (b), qui, sans exclure l'usage du HEU, le conditionne au respect d'un certain nombre de critères²⁸. Le décret du 12 janvier 2021 a chargé par ailleurs le *Department of Energy* de transférer la technologie permettant la production d'uranium faiblement enrichi au secteur commercial afin de l'augmenter (section 6)²⁹. Le rapport *LEU NTP Engine System Trades and Mission Options* publié en 2019 par *Aerojet Rocketdyne*³⁰ permet de se faire une idée des performances d'un tel système de propulsion.

Les raisons politiques et techniques de ce choix sont nombreuses, et celle qui retient notre attention ici est la prise en compte des considérations liées à la non-prolifération. Il est, en effet, généralement considéré que les exigences de sécurité doivent être plus élevées pour les cœurs à uranium hautement enrichis (HEU), notamment en raison de l'utilisation du même combustible dans la fabrication des armes nucléaires. Au plan international, l'utilisation de HEU par les États-Unis dans leurs réacteurs spatiaux impliquerait des complications pour leurs postures vis-à-vis des utilisations civiles du HEU par les autres pays. Au plan interne enfin, les problématiques de non-prolifération ont un impact sur les coûts et les calendriers des programmes, ainsi que la capacité des acteurs commerciaux à participer aux développements des réacteurs. Le choix du LEU ou du HALEU a donc une pertinence

²⁵ Boeing, *Space transfer concepts and analysis for exploration missions. Implementation plan and element description document (draft final). Volume 5: Nuclear electric propulsion vehicle*, 8 mars 1991, <https://ntrs.nasa.gov/citations/19930013801>, consulté le 2 novembre 2021.

²⁶ Point de l'orbite d'un objet qui est le plus proche de la Terre.

²⁷ Pour une étude comparative exhaustive des enjeux techniques et politiques du degré d'enrichissement des cœurs des réacteurs nucléaires spatiaux, voir National Academies of Sciences-Engineering-Medicine, *Space Nuclear Propulsion for Human Mars Exploration*, 2021, <https://www.nap.edu/catalog/25977/space-nuclear-propulsion-for-human-mars-exploration>, consulté le 2 novembre 2021.

²⁸ « Before selecting HEU or, for fission reactor systems, any nuclear fuel other than low-enriched uranium (LEU), for any given SNPP design or mission, the sponsoring agency shall conduct a thorough technical review to assess the viability of alternative nuclear fuels. » White House, *Memorandum on the National Strategy for Space Nuclear Power and Propulsion (Space Policy Directive-6)*, doc. Cit.

²⁹ White House, *Executive Order on Promoting Small Modular Reactors for National Defense and Space Exploration*, Doc. Cit.

³⁰ Aerojet Rocketdyne, *LEU NTP Engine System Trades and Mission Options*, 2019, <http://anstd.ans.org/NETS-2019-Papers/Track-2--Mission-Concepts-and-Logistics/abstract-29-0.pdf>, consulté le 2 novembre 2021.

industrielle, en plus d'être un argument de politique intérieure dans l'obtention de l'approbation de lancement.

Dans la mesure où les technologies spatiales nucléaires sont un objectif commun aux programmes spatiaux américains, russes et chinois, mais que ces trois pays ne feront probablement pas les mêmes choix techniques, il faut s'attendre à ce que le droit spatial international s'empare de la question. D'autant que les usages duaux de ces développements ne manquent pas, ce qui ne manquera pas de stimuler un besoin généralisé d'encadrement juridique de ces évolutions.

Une possible extension capacitaire en orbite basse et au-delà

La possibilité de concevoir des engins spatiaux capables de très fortes accélérations en peu de temps présente des « *avantages et des opportunités* », comme l'a déclaré le Général David Thompson le 28 juillet 2021³¹. En évoquant le programme DRACO comme un « *banc d'essai* » technologique, le chef adjoint de l'*US Space Force* semble acquiescer aux recommandations du rapport « *A Primer on Cislunar Space* » publié le 23 juin 2021³². Dans ce rapport, le *Space Vehicles Directorate* conseille à l'*US Space Force* de se préparer à des opérations entre la Terre et la Lune. L'un des scénarios envisagés par l'*US Space Force* est de pouvoir déployer et déplacer des satellites ou d'autres véhicules dans l'Espace

³¹ ERWIN Sandra, « Space Force sees « advantages and opportunities » in nuclear-powered space missions », article, publié le 19 octobre 2021, *spacenews.com*, <https://spacenews.com/senate-appropriators-direct-nasa-to-select-second-artemis-lunar-lander/>, consulté le 2 novembre 2021.

³² Air Force Research Laboratory – Space Vehicles Directorate, *A primer on Cislunar Space*, 23 juin 2021, <https://www.afrl.af.mil/Portals/90/Documents/RV/A%20Primer%20on%20Cislunar%20Space%20Dist%20PA2021-1271.pdf?ver=vs6e0sE4PuJ51QC-15DEfg%3d%3d>, consulté le 2 novembre 2021.

cis-lunaire³³. Cette ambition est à remettre en perspective par rapport aux ambitions occidentales et chinoises d'établir des bases permanentes sur la Lune durant la décennie 2030. Ainsi, au plan prospectif, ces développements augurent d'une progressive extension des opérations de surveillance militaire jusqu'aux orbites lunaires d'ici 2040.

Sur ce même horizon de vingt ans, la relance des travaux de conception pour des réacteurs spatiaux embarqués, comme système de propulsion et comme source d'énergie, autorise le réexamen de projets de positionnement d'armes antisatellites et anti-missiles balistiques initialement envisagés pour l'Initiative de Défense Stratégique de l'ère Reagan. La forte densité énergétique et la faible masse des solutions nucléaires permettent l'alimentation de systèmes à très fort besoin énergétique, mais pas ou peu générateurs de débris : lasers de forte puissance³⁴ ou rayons de particules neutres³⁵. En matière de lasers, il est d'ailleurs possible d'utiliser directement l'environnement extrêmement radioactif d'un cœur de réacteur nucléaire comme milieu de génération pour les lasers³⁶.

Ces systèmes spatiaux, souvent extrêmement massifs (de l'ordre d'une centaine de mètres de

³³ ERWIN S. art. cit. e.

³⁴ Citons ici l'exemple du projet de laser orbital anti-missile balistique « Zenith Star » de Martin Marietta. CHUNG Winchell, « Martin Marietta Zenith Star », article, [www.projectrho.com](http://www.projectrho.com/public_html/rocket/planetary_attack.php#zenithstar), http://www.projectrho.com/public_html/rocket/planetary_attack.php#zenithstar, consulté le 2 novembre 2021.

³⁵ CHUNG Winchell, « SDI Neutral Particle Beam », article, [www.projectrho.com](http://www.projectrho.com/public_html/rocket/spacegun_convent2.php#id--Particle Beams--SDI Neutral Particle Beam), http://www.projectrho.com/public_html/rocket/spacegun_convent2.php#id--Particle Beams--SDI Neutral Particle Beam, consulté le 2 novembre 2021.

³⁶ ANON, « From Fission to Photon », article, [www.projectrho.com](http://www.projectrho.com/public_html/rocket/spacegun_convent2.php#reactorlaser1), http://www.projectrho.com/public_html/rocket/spacegun_convent2.php#reactorlaser1, consulté le 2 novembre 2021.

long et d'une centaine de tonnes), requièrent des lanceurs lourds pour leurs décollages. Or, rappelons que sur les six lanceurs de plus de 50 tonnes de capacité de lancement en orbite terrestre basse actuellement en développement dans le monde, trois sont américains : le *Starship* de *Space X*, le *Space Launch System* de Boeing, et la *New Glenn* de *Blue Origin*³⁷. La conjonction de ces deux ruptures capacitaires, lanceurs et nucléaire, renouvelle le champ des possibles de l'arsenalisation de l'Espace. Dans ce cadre, une analyse technico-capacitaire des lanceurs lourds actuellement en développement serait pertinente.

Conclusion

Les ambitions spatiales nucléaires des États-Unis bénéficient désormais d'une conjoncture politique inédite depuis les années 1960, tant sur le plan interne qu'international. Les pouvoirs publics américains ont décidé d'engager leurs administrations dans deux directions complémentaires : la première est celle des réacteurs destinés à des applications d'alimentation énergétiques pour les opérations de surface (programme *Kilopower*) et la seconde vise à la mise au point d'un système de propulsion nucléaire thermique (programme DRACO). Destinées en priorité à l'exploration lunaire, les applications de ces développements demeurent duales. Les systèmes reposeront sur des cœurs à uranium faiblement enrichi, autant pour des raisons techniques que politiques. Il sera cependant intéressant d'observer dans quelle mesure l'administration Biden modifiera le cadre politique de ces programmes, notamment la SPD-6 du 16 décembre 2020 et le décret du 12 janvier 2021 qui la complète.

La structuration de la société civile américaine autour des problématiques spatiales sera un élément sensible pour la conduite de la politique

spatiale nucléaire, tant pour des questions environnementales que militaires. Les évolutions en la matière seront intéressantes à suivre, ainsi que les initiatives juridiques internationales afin de faire émerger un cadre légal pour les infrastructures nucléaires en orbite et sur les corps célestes. De fait, les enjeux de prolifération nucléaire vont être un sujet grandissant du droit spatial.

Le déploiement de solutions à énergie nucléaire rend possible l'extension des opérations spatiales civiles et militaires au-delà de l'orbite basse. La maturité de nouveaux acteurs privés dans le secteur spatial et la confrontation idéologique mondiale renouvelée inscrivent le renouveau des programmes nucléaires spatiaux des États-Unis dans la durée. L'intérêt manifeste de l'*US Space Force* illustre la crédibilité de ruptures technologiques devant faire l'objet d'analyses attentives.

Les études stratégiques devraient échanger plus étroitement avec le domaine des sciences de l'ingénieur dans le secteur aérospatial afin de renforcer la crédibilité technique des réflexions capacitaires. Les opérations cis-lunaire et les technologies antisatellites non-génératrices de débris, couplées à des ruptures de capacités orbitales et énergétiques, devraient constituer les principaux champs d'évolutions majeures dans les deux prochaines décennies.

³⁷ Les autres lanceurs lourds en développement sont les CZ-5 DY (ex-Projet 921, 75 tonnes de capacité de lancement en LEO) et CZ-9 (140 tonnes de capacité) chinoises, et la Yenisei (50 tonnes de capacité) russe.

Bibliographie et sources

Articles

PENENT Guilhem, « *Space Force*, une mise en contexte », *Défense & Sécurité Internationale*, n°138, Novembre – Décembre 2018, pp. 96-100, p. 99.

Documents stratégiques

White House, *Memorandum on the National Strategy for Space Nuclear Power and Propulsion (Space Policy Directive-6)*, 16 décembre 2020, www.whitehouse.gov, <https://trumpwhitehouse.archives.gov/presidential-actions/memorandum-national-strategy-space-nuclear-power-propulsion-space-policy-directive-6/>

White House, *Executive Order on Promoting Small Modular Reactors for National Defense and Space Exploration*, 12 janvier 2021, www.whitehouse.gov, <https://trumpwhitehouse.archives.gov/presidential-actions/executive-order-promoting-small-modular-reactors-national-defense-space-exploration/>

Rapports et expertises

Aerojet Rocketdyne, *LEU NTP Engine System Trades and Mission Options*, 2019, <http://anstd.ans.org/NETS-2019-Papers/Track-2--Mission-Concepts-and-Logistics/abstract-29-0.pdf>

Air Force Research Laboratory – Space Vehicles Directorate, *A primer on Cislunar Space*, 23 juin 2021, <https://www.afrl.af.mil/Portals/90/Documents/RV/A%20Primer%20on%20Cislunar%20Space%20Dist%20A%20PA2021-1271.pdf?ver=vs6e0sE4PuJ51QC-15DEfg%3d%3d>

Boeing, *Space transfer concepts and analysis for exploration missions. Implementation plan and element description document (draft final). Volume 5: Nuclear electric propulsion vehicle*, 8 mars 1991, <https://ntrs.nasa.gov/citations/19930013801>

National Academies of Sciences-Engineering-Medicine, *Space Nuclear Propulsion for Human Mars Exploration*, 2021, <https://www.nap.edu/catalog/25977/space-nuclear-propulsion-for-human-mars-exploration>

Sitographie

ANON., « BWXT Awarded \$18.8 Million Nuclear Thermal Propulsion Reactor Design Contract by NASA », article, publié le 3 août 2017, www.businesswire.com, <https://www.businesswire.com/news/home/20170803005233/en/BWXT-Awarded-18.8-Million-Nuclear-Thermal-Propulsion-Reactor-Design-Contract-by-NASA>

ANON., « From Fission to Photon », article, www.projectrho.com, http://www.projectrho.com/public_html/rocket/spacegunconvent2.php#reactorlaser1.

CHUNG Winchell, « Martin Marietta Zenith Star », article, [www.projectrho.com](http://www.projectrho.com/public_html/rocket/planetaryattack.php#zenithstar),
http://www.projectrho.com/public_html/rocket/planetaryattack.php#zenithstar

CHUNG Winchell, « SDI Neutral Particule Beam », article, [www.projectrho.com](http://www.projectrho.com/public_html/rocket/spacegunconvent2.php#id--Particle Beams--SDI Neutral Particule Beam),
http://www.projectrho.com/public_html/rocket/spacegunconvent2.php#id--Particle Beams--SDI Neutral Particule Beam

DRYE Paul, « Mars Expedition 1969 : NASA's Waterloo », article, publié le 8 août 2012, falsesteps.wordpress.com,
<https://falsesteps.wordpress.com/2012/08/08/mars-expedition-1969-nasas-waterloo/>

ERWIN Sandra, « DARPA selects Blue Origin, Lockheed Martin to develop spacecraft for nuclear propulsion demo », article, publié le 12 avril 2020, spacenews.com, <https://spacenews.com/darpa-selects-blue-origin-lockheed-martin-to-develop-spacecraft-for-nuclear-propulsion-demo/>

ERWIN Sandra, « Space Force sees « advantages and opportunities » in nuclear-powered space missions », article, publié le 19 octobre 2021, spacenews.com, <https://spacenews.com/senate-appropriators-direct-nasa-to-select-second-artemis-lunar-lander/>

FOUST Jeff, « NASA considering flight test of space nuclear reactor technology », article, publié le 3 mai 2018, spacenews.com, <https://spacenews.com/nasa-considering-flight-test-of-space-nuclear-reactor-technology/>

FOUST Jeff, « Senate appropriators direct NASA to select second Artemis lunar lander », article, publié le 19 octobre 2021, spacenews.com, <https://spacenews.com/senate-appropriators-direct-nasa-to-select-second-artemis-lunar-lander/>

JONES Andrew, « China sets out long-term space transportation roadmap including a nuclear space shuttle », article, publié le 16 novembre 2017, findchina.info, <https://findchina.info/china-sets-out-long-term-space-transportation-roadmap-including-a-nuclear-space-shuttle>

TASS Russian news agency, « First mission of Russia's nuclear-powered space tug to take 50 months – The first flight has been scheduled for 2030 », article, publié le 22 mai 2021, tass.com,
<https://tass.com/science/1292721>

WADE Mark, Rd-0120, article, www.astronautix.com, <http://www.astronautix.com/r/rd-0120m.html>

WADE Mark, SSME, article, www.astronautix.com, <http://www.astronautix.com/s/ssme.html>

WALL Mike, « China successfully tested hypersonic weapon in August : report », article, publié le 19 octobre 2021, www.space.com, <https://www.space.com/china-hypersonic-weapon-test-august>

ZAK Anatoly, « Russia reveals a formidable nuclear-powered space tug », article, 17 septembre 2020, dernière mise à jour le 25 août 2021, www.russianspaceweb.com,
<https://www.russianspaceweb.com/tem.html>

ZAK Anatoly, « US-A and US-P military satellites », article, janvier 2020, dernière mise à jour le 25 juin 2021, www.russianspaceweb.com, <https://www.russianspaceweb.com/us.html>

Sources audiovisuelles

LISOIR Hugo et LISOIR Maxime, « US Space Corps/ Projet Kilopower / Télescope XRAM », *Dernières Nouvelles des Etoiles*, 11 juillet 2017, [www.youtube.com, https://www.youtube.com/watch?v=JtpEvoPGMrA](https://www.youtube.com/watch?v=JtpEvoPGMrA)

LISOIR Hugo et LISOIR Maxime, « Le retour de Nerva ? », *Dernières Nouvelles des Etoiles*, 15 août 2017, [www.youtube.com, https://www.youtube.com/watch?v=u0-Tk46wal0&t=358s](https://www.youtube.com/watch?v=u0-Tk46wal0&t=358s)

United States House Committee on Science, Space, and Technology, *Accelerating deep space travel with space nuclear propulsion*, videoconference, 20 octobre 2021, [science.house.gov, https://science.house.gov/hearings/accelerating-deep-space-travel-with-space-nuclear-propulsion](https://science.house.gov/hearings/accelerating-deep-space-travel-with-space-nuclear-propulsion)