

Énergie et exploration spatiale : le cas lunaire

Pour une feuille de route vers l'autonomie européenne



SEPTEMBRE / 2025

Note exploratoire

Coordination scientifique : Frank Carré, CEA

Coordination éditoriale : Alban Guyomarc'h, coordinateur du Groupe Objectif Lune de l'ANRT,
avec l'assistance de Jules Coeuillet, élève ingénieur ISAE-SUPAERO et stagiaire à l'ANRT au printemps 2024
Directrice de publication : Clarisse Angelier, déléguée générale de l'ANRT

Énergie et exploration spatiale : le cas lunaire

Pour une feuille de route vers l'autonomie européenne

Note exploratoire

Ces travaux sont soutenus financièrement par les souscripteurs FutuRIS :

AIR LIQUIDE - AMPIRIC-AIX-MARSEILLE UNIVERSITÉ - ANR - BERGER-LEVRAULT - BOUYGUES - CEA
CNRS - COMITÉ ROBOTIQUE FRANCE 2030 - DECATHLON - EDF - ENGIE - FRANCE UNIVERSITÉS
GENERAL ELECTRIC - INRIA - INSTITUT MINES TELECOM - INSTITUT PASTEUR - MINISTÈRE DE
L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE ET DE L'ESPACE - RÉGION PAYS DE LA LOIRE
RENAULT - SCHNEIDER ELECTRIC - SNCF - UDICE - VINCI

Le contenu n'engage que la responsabilité de l'ANRT en tant qu'auteur et non celle des institutions qui lui apportent son soutien.



Life Is On



Coordination scientifique : Frank Carré, CEA

Coordination éditoriale : Alban Guyomarc'h, coordinateur du Groupe Objectif Lune de l'ANRT,
avec l'assistance de Jules Coeuillet, élève ingénieur ISAE-SUPAERO et stagiaire à l'ANRT au printemps 2024
Directrice de publication : Clarisse Angelier, déléguée générale de l'ANRT

Contributeurs

- Yann ARNAUD, Université Paris 1 Panthéon Sorbonne.
- Aymeric CANTON, CEA.
- Laetitia CESARI, De Gaulle-Fleurance et SPATIO.
- Rémy CROXATTO, ArianeGroup.
- Thomas DELHON, Neamine.
- Nathalie DUPASSIEUX, CEA.
- Grégoire LAMBERT, Framatome.
- Marion LE FLEM, CEA.
- Alexandre MEURISSE, Neamine.
- Jean-Michel PEREIRA, École nationale des ponts et chaussées.
- Redamy PÉREZ-RAMOS, IPSA/LPTHE-Sorbonne Université.
- Eric PROUST, CEA.
- Nicolas REY-TORNERO, ingénieur.
- Sylvain RODAT, CNRS, laboratoire Promes.
- Delphine ROMA, Air Liquide.
- Michel SCHLEGEL, CEA.
- Brieuc SPRINDLER, Tractebel-Engie.
- Isabelle TISSERAND, anthropologue.

Nota bene : La mention des personnes suivantes comme contributeurs ne les engage pas sur le contenu du texte, ni elles-mêmes ni leur entreprise, ou leur organisation, et atteste uniquement de leur participation aux travaux ayant conduit à ce document.

Sommaire

Synthèse exécutive	7
Introduction.....	9
1. Dimensionner les besoins énergétiques	11
A. Dimensionnement énergétique des feuilles de route annoncées	11
B. Dimensionnement énergétique nécessaire pour répondre aux contraintes de l'environnement lunaire	13
C. Dimensionnement énergétique de précédents programmes d'exploration spatiale	13
L'approvisionnement énergétique de missions d'exploration passées, Apollo et au-delà	14
L'alimentation des stations spatiales orbitales	15
2. Produire l'énergie	17
A. Les technologies solaires, à court et moyen terme	17
Utilisation de l'énergie solaire lors de premières missions	18
Utilisations de l'énergie solaire pour une future base permanente	18
Les technologies de concentration solaire	19
B. Le rôle important du nucléaire spatial, à moyen terme	19
Les systèmes radio-isotopiques pour les systèmes d'instrumentation et les systèmes autonomes ..	20
<i>Utilisation des RHU pour fournir de l'énergie thermique</i>	<i>20</i>
<i>Les systèmes de conversion électrique pour une production continue d'électricité</i>	<i>21</i>
Les technologies de réacteur nucléaire pour les bases lunaires futures	22
Proposition stratégique : le rôle de la France et de l'Europe dans le domaine de la production énergétique pour l'exploration spatiale	24
3. Stocker l'énergie	27
A. Batteries électrochimiques	28
Les batteries primaires	28
Les batteries secondaires	28
B. Les piles à combustible régénératives	29
C. Méthodes alternatives de stockage	30
L'utilisation de volants d'inertie	30
Le stockage dans le régolithe	31
Proposition stratégique : le rôle potentiel de la France et de l'Europe pour le stockage d'énergie pour l'exploration spatiale	32
Conclusion.....	35
Pour une stratégie européenne en matière d'énergie pour l'exploration spatiale	35
Retombées potentielles pour les applications terrestres de technologies énergétiques développées pour l'exploration spatiale	36

Synthèse exécutive

L'exploration lunaire est redevenue un axe central des grandes puissances spatiales ; notamment avec le programme Artemis des États-Unis¹, mais aussi d'autres programmes lunaires, dont le programme chinois. Dans ce contexte, l'Europe s'apprête à redéfinir ses engagements pour l'exploration spatiale lors de la ministérielle de l'ESA de novembre 2025, moment charnière pour son positionnement dans le domaine.

Si ces programmes évoluent dans un climat budgétaire et géopolitique incertain, ils replacent néanmoins l'exploration au cœur des enjeux spatiaux. **Ils obligent à tracer de nouvelles feuilles de route technologiques et scientifiques.**

Un enjeu majeur apparaît alors : l'approvisionnement en énergie des outils et infrastructures utilisés pour l'exploration spatiale. **L'énergie constitue le socle indispensable et critique de toute présence sur la Lune** : assurer la survie pendant les nuits lunaires, maintenir les infrastructures robotiques, et celles qui seraient éventuellement habitées, permettre la mise en œuvre des objectifs d'exploration scientifique, etc. La capacité à produire, stocker et distribuer de l'énergie *in situ* conditionnera la pérennité des programmes. **Aussi, les acteurs ou les groupes d'acteurs capables de maîtriser l'ensemble de la chaîne détiendront une position programmatique majeure, susceptible de structurer les futures coopérations internationales.**

Il s'agit également d'avoir la capacité de satisfaire de façon incrémentale **un besoin énergétique progressif, fonction de l'évolution du dimensionnement des programmes d'exploration**. Par exemple, les besoins sont radicalement différents si l'on s'engage dans l'exploration humaine ou robotique de la Lune, de même que s'il faut également fournir de l'énergie à des équipements dédiés à l'utilisation des ressources. Dans le même temps, la Lune est un milieu hostile porteur de nombreux défis pour les équipements à sa surface : variations importantes de température, durée des nuits lunaires, poussières abrasives, terrains accidentés, etc. L'Europe peut se doter des technologies nécessaires pour surmonter

ces défis, et assurer ses ambitions d'exploration en toute autonomie.

Le rapport du Groupe Objectif Lune de l'ANRT aborde deux volets critiques – production et stockage de l'énergie – et identifie champs technologiques d'intérêt :

- **Solaire (court terme)** : Des panneaux photovoltaïques adaptés aux pôles lunaires, en particulier les panneaux verticaux (VSAT), associés à des technologies de stockage pour la nuit lunaire et complétés par des solutions de concentration solaire pour des usages thermiques.
- **Nucléaire (court terme – moyen terme)** : à court terme, des générateurs radio-isotopiques pour les systèmes autonomes et, à moyens et plus longs termes, des petits réacteurs nucléaires compacts pour l'alimentation continue des équipements.
- **Batteries électrochimiques** : une série de technologies matures mais limitées par des enjeux de masse.
- **Piles à combustible régénératives** : solution intéressante à explorer pour le stockage de l'énergie, qui pourra à long terme utiliser hydrogène et l'oxygène productibles sur place.

Dans certains des domaines précités, l'Europe spatiale bénéficie de savoir-faire existants, terrestres et spatiaux, qu'elle cherche actuellement à renforcer au travers d'études et de programmes de développement technologique : panneaux solaires spatiaux haute performance, expertise dans l'hydrogène, l'électrolyse et les piles à combustible, filière nucléaire terrestre complète couvrant extraction, combustibles, réacteurs et conversion chaleur-électricité.

Dans d'autres domaines, et notamment dans celui du nucléaire spatial, l'Europe est en situation de relative dépendance de partenaires étrangers, non seulement pour la fourniture des équipements concernés, ou du combustible nécessaire, mais aussi, au surplus, pour le lancement, ceci faute de cadre européen adapté. Si des programmes visent actuellement à améliorer la situation, un besoin de coordination à la fois des stratégies et des initiatives est néanmoins constaté par l'ensemble des parties prenantes ayant participé au travail de l'ANRT.

¹ Néanmoins, à l'heure de la finalisation de cette note en septembre 2025, les réaménagements du programme Artemis sont encore en cours aux États-Unis.

La structuration de filières dédiées à l'énergie pour l'exploration spatiale en Europe est identifiée comme un enjeu.

L'autonomie pour l'exploration spatiale repose sur des compétences techniques essentielles, qu'il s'agit pour l'Europe de maîtriser. L'approvisionnement énergétique des outils et des infrastructures d'exploration en fait partie. **La ministérielle de l'ESA, fin 2025, ainsi que les négociations en cours sur le prochain budget pluriannuel de l'UE (MFF 2028-2034) sont autant d'occasions de créer un momentum autour de l'élaboration puis de la mise en œuvre d'une feuille de route européenne à même d'assurer l'autonomie pour la production, le stockage et la distribution d'énergie pour l'exploration spatiale** : un domaine de compétences clés pour l'avenir spatial de l'Europe. Dans un climat marqué par la compétition et la fragilisation des coopérations, l'autonomie énergétique est un impératif stratégique. Elle renforcera la résilience de l'Europe, sa capacité à négocier des coopérations « service contre service » et son attractivité industrielle ; le tout en assurant une résilience certaine en cas de disruption des accords de coopération existants. **L'énergie pour l'exploration spatiale peut donc être un levier de coopération différentiant.**

Introduction

Ces six dernières années, **les programmes d'exploration de corps célestes et en particulier de la Lune sont revenus à l'agenda stratégique** de nombreux États spatiaux. C'est notamment le cas des États-Unis et de leurs partenaires dans le cadre du programme Artemis,² mais aussi de la Chine et de la Russie dans le cadre du programme ILRS. D'autres États ont également renforcé leurs programmes lunaires tels l'Inde, le Japon ou encore les Émirats Arabes Unis. **L'Europe abordera en novembre 2025 une réunion du Conseil ministériel de l'ESA**, un moment clé pour redéfinir ses engagements dans le domaine de l'exploration humaine et robotique.³

Si tous ces programmes lunaires sont sujets à caution, dans une période de contraintes budgétaires et de troubles géopolitiques, force est de constater qu'ils remettent l'exploration humaine et robotique des corps célestes au cœur des enjeux spatiaux. **De plus, ils invitent à dessiner des feuilles de route technologiques et scientifiques, en partie nouvelles.**

C'est notamment le cas dans le domaine de l'énergie, véritable défi pour ces programmes d'exploration. Il en va tout simplement de la fourniture d'énergie indispensable à la survie à la nuit lunaire, particulièrement froide et hostile, des infrastructures et des systèmes robotiques, ainsi que des astronautes éventuellement envoyés.

Ainsi, aux côtés de la maîtrise des technologies de lancement et de l'alunissage conditionnant l'accès à la Lune, **l'approvisionnement en énergie conditionnera la possibilité et la pérennité des activités menées sur site.** Les pays ou les régions du monde qui auront la capacité de fournir et de produire de l'énergie sur la Lune joueront donc **un rôle programmatique de premier plan.** L'accès à une énergie en continu et suffisante permettra le développement d'écosystèmes publics et privés accélérant la mise en œuvre de nouveaux volets programmatiques.

² A la date de rédaction de la note, le programme Artemis des États-Unis est en passe d'être redessiné à la suite des annonces budgétaires de l'administration du Président Donald Trump ; la configuration future du programme est donc sujette à caution.

³ Notamment à la suite des annonces états-unies précitées de l'abandon du lanceur SLS (qui embarquait jusqu'alors le vaisseau Orion, pour lequel l'ESA fournissait l'European Service Module) et l'abandon du Lunar Gateway pour lequel l'ESA fournissait plusieurs modules. Par ailleurs, c'est aussi au cours du deuxième semestre de l'année 2025 que l'UE commencera à dessiner son prochain budget pluriannuel, avec une place importante accordée aux programmes spatiaux de l'Union. Si le domaine de l'exploration ne relève pas, historiquement, de ses budgets, le nouvel atout stratégique de l'exploration humaine et robotique pourrait l'amener à s'y intéresser.

Dans ce contexte, la France et l'Europe peuvent jouer un rôle clé, en mobilisant un savoir-faire existant et reconnu sur les technologies énergétiques, sur Terre et dans l'espace ; le tout associé à un réseau de coopération spatiale étendu. En effet, l'Europe est déjà présente dans les domaines de la production d'énergie pour et dans l'espace, et pour l'exploration spatiale. Un exemple est donné par le vaisseau Orion, lancé pour la première fois lors de la mission Artemis I, dont l'alimentation électrique et thermique, notamment celle des systèmes supports de vie, était assurée par le module de service européen (*European Service Module*). Ces compétences seront essentielles pour les réseaux énergétiques d'une future exploration lunaire.

À moyen terme, des modules solaires photovoltaïques et thermiques permettront de répondre aux besoins énergétiques, au prix d'une dépendance aux périodes d'ensoleillement. À plus long terme, c'est dans le domaine de l'énergie nucléaire que l'Europe pourra contribuer, tant avec des générateurs radio-isotopiques que, peut-être, avec des réacteurs à fission. Au-delà de la production et du stockage de l'énergie, notamment grâce aux technologies de l'hydrogène (électrolyseurs, piles à combustible), l'Europe pourra aussi contribuer aux technologies de gestion/distribution et de conversion. **La note se concentre toutefois sur la production et le stockage.**

Ce sont ces différentes pistes qu'ont étudié les membres du Groupe de travail Objectif Lune de l'ANRT (GTOL), ceci dans le but d'encourager l'élaboration et la mise en œuvre d'une feuille de route européenne à même d'assurer l'autonomie européenne pour la production, le stockage et la distribution d'énergie pour l'exploration spatiale : un domaine de compétences clés pour l'avenir spatial de l'Europe. Il faut également prendre acte des contextes géopolitiques nouveaux au cœur desquels prennent place les programmes d'exploration spatiale. Dans un climat relativement durci de coopérations négociées, l'autonomie stratégique sur des blocs de compétences cruciaux est un impératif. L'énergie pour l'exploration spatiale en fait partie. Renforcer la position continentale en ce domaine permet de doter l'Europe spatiale d'un atout clé pour dessiner son tissu de coopération service-contre-service ; tout en assurant une résilience certaine en cas de disruption des accords de coopération existants.

L'énergie pour l'exploration spatiale peut donc être un levier de coopération différentiant.

Le cas d'application étudié ici est celui de la Lune, objet d'étude du GTOL. Néanmoins, les technologies évoquées peuvent aussi bénéficier aux activités spatiales orbitales ; ou à des destinations plus lointaines.

La présente note fonde son propos sur les feuilles de route accessibles et annoncées par les différents programmes d'exploration lunaire à la date de mai 2025. Elle sous-entend que l'architecture de ces programmes peut changer au cours des prochains mois, et que l'ensemble des éléments programmatiques annoncés sont encore à mettre en œuvre. Son propos cherche à envisager le rôle que pourrait assumer l'Europe dans ce contexte, et notamment dans le domaine de l'énergie pour l'exploration spatiale.

1. Dimensionner les besoins énergétiques

Le dimensionnement des besoins énergétiques des missions d'exploration peut **se fonder sur les feuilles de route annoncées**, et plus particulièrement celles des programmes états-unien et sino-russe⁴ (**A**). Ces feuilles de route peuvent également être confrontées aux **contraintes imposées par l'environnement lunaire** (**B**) et comparées aux précédents programmes d'exploration spatiale et à leurs solutions énergétiques, et plus particulièrement au programme Apollo (**C**).

A. Dimensionnement énergétique des feuilles de route annoncées

Deux feuilles de route concurrentes dessinent aujourd'hui l'architecture des missions lunaires, celle du programme Artemis conduit par les États-Unis et celle de l'ILRS conduite par la Chine en association avec la Russie. Avec des calendriers et des ambitions différentes⁵, les deux programmes partagent néanmoins **l'objectif d'établir une présence humaine sur la Lune, notamment au pôle Sud de notre satellite naturel**. De même, les deux programmes partagent un intérêt manifeste pour une meilleure connaissance des ressources de notre satellite naturel avec, à terme, l'utilisation locale de ces ressources (ISRU, *In-Situ Resources Utilisation*). Par ailleurs, les narratifs des deux programmes s'inscrivent dans la dynamique *Moon-to-Mars*, avec l'idée – à prendre avec certaines précautions – que les compétences acquises sur la Lune pourraient préparer à l'exploration martienne sur le plus long terme.

Encadré n°1

Intérêts présentés par une installation au pôle Sud de la Lune

En raison de la faible inclinaison de l'axe de rotation de la Lune, ses régions polaires ne subissent pas les mêmes variations saisonnières que les pôles terrestres. Les périodes d'illumination peuvent y être particulièrement longues. Plus précisément, le pôle Sud de la Lune présente deux intérêts majeurs :

- Dans les montagnes et plaines élevées en bordure de cratères se trouvent des « pics de lumière éternelle », ou PEL (*Peak of Eternal Lights*) que les rayons rasants du soleil éclairent une grande partie du temps, selon les données de la sonde LRO (*Lunar Reconnaissance Orbiter*) de la NASA. Ces zones sont donc des candidates évidentes pour l'installation de panneaux solaires photovoltaïques, mais elles sont extrêmement limitées ; quelques dizaines de km² seulement offrent à la fois de telles caractéristiques et une pente suffisamment faible pour y installer des panneaux⁶.
- Dans les cratères, à l'inverse, se trouvent des zones jamais exposées à la lumière du soleil : des « régions ombragées en permanence », ou PSR (*Permanently Shadowed Regions*), où les températures sont les plus faibles. Ces dernières pourraient être propices au maintien de la glace d'eau, qui y aurait été probablement apportée par l'impact de météorites, et pourrait être utilisée comme source d'oxygène (O₂) et d'hydrogène (H₂). Ce couple (H₂, O₂) pourrait être utilisé pour le support de vie des bases, voire comme vecteur énergétique⁷, indispensable aux missions de longue durée. De précédentes missions de prospection, dont celle de Chandrayaan-1 en 2008 équipée de l'instrument M3 (*Moon Mineralogy Mapper*) de la NASA, ont apporté la preuve « directe et définitive » de la présence de glace sur les parois et au fond de ces cratères⁸, sans toutefois pouvoir en évaluer précisément les quantités.

4 Les feuilles de route des États-Unis étant davantage disponibles que celles d'autres programmes, elles seront davantage utilisées ici.

5 Ces calendriers demeurant sujet à énormément de caution dans le contexte actuel. Voir *supra*, introduction, et notes 1 et 2.

6 Wei Guangfei, Li Xiongyao, Weiwei Zhang, et al., (2023), « Illumination conditions near the Moon's south pole: Implication for a concept design of China's Chang'E-7 lunar polar exploration », in *Acta Astronautica*, vol. 208, 74-81.

7 On distingue les sources d'énergie des vecteurs d'énergie. Les premières permettent de produire de l'énergie ; les seconds sont des moyens de la stocker et de la transporter. L'utilisation des ressources lunaires ne générera jamais plus d'énergie qu'elle n'en coûtera pour transformer les ressources.

8 Li Shuai, Lucey Paul G., Milliken Ralph E., et al., (2018) « Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions », in *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 115, n. 3, 8907-8912.

Il apparaît clairement dans les feuilles de route que l'installation des infrastructures d'exploration se fera de façon incrémentale. Le système de production, de distribution et de stockage d'énergie sera donc adapté progressivement pour étendre la durée des missions de surface en permettant aux équipements de survivre à la nuit lunaire, d'accroître la mobilité et la sécurité des équipages éventuels, et à long terme de répondre aux besoins d'autres infrastructures.

On distingue essentiellement trois phases dans les deux feuilles de route, états-unienne et sino-russe. Toutefois, seule la NASA évalue à ce stade les besoins énergétiques à la surface pour ces différentes phases⁹. Bien qu'elles soient susceptibles d'évoluer, les premières estimations de ces besoins fournissent d'utiles ordres de grandeur. Ainsi, on note que les besoins des missions habitées sont d'un ordre de grandeur plus élevé que les missions robotiques, en raison d'une consommation d'énergie plus importante et d'exigences de fiabilité et de sûreté bien plus élevées.

Phase de la feuille de route ¹⁰	Échelle de temps	Besoins à couvrir en électricité
1. Reconnaissance et premiers déploiements robotiques	2021-2025	1-5 kW (robots, instruments scientifiques...)
2. Premières missions habitées, déploiement de la base	2026-2033	10-60 kW (premier habitat, démonstrateurs ISRU)
3. Habitation pérenne et expansion durable	2033 et au-delà	> 100 kW (base en expansion)

Source du tableau – voir note 9

Encadré n°2

Puissance énergétique, éléments de définition

La puissance quantifie les besoins par le « débit » d'énergie à fournir aux systèmes pour assurer leur fonctionnement. On la mesure en Watt (W). Comme dans toute mission spatiale, les besoins en énergie électrique sont cruciaux pour alimenter les équipements et les systèmes de communication, tandis que l'énergie thermique est essentielle pour réguler la température des installations et survivre à la nuit lunaire. On distinguera donc, quand nécessaire, les **Watt électriques (We)** des **Watt thermiques (Wth)**.

L'énergie découle alors directement de la puissance et du temps pendant lequel cette puissance est fournie ; on la mesure en **Wattheure (Wh)**, soit un débit d'un Watt délivré pendant une heure.

La quantité d'énergie à stocker est déterminée par les besoins de puissance des systèmes à alimenter, et la durée pendant laquelle cette puissance doit être fournie en l'absence de production suffisante. On peut, comme pour les systèmes de production, considérer leur **énergie spécifique (Wh/kg)** comme un critère de performance parmi d'autres tels que la puissance spécifique et la durée de vie.

⁹ Jeffrey Csank et John H Scott, (29 avril 2022), « Power and Energy for the Lunar Surface », présentation, ARPA-e, Tech-to-Market Briefing. Disponible via le lien suivant : <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20220005893/downloads/Power%20and%20Energy%20for%20the%20Lunar%20Surface.pdf>

¹⁰ Des données plus précises, issues des feuilles de route des différents programmes lunaires et en particulier du programme Artemis sont disponibles. Néanmoins, vu le caractère mouvant des dimensionnements des programmes lunaires actuels, il a paru plus pertinent de se cantonner à une expression générale et générique des besoins énergétiques.

B. Dimensionnement énergétique nécessaire pour répondre aux contraintes de l'environnement lunaire

En l'absence d'atmosphère et de magnétosphère¹¹, **l'environnement lunaire impose des contraintes extrêmes** aux futurs systèmes énergétiques, à commencer par les températures variant de +127 °C à -173°C selon la phase du cycle lunaire. Survivre à la nuit lunaire, c'est-à-dire mettre en hibernation les systèmes pendant la nuit et être capable de les faire redémarrer le jour venu, pose un problème de taille : **il faut disposer d'une source d'énergie indépendante du cycle lunaire**. À défaut, il faut stocker en amont, durant le jour lunaire, assez d'énergie (produite par exemple par des panneaux solaires) pour maintenir les systèmes sensibles à une température suffisamment élevée durant la nuit lunaire.

Un autre problème est celui du **rayonnement cosmique** qui est particulièrement élevé à la surface de la Lune. Ce rayonnement, ionisant, met à la fois en péril les composants électroniques qui peuvent être endommagés¹², et les astronautes dont la santé pourrait être affectée. En conséquence, un **durcissement** des composants électroniques et des protections pour les astronautes est indispensable pour atténuer les effets de l'irradiation.

En outre, les mécanismes de déploiement, de repliement et de rotation des panneaux solaires devront présenter **une résistance suffisante** à la poussière lunaire, le régolithe, qui est particulièrement abrasif et magnétisé et se 'colle' aux machines et aux combinaisons. Il faudra également s'assurer que ces panneaux ne soient pas obstrués ou recouverts par cette poussière, afin qu'ils conservent leurs rendements. Les *rovers* devront eux aussi présenter cette résistance.

La morphologie du sol lunaire est un autre enjeu, en particulier au pôle Sud. D'abord, l'atterrissement des astronautes et l'installation d'équipements ne pourra se faire que sur un terrain relativement plat, loin des pentes abruptes des cratères. La sélection des sites d'implantation d'infrastructures, notamment énergétiques, est un défi à anticiper.

Des distances obligatoires seront également imposées pour des raisons de sécurité autour des sites d'atterrissement. Le rayon de sécurité autour de ces sites sera d'autant plus grand que ces atterrissages sont souvent imprécis : alors que le module d'atterrissement d'Apollo 11 a atterri à quelques kilomètres du lieu prévu, les missions suivantes ont réduit cette marge à quelques centaines de mètres. Des missions robotiques récentes, comme la mission SLIM du Japon alunie le 19 janvier 2024, ont cherché à démontrer des alunissages de précision (objectif de moins de 100 m pour la sonde nipponne). Si l'objectif a été atteint, le renversement du robot à l'atterrissement a montré toutes les difficultés qu'il reste à franchir avant de viser de telles performances pour un éventuel vol habité. Au-delà de la seule précision de l'alunissage, des projections de poussière lunaire et de résidus de combustion imposeront toujours un rayon minimal d'au moins 1 km entre la zone d'alunissage et les autres sites où sont situées les infrastructures d'exploration.¹³

Enfin, tous les systèmes envoyés seront soumis à des limites inhérentes aux capacités des alunisseurs, en termes de masse et de volume d'emport.

C. Dimensionnement énergétique de précédents programmes d'exploration spatiale

Pour répondre aux nombreuses contraintes, à la diversité des sources d'énergie et des usages, et à la part importante d'énergie intermittente (solaire), il est essentiel d'envisager

11 Sinon, ponctuellement, la magnétosphère terrestre.

12 On mesure cet effet en Gray-Si, c'est-à-dire la quantité d'énergie déposée par kilogramme de silicium. Pour les effets sur la santé humaine, on utilise le Sievert, de symbole Sv, une unité dérivée du Gy, qui tient compte de la dangerosité des effets sur le corps humain.

13 NASA (27 janvier 2021). NASA's Artemis Base Camp on the Moon Will Need Light, Water, Elevation. Site web de la NASA, consulté le 11 septembre 2025. Disponible sur le ce lien : <https://www.nasa.gov/humans-in-space/nasas-artemis-base-camp-on-the-moon-will-need-light-water-elevation/>

l'énergie selon trois volets : **production, stockage et gestion/distribution**¹⁴. Si la production a déjà été un défi lors des missions Apollo, **le stockage et la gestion de l'énergie** sont des enjeux nouveaux sur le sol lunaire, **auxquels l'Europe peut apporter des réponses clés**.

Dans les premières phases des projets lunaires, les besoins en énergie s'appuieront principalement sur des technologies déjà éprouvées, notamment à bord des stations spatiales orbitales, qui, comme les missions lunaires, nécessitent une **consommation énergétique optimisée**. Une analyse de ces systèmes permet d'identifier les technologies pertinentes pour les missions à venir.

L'approvisionnement énergétique de missions d'exploration passées, Apollo et au-delà

Les missions du programme Apollo entre 1969 et 1972 **constituent un précédent intéressant pour étudier les solutions énergétiques à disposition de programmes d'exploration, notamment habités**. À ce jour, elles demeurent les seuls exemples d'une présence humaine à la surface de la Lune. Elles se sont déployées en trois phases¹⁵:

- Apollo 11 visait à faire alunir un équipage de deux astronautes et les ramener sains et saufs. L'approvisionnement énergétique concernait pour l'essentiel le module lunaire Eagle pendant 22 heures à la surface.
- Apollo 12, 13 et 14, outre l'alunissage d'astronautes, visaient à démontrer un alunissage de précision, et embarquaient des instruments scientifiques avec leur source d'énergie.
- Apollo 15, 16 et 17, les missions les plus ambitieuses, outre l'alunissage d'astronautes, ont été dotées d'un rover, alimenté par son propre système indépendant de l'atterrisseur (*Lunar Roving Vehicle (LRV)*).

Faute de pouvoir utiliser des panneaux solaires photovoltaïques fournissant un excédent d'énergie par rapport aux besoins des petites expériences scientifiques, **les missions Apollo emportaient toute l'énergie nécessaire au déroulé de la mission**. Ces ressources énergétiques emportées (hors ergols pour la phase de propulsion) incluaient :

- **Des batteries électro-chimiques** Argent-Zinc de 5 à 10 kWh qui fournissaient une puissance de 1,1 kW au module lunaire et au LRV.
- **Des piles à combustible primaires**¹⁶, à hydrogène et à oxygène, qui équipaient le module de service de la capsule Apollo (qui ne descendait pas à la surface de la Lune) ; l'eau obtenue en produisant l'électricité était recyclée en eau potable. Ces piles étaient rassemblées en 3 batteries délivrant chacune 1,4 kW_e et pesant « à sec » 111 kg.
- **Des générateurs de chaleur et/ou d'électricité radio-isotropiques, ou RPS** (*Radio-isotope Power Systems*), qui utilisaient la désintégration naturelle (sans réaction de fission) d'isotopes radioactifs. Apollo 11 n'a utilisé que des *Radioisotope Heating Unit (RHU)*, sans conversion de la chaleur en électricité. Afin d'alimenter les instruments scientifiques installées sur le sol lunaire, les missions suivantes ont embarqué des générateurs thermoélectriques radio-isotropiques (*Radio-isotope Thermoelectric Generator (RTG)*), qui produisaient 70 W_e (0,07 kW_e) et pesaient 20 kg.¹⁷

Les piles à combustibles primaires développées pour les missions Apollo ont été les premières à démontrer un concept jusque-là théorique. Elles présentaient les avantages de pouvoir utiliser l'oxygène et l'hydrogène des réservoirs de carburant, d'offrir une meilleure puissance spécifique que les batteries et de co-générer de la chaleur et de l'eau potable.¹⁸ Pour les missions à venir, ce sont davantage les piles à combustible régénératives

¹⁴ On parle de PMAD, pour Power Management and Distribution, pour évoquer ce dernier aspect important. Ainsi qu'il indiqué en introduction, la gestion/distribution n'est pas traitée dans cette note.

¹⁵ NASA, Lyndon B. Johnson Space Center (1975), Apollo Program Summary Report (JSC-09423), p. 466.

¹⁶ On distinguera bien les piles à combustible primaires, qui sont des générateurs électriques non rechargeables, des piles à combustible régénératives, qui sont des dispositifs de stockage-déstockage d'énergie.

¹⁷ A Timeline of RTG and RHU Space Missions, <https://www.energy.gov/ne/timeline-rtg-and-rhu-space-missions>, consulté le 28 mai 2024.

¹⁸ NASA Spinoff. (29 janvier 2024). NASA's Moon Shot Launched Commercial Fuel Cell Industry. Site web de la NASA Spinoff, consulté le 11 septembre 2025. Disponible sur ce lien : https://spinoff.nasa.gov/NASA%20%99s_Moon_Shot_Launched_Commercial_Fuel_Cell_Industry

(*Regenerative Fuel Cells*) qui joueront un rôle clé pour stocker l'énergie pendant les périodes d'ensoleillement, et la déstocker ensuite.

Dans le domaine du nucléaire spatial, les missions Apollo ont offert une première démonstration de la fiabilité des générateurs radio-isotropiques (*radioisotopic power system*). Lancées quelques années plus tard, les sondes Voyager ont permis d'aller au-delà de ces premières démonstrations, et de confirmer sur une durée considérablement plus grande la pertinence et la fiabilité des technologies nucléaires spatiales.

Encadré n°3

Le nucléaire spatial – définitions et précédents

Il faut bien distinguer les réacteurs nucléaires au sein desquels ont lieu des réactions en chaîne contrôlées de fission, des *radioisotope power systems* (RPS), qui reposent sur la décroissance radioactive « naturelle » de certains isotopes. On distingue deux types de générateurs radio-isotropiques, selon qu'ils fournissent uniquement de la chaleur ou également de l'électricité :

- Les **RHU** ou unités de chauffage radio-isotopique fournissent de la chaleur par la désintégration naturelle d'un élément radioactif 'artificiel', traditionnellement le plutonium 238 ;
- Les **RTG** ou générateurs thermoélectriques radio-isotropiques convertissent la chaleur en électricité, par exemple en soumettant un matériau thermoélectrique à un fort gradient de température, ou via des convertisseurs dynamiques. Pour un même radio-isotope, le choix du matériau thermoélectrique détermine le rendement de conversion de la chaleur en électricité.

Les générateurs radio-isotropiques sont indispensables pour les missions d'exploration spatiale dès lors que l'environnement cible est dépourvu d'énergie solaire suffisante pendant des périodes prolongées. Des missions actives de la NASA utilisent actuellement des RTG, dont les sondes *New Horizons*, *Voyager 1* et *2*, et les rovers martiens *Curiosity* et *Perseverance*. S'ils présentent l'avantage de très longues durées de vie (en fait fixée par la durée de demi-vie de l'isotope radioactif utilisé), **les puissances électriques restent limitées à quelques centaines de Watt** (*a minima* pour des raisons de sûreté, mais aussi pour des limites d'approvisionnement en plutonium-238) avec une **masse élevée pour la puissance produite** : 3,7 W_e/kg pour les RTG des missions Apollo, jusqu'à 5,1 W_e/kg pour la sonde *New Horizons* lancée en 2006. Dans le cas des rovers martiens, il faut noter qu'une partie de la puissance thermique non convertie (presque 50 %) sert également au conditionnement thermique (chauffage) des instruments.

Des réacteurs nucléaires de très faible puissance (par rapport à leurs homologues terrestres) ont pour leur part été utilisés pour des missions spatiales en orbite terrestre, notamment par des satellites soviétiques ; une trentaine de réacteurs BES-5 (dits « Bouk ») à l'uranium hautement enrichi et délivrant une puissance électrique de **3 kW_e** ont alimenté la famille des satellites RORSAT. **À ce jour, aucun réacteur nucléaire n'a été utilisé pour alimenter une mission habitée, et aucun réacteur spatial n'a dépassé une puissance de quelques kilowatts.**

L'alimentation des stations spatiales orbitales

Les stations spatiales en orbite autour de la Terre bénéficient d'un ensoleillement suffisant et de courtes périodes d'éclipse, ce qui permet d'utiliser **des panneaux photovoltaïques** pour alimenter les systèmes de support de vie et les expériences scientifiques. À titre d'exemple, la Station Spatiale Internationale (ISS) dispose ainsi de huit grands panneaux photovoltaïques, dont l'envergure atteint 73 m ; ils délivrent ensemble une puissance électrique moyenne de 75 à 90 kW_e.¹⁹ Depuis 2021, ils sont progressivement remplacés par une

¹⁹ NASA, International Space Station Facts and Figures, <https://www.nasa.gov/international-space-station/space-station-facts-and-figures/>, consulté le 28 mai 2024.

nouvelle génération de panneaux solaires flexibles, dits ROSA (*Roll-Out Solar Arrays*), qui atteignent une puissance spécifique de 100 W/kg²⁰, augmentant de 20 à 30% la puissance moyenne totale. Pour adapter l'utilisation de ces panneaux solaires photovoltaïques à la surface de la Lune, un certain nombre de défis techniques sont à relever, allant notamment de la capacité de stockage de l'énergie (pour assurer une continuité lors de la nuit lunaire), à des mécanismes d'orientation des panneaux.²¹

Aussi, ramenée au nombre d'astronautes à son bord (des équipages de 7 personnes), la puissance délivrée par les panneaux solaires de l'ISS est d'environ 10-13 kW par astronaute. Sur la Lune, la NASA évoque un minimum absolu de 3 kW par astronaute pour les systèmes de support de vie²², ce qui est cohérent avec les besoins initiaux estimés à 10 kW minimum pour 2-4 astronautes pour la base lunaire du programme Artemis (*Foundational Surface Habitat (FSH)*).

20 NASA, Power, <https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/power-subsystems/>, 12 février 2024, consulté le 28 mai 2024.

21 voir, à ce sujet: Dalton Penni J, Bowens Ebony, North Tim, et al., « NASA Aerospace Battery Workshop », in.

22 J. Mark Hickman, Henry B. Curtis, et Geoffrey A. Landis, *Design Considerations for Lunar Base Photovoltaic Power Systems*, s.l., NASA, 1990.

2. Produire l'énergie

Ainsi qu'exposé plus haut, il faut **distinguer les besoins énergétiques de missions robotisées des besoins énergétiques de programmes habités, bien plus énergivores**. Par ailleurs, dans le second cas, le choix d'établir ou non une base lunaire permanente est tout aussi dimensionnant. La mise en place d'une base lunaire habitée permanente nécessiterait en effet un réseau d'infrastructures permettant d'assurer en permanence la fourniture d'énergie nécessaire aux activités de la base et à la conduite de ses missions.

Deux modes de production énergétique sont particulièrement envisageables :

- **Les technologies solaires**, dont la production est limitée aux périodes d'illumination et auxquelles doivent être associées des capacités de stockage massives pour assurer une alimentation continue en électricité.
- **Les technologies nucléaires**, autrement dit des RPS et/ou des réacteurs nucléaires, qui sont capables d'assurer une alimentation continue mais dont le développement est encore à différents degrés de maturité et dont l'utilisation spatiale par l'Europe appelle à élaborer une réglementation spécifique en matière de sûreté nucléaire.

Comme sur Terre, les deux voies sont complémentaires, et un mix technologique de panneaux solaires, de générateurs radio-isotropiques et de batteries **semble la solution à favoriser, et ce, dès le court à moyen terme**. C'est notamment ce que recommandait le Congrès états-unien à la NASA en 2024, allant jusqu'à inclure les réacteurs en reconnaissant « le besoin d'une alimentation constante, fiable et continue pour les futures missions scientifiques et d'exploration étendues sur la surface lunaire, en particulier aux pôles, et soutenant les investissements passés et en cours dans un mix technologique comprenant réacteurs nucléaires et panneaux solaires verticaux ».²³ Une telle diversification évite en outre des risques de défaillance systémique : si les modules solaires s'avèrent plus vulnérables que prévu au régolithe, il est probable que le même problème affecte aussi les panneaux solaires des rovers et des sondes. De même, si un problème survient sur un réacteur nucléaire, il est possible que d'autres réacteurs de conception similaire le subissent. **La nécessité de plans de continuité énergétique en cas de telles défaillances est donc pleinement justifiée.**

Par ailleurs, un mix énergétique peut également présenter des avantages en adaptant l'approvisionnement aux besoins différents des infrastructures, selon que les équipements nécessitent ou non une alimentation continue, ou une autonomie à distance de leurs bases (rovers autonomes, sondes, robots, etc.).

A. Les technologies solaires, à court et moyen terme

Les technologies solaires photovoltaïques pour l'espace sont des technologies matures, en raison de leurs nombreuses utilisations passées et actuelles, à bord de satellites, de sondes, ou de stations spatiales orbitales. Leur déploiement à la surface de la Lune, et notamment à son pôle Sud, nécessite cependant de **les adapter aux contraintes particulières de notre satellite naturel**. Pour recevoir les rayons du Soleil qui y ont une très faible incidence (entre -1,5° et 1,5°, selon l'inclinaison de l'axe de rotation de la Lune, selon la saison), l'architecture des modules photovoltaïques doit être repensée.

En effet, même au sein des différentes zones envisagées pour l'alunissage des missions, **les taux d'illumination varient radicalement selon l'élevation**. Les panneaux solaires doivent donc être conçus pour recevoir cette lumière en hauteur, et les modèles conçus pour être déployés à la surface prennent donc des orientations verticales ; on parle de **VSAT (Vertical Solar Array Technologies)**.

Au-delà de leur forme et orientation, leur déployabilité est aussi un enjeu. Par exemple, la NASA impose ainsi que ses VSAT soient rétractables afin d'être déplacés au besoin. Ils

²³ Sénat des États-Unis d'Amérique (13 juillet 2023). S. Rept. 118-62 - Departments of Commerce and Justice, Science, and Related Agencies Appropriations Bill, 2024.

<https://www.congress.gov/congressional-report/118th-congress/senate-report/62/1>

doivent également pouvoir pivoter à 360° sur leur axe pour suivre la course du Soleil à l'échelle d'une journée lunaire. À cela s'ajoute l'enjeu de leur résistance à l'abrasion par le régolithe.

En tous les cas, les VSAT resteront dépendants d'une illumination suffisante et ne seront pas à même de fournir de l'électricité dans l'obscurité. Or, même si en certains endroits la nuit lunaire est plus courte, les périodes nocturnes durent toujours plus de 5 'jours' par cycle lunaire. Ces contraintes limitent de fait les durées des premières missions, qui n'auront lieu qu'en période d'ensoleillement²⁴.

Utilisation de l'énergie solaire lors de premières missions

Des missions lunaires récentes ont déjà recouru aux technologies solaires pour leur approvisionnement énergétique dans l'espace. Tel est le cas, par exemple, de la mission Artemis I et de l'*European Service Module* du vaisseau *Orion*, flanqué de branches solaires en X, chacune des branches comportant trois panneaux solaires. En surface lunaire, ce fut aussi le cas de l'alunisseur *Vikram* de la mission indienne Chandrayaan-3, ou encore du dernier module chinois en date, *Chang'e-6*. Les alunisseurs robotiques des missions de transport d'équipement à la surface de la Lune de la NASA lancés dans le cadre du programme *Commercial Lunar Payload Service* (CLPS) prévoient eux aussi de produire leur électricité généralement à partir de panneaux photovoltaïques.

Des panneaux solaires devraient aussi assurer l'alimentation des vaisseaux d'atterrisage habités pour des missions de courte durée en surface au début de la prochaine décennie. Aux États-Unis par exemple, deux constructeurs ont été retenus pour la réalisation de ces alunisseurs spécifiques (*Human Landing System (HLS)*) : SpaceX avec le *Starship*, et Blue Origin avec le *Blue Moon*. A priori, le premier devrait être désigné pour les missions Artemis IV et V, quand le second ferait ses débuts sur Artemis VI. Par la suite, ces deux systèmes se partageront les alunissages dans une logique de concurrence. *Starship* devrait produire sa propre électricité à partir de panneaux solaires recouvrant sa surface extérieure²⁵. *Blue Moon* devrait utiliser à la fois l'énergie solaire et des piles à combustible avec des réservoirs remplis d'hydrogène pour une durée de fonctionnement adaptée aux missions courtes.

Utilisation de l'énergie solaire pour une future base permanente

Lors de la mission *Artemis IV*, la NASA prévoit le déploiement d'un premier ensemble d'infrastructures énergétiques regroupées sous l'appellation LIFT (*Lunar Infrastructure Foundational Technologies*). Ces infrastructures assureront la production et le stockage d'énergie indépendamment des alunisseurs HLS précités, ceci en vue du déploiement d'un habitat permanent après *Artemis VIII*.

Parmi celles-ci devraient être déployés de premiers modules VSAT offrant chacun 10 kW_e de puissance électrique²⁶. Ceux-ci devraient être rétractables, ou flexibles afin de faciliter leur transport jusqu'à la Lune, puis leur déplacement par des équipages d'astronautes ou des robots dédiés, et de capter un maximum d'énergie solaire malgré des conditions d'illumination changeantes. Ils devraient également être orientés automatiquement pour suivre la course du soleil. En outre, les panneaux flexibles présentent l'avantage d'avoir une faible masse spécifique (kg/kW_e).

Deux contraintes seront dimensionnantes pour ces VSAT : l'encombrement et la masse. Pour l'encombrement, la NASA se fixe l'objectif de 65 kW_e/m³ avec des panneaux solaires flexibles et déployables. Pour la contrainte de masse, la NASA vise un objectif de 100 W_e/kg pour l'ensemble du système : panneaux photovoltaïques avec leurs supports, mécanismes d'orientation, batteries de stockage, système de gestion de puissance et réseau de distribution (électronique et câblage). Cet objectif ambitieux appelle à optimiser le rendement des cellules photovoltaïques et l'exposition à l'ensoleillement.

24 G. Wei, X. Li, Z. Weiwei, et al., « Illumination conditions near the Moon's south pole: Implication for a concept design of China's Chang'E-7 lunar polar exploration », art cit.

25 Kurkowski, S. (2023, 2 novembre). *Leaked new SpaceX Starship HLS renders show a much more refined design*. Consulté le 11 septembre 2025, disponible sur ce lien : <https://spaceexplored.com/2023/11/02/leaked-new-spacex-starship-hls-renders-show-a-much-more-refined-design/>

26 NASA (23 août 2022), *Three Companies to Help NASA Advance Solar Array Technology for Moon*. Consulté le 11 septembre 2025, disponible sur ce lien : <https://www.nasa.gov/news-release/three-companies-to-help-nasa-advance-solar-array-technology-for-moon/>

Pour fournir 60 kW_e en continu pendant une nuit de 120 heures avec un système « tout solaire » (i.e. 0% de l'énergie produite pendant la phase d'obscurité), l'ESA²⁷ a estimé à 1,5 tonne la masse nécessaire de panneaux solaires, et à autant celle du système de gestion et de distribution de puissance (*Power Management and Distribution*). La masse du système de stockage diffère selon qu'on utilise des batteries électro-chimiques (65 tonnes) ou des piles à combustibles régénératives avec leur réservoir d'hydrogène (10 tonnes) dont la technologie doit encore progresser (voir partie 3).

Des chantiers de R&D sont encore nombreux à mener, notamment dans le champ du rendement des cellules photovoltaïques (cellules multi-jonctions, cellules à concentration solaire, etc.) ainsi que dans celui des batteries à haute capacité, qui seraient associées au dispositif pour stocker l'énergie produite. Le développement de ces technologies haute performance, avec la fiabilité et la durée de vie requises pour les missions spatiales, est **potentiellement porteur de retombées intéressantes pour les applications terrestres dans les secteurs où elles pourront devenir économiquement viables**.

Les technologies de concentration solaire

Au-delà de la seule production d'électricité, le recours à l'énergie solaire peut se révéler intéressant pour l'apport d'énergie thermique pour des opérations et des cas d'usage spécifiques. C'est le cas, par exemple, de l'ISRU, qui peut nécessiter de chauffer le régolithe lunaire à de très hautes températures pour en extraire l'oxygène présent sous forme d'oxyde de fer et de titane. Selon la NASA, la production de 0,58 kg d'oxygène par heure nécessiterait environ 3 kW_e de puissance électrique et 15 kW_{th} de puissance thermique pour la réduction de l'ilménite à l'hydrogène²⁸. D'autres réductions purement thermiques d'une gamme plus large d'oxydes sont aussi envisageables²⁹.

L'énergie solaire concentrée offre une piste intéressante pour produire de la chaleur, car la puissance spécifique de tels systèmes peut dépasser 350 W_{th}/kg³⁰. Dans ce cas, des miroirs paraboliques produisent directement de la chaleur, sans conversion, en concentrant les rayons du soleil. Ils peuvent ainsi transformer l'énergie solaire radiative en énergie thermique avec de très bons rendements (>60%). Les concentrateurs peuvent par ailleurs être flexibles, ce qui réduit de beaucoup leur masse, et permet d'atteindre de hautes puissances spécifiques. Ces structures devront néanmoins être adaptées aux conditions de l'environnement lunaire, où elles pourraient subir l'impact de micrométéorites. Leur développement est opportun, car il permettrait d'atteindre des gammes de températures de 100 °C jusqu'à plus de 2 000 °C.

La NASA a récemment démontré avec un chauffage laser, simulant le rayonnement solaire concentré, la faisabilité de l'extraction de l'oxygène par pyrolyse du régolithe dans un environnement non-pressurisé³¹. Les programmes CLPS et Artemis prévoient le déploiement de concentrateurs solaires pour de telles applications ; néanmoins, la mission PRIME-1 lancée courant 2025 dans le cadre du programme CLPS a échoué, et l'avenir du programme VIPER demeure incertain.

B. Le rôle important du nucléaire spatial, à moyen terme

L'intermittence des systèmes photovoltaïques et le défi constitué par le stockage de l'énergie produite, amène à **s'interroger sur les technologies aptes à fournir une capacité permanente et pilotable de production d'énergie**. A cet égard, l'énergie nucléaire, dont la

27 ESA, CDF study report (2020) *Moon village, conceptual design of a lunar habitat*, p. 91.

28 Colozza, A. J., & Wong, W. A. (2006). *Evaluation of a Stirling Solar Dynamic System for Lunar Oxygen Production* (NASA/TM-2006-214360). NASA Glenn Research Center.

29 Voir par exemple : Zhou, C., et al. (2025). *Earth-based unmanned solar sintering system for lunar bricks with regolith simulant. Automation in Construction*, vol. 179, n°106486 ; Granier, J., Cutard, T., Pinet, P., Le Maoult, Y., Chevrel, S. D., et al. (2025). Selective laser melting of partially amorphous regolith analog for ISRU lunar applications. *Acta Astronautica*, vol. 226, n. 1 (Part 1), pp. 66–77.

30 Colozza, A. J. (2009). *Power System Mass Analysis for Hydrogen Reduction Oxygen Production on the Lunar Surface* (NASA/CR-2009-215504). NASA Glenn Research Center.

31 NASA. (25 avril 2023). *NASA Successfully Extracts Oxygen from Lunar Soil Simulant*. Consulté le 11 septembre 2025, disponible sur ce lien : <https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/johnson/nasa-successfully-extracts-oxygen-from-lunar-soil-simulant/>

production est indépendante des conditions d'illumination, apparaît indiquée pour être utilisée conjointement à la production solaire.

Les technologies nucléaires de production d'électricité et de chaleur comprennent les générateurs radio-isotropiques et les réacteurs (voir encadré n°3, *supra*). Les systèmes radio-isotropiques (RPS) constituent une technologie éprouvée, déjà mise en œuvre dans de nombreuses missions spatiales internationales, mais encore en développement en Europe. La puissance de tels générateurs avec une conversion thermoélectrique reste limitée (~200 W_e) et peut atteindre l'ordre du kW_e avec une conversion dynamique (moteur Stirling ou turbine Brayton ou Rankine).

Les systèmes radio-isotropiques pour les systèmes d'instrumentation et les systèmes autonomes

Les systèmes radio-isotropiques sont la première brique énergétique d'une production nucléaire spatiale (v. encadré n°3, *supra* sur les différents types de systèmes radio-isotropiques). Ils permettent à la fois de tester des systèmes énergétiques performants et de construire le cadre politique, juridique et de coopération nécessaire à leur déploiement, ainsi qu'à celles d'autres technologies nucléaires.

Utilisation des RHU pour fournir de l'énergie thermique

Les RHU ont été largement utilisés pour maintenir les instruments sensibles et les batteries dans les conditions de température nécessaires à leur bon fonctionnement dans les missions d'exploration spatiale ; ils le seront à nouveau dans le programme *Artemis*. En générant de la chaleur (de l'ordre de quelques W_{th}) par la simple décroissance d'un isotope radioactif conditionné en pastilles, **ces dispositifs représentent une source de chaleur très fiable**. Ils permettent également des gains de masse très importants par comparaison à un chauffage par traçage électrique alimenté par une batterie.

La conception et la fabrication des générateurs radio-isotropiques reposent d'abord sur **la nature du radio-isotope ainsi que son approvisionnement**. Un **débat relativement vif** existe dans la communauté scientifique quant à **l'usage soit de l'isotope 238 du plutonium (ou Pu-238)**, soit **de l'isotope 241 de l'américium (Am-241)**. Le débat touche à la fois à des aspects techniques (différences en termes de durée de la demi-vie et en termes de puissance thermique). De même qu'il touche à des enjeux économiques (coûts d'investissements puis de production différents) et stratégiques (sources d'approvisionnement, liens avec les programmes nucléaires nationaux, etc.). Il convient de revenir synthétiquement sur ce débat.

Jusqu'à présent, c'est le Pu-238 qui a été traditionnellement et de loin le plus utilisé pour les générateurs radio-isotropiques des missions spatiales de la NASA et de l'agence spatiale russe. Cet isotope présente l'avantage d'avoir une puissance thermique spécifique très élevée (0,54 kW/kg) et une période de décroissance (87 ans) bien adaptée à la durée des missions ; il n'émet par ailleurs que peu de rayonnements neutroniques et gamma, ce qui limite le besoin de protection radiologique. L'Am-241 est plus facile à obtenir, mais sa période de décroissante (432 ans) limite sa puissance spécifique à 0,115 kW/kg, ce qui contribue, avec le besoin d'un blindage plus épais, à alourdir les générateurs pour une même puissance. Il est difficile à produire. A ce jour, seuls les États-Unis et la Russie disposent de capacités de production connues de Pu-238. Ce dernier est produit par l'irradiation de neptunium-237 par des neutrons. Le processus est complexe, et suppose des équipements spécifiques : le coût de revient est donc important. Pour subvenir à la demande estimée des futures missions d'exploration spatiale, les États-Unis ont relancé la production de Pu-238 avec l'ambition d'en produire 1,5 kg par an d'ici à 2025³² (à titre de comparaison, la seule sonde *New Horizons* en embarquait 7,6 kg, soit plus de 5 ans de production à ce rythme). **La filière fonctionne à flux tendus**, et l'usage de plutonium pour les missions lunaires entre en concurrence avec les besoins pour les autres missions de la NASA pour l'exploration lointaine, ce qui pourrait en limiter la disponibilité pour le programme *Artemis*³³.

32 Ambrosi, R. M., Williams, H., Watkinson, E. J., et al. (2019, décembre). *European Radio-isotope Thermoelectric Generators (RTGs) and Radio-isotope Heater Units (RHUs) for Space Science and Exploration*. *Space Science Reviews*, vol. 215, n. 8, 55.

33 Scott, John H. (20 juin 2023), "Envisioned future priorities for: "LIVE: Power and Energy Storage", presentation, NASA. p. 16. Disponible via le lien suivant: <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/06/live-power-and-energy-storage-update-8-april-tagged-1.pdf>

L'Europe s'intéresse au développement d'une filière de production de Pu-238 qui pourrait lui permettre de répondre de façon autonome aux besoins de ses propres missions d'exploration. Plusieurs études ont été menées pour en estimer la faisabilité et les coûts, dont une étude produite par Areva en 2010, et une étude plus récente menée pour le compte de l'ESA par Tractebel Engie, le Centre belge d'étude de l'énergie nucléaire (SCK CEN) et Orano, en 2022³⁴. La dernière de ces deux études juge techniquement faisable une production européenne de l'isotope concerné, mais note que cela nécessite des installations dédiées et un cadre réglementaire à mettre en place. Les investissements nécessaires dans les deux études s'élèvent d'une à plusieurs centaines de millions d'euros, pour un coût d'exploitation annuel autour de la dizaine de millions d'euros. L'étude menée par Tractebel Engie note en tous les cas que si « une production européenne de Pu-238 est faisable sur le plan technique, il faudra plus de douze ans après le lancement du projet pour arriver à une pleine capacité de production de 300g de plutonium par an », avec une montée en puissance progressive sur la période. L'étude note toutefois des possibilités d'accélérer le développement.

En complément, dans la continuité du projet Euratom PULSAR³⁵, une étude en cours menée par Tractebel Engie porte sur le développement d'une feuille de route pour la production de Pu-238 en Europe.

De son côté, l'Am-241³⁶ présente une puissance thermique spécifique quatre à cinq fois plus faible, mais sa demi-vie est considérablement plus longue. Par ailleurs, l'Am-241 émet plus de rayonnements gamma que le Pu-238, et requiert donc plus de protections lors de son utilisation. Néanmoins, le cout de production du kilogramme de l'Am-241 est bien moindre que celui du Pu-238 car il peut être extrait du plutonium vieilli, et il est donc, d'une certaine manière, plus accessible. Des études sont également en cours afin de trouver une composition d'oxyde d'américium stable dans les conditions de fonctionnement normales des générateurs et en cas d'accident.

En 2022, et sur la base de plus d'une dizaine d'années de travaux menés au Royaume-Uni, l'ESA a lancé un programme ENDURE (pour European Devices Using Radioisotope Energy), ayant pour objectif de doter l'Europe de sa propre capacité de production de radio-isotopes, et d'utilisation générateur de chaleur ou d'électricité y recourant. Le programme fonde cette recherche d'sur l'Am-241. Pour l'essentiel, le projet est financé par l'Agence spatiale britannique, et mené par des entités britanniques. Ce qui n'empêche pas des collaborations, ou des intégrations d'équipe à l'échelle européenne, comme c'est le cas, par exemple, du partenariat a été mis en place afin d'intégrer d'une part les équipes anglaises de Framatome en vue de l'industrialisation des sources scellées, et d'autre part les équipes françaises en expertise technique. Orano développe également une série de projets autour de la production d'Am-241, notamment grâce au retraitement du plutonium vieilli présent sur son site de la Hague.

Le développement de RHU européens permettra à l'Europe de pourvoir à ses propres besoins et d'ouvrir la voie vers la maîtrise d'une technologie souveraine de générateurs radio-isotopiques électriques (RTG).

Les systèmes de conversion électrique pour une production continue d'électricité

Pour rappel, dans ces systèmes, la source de chaleur radio-isotopique peut être couplée à des systèmes de conversion d'énergie statiques ou dynamiques. La conversion peut être assurée par un thermo-élément (RTG) ou par un système dynamique (DRPS). Selon le rendement de conversion statique (~5 %) ou dynamique (~25 %) ces systèmes peuvent fournir de quelques centaines de watts à de l'ordre du kilowatt. Les sources de chaleur communes à ces systèmes sont des modules constitués de pastilles encapsulées dans des gaines et des enveloppes de protection.

La NASA bénéficie d'un savoir-faire historique dans le domaine, après avoir équipé de nombreuses missions d'exploration et de satellites orbitaux depuis les années 1960. Dans les années 1980, une collaboration de la NASA et du département de l'énergie a permis le développement du GPHS (General Purpose Heat Source), un assemblage de pastilles de Pu-238 permettant de fournir 250 W_{th} thermiques, avec une masse d'ensemble de 1,5 kg.

34 Voir l'étude de 2022, faisant aussi état des résultats de l'étude de 2010 : https://nebula.esa.int/sites/default/files/neb_study/2610/C4000135477ExS.pdf

35 Voir : <https://tractebel-engie.fr/fr/actualites/2025/concevoir-un-systeme-d-energie-nucleaire-pour-les-missions-lunaires>

36 Il faut noter qu'à date, aucun RPS spatial fonctionnant à l'Am-241 n'a été qualifié, et a fortiori, déployé.

Plusieurs de ces modules GPHS sont utilisés dans un même générateur électrique. La NASA a par exemple utilisé le GPHS-RTG constitué de 18 modules GPHS pour produire 300 W_e avec une puissance spécifique de 5,2 W_e/kg. Conçu pour fonctionner uniquement sous vide spatial, il a été remplacé pour les missions martiennes par un générateur plus polyvalent, le MMRTG, qui utilise 8 modules GPHS. Ce générateur, qui peut fonctionner à la fois dans le vide spatial et en présence d'atmosphère, produit ~110 W_e avec une puissance spécifique de 2,4 W_e/kg.

Un système comparable est en cours de développement en Europe, l'ELHS (European Large Heat Source). Il pourrait générer une puissance thermique comparable à partir d'Am-241 avec une puissance spécifique de ~2 W_e/kg. Avec le programme ENDURE, l'Europe envisage le développement de son propre RTG d'ici la décennie 2030, notamment afin d'équiper l'alunisseur Argonaut.

Sur le plus long terme, des conversions dynamiques (**DRPS**) sont envisagées pour augmenter les rendements et ainsi augmenter la puissance électrique produite et/ou réduire la quantité de radio-isotope nécessaire pour cette production. En considérant la puissance thermique des RTG les plus gros à ce jour (le GPHS-RTG), on peut envisager d'atteindre une puissance électrique produite par des générateurs radio-isotopiques à conversion dynamique légèrement supérieure au kilowatt. **Pour atteindre des puissances supérieures il faut passer des générateurs radio-isotopiques aux réacteurs nucléaires.**

Les technologies de réacteur nucléaire pour les bases lunaires futures

De très petits réacteurs nucléaires sont nécessaires pour contribuer à fournir en continu quelques dizaines de kW_e à des modules d'habitation et d'autres infrastructures locales. En ce domaine, des synergies peuvent exister entre le développement, qui connaît un réel regain d'intérêt, de micro-réacteurs et de SMR (pour *Small Modular Reactors*) dans la gamme de 10 à 300 MW_e pour des applications terrestres, et celui de réacteurs pour l'espace ; quoique ces derniers sont requis de fournir des puissances moins importantes, de l'ordre de 50 à 100kW.

Les réacteurs nucléaires spatiaux ont fonctionné avec un combustible à uranium enrichi, permettant une forte densité énergétique. Le taux d'enrichissement maximum en U-235 autorisé pour les applications civiles (~20 %) est devenu aujourd'hui la référence, y compris pour les projets de réacteurs spatiaux. Le réacteur est couplé à un système de conversion en électricité thermoélectrique, thermo-ionique ou thermodynamique utilisant un cycle Brayton, Rankine ou Stirling.

La NASA développe depuis 2012 avec le Département de l'énergie un modèle de réacteur nucléaire spatial dans la gamme de 1 à 10 kW_e. Après la réalisation d'une preuve de concept, cette initiative a conduit au lancement en octobre 2015 du projet **Kilopower** qui visait à concevoir un démonstrateur en 3 ans³⁷ destiné aux missions d'exploration scientifique de l'espace profond. En 2018, la NASA a réalisé l'essai d'un démonstrateur nucléaire avec 8 moteurs Stirling (dont 6 ont été simplement simulés). Nommé KRUSTY (*Kilopower Reactor Using Stirling Technology*), ce démonstrateur a pu produire 180 W_e, confirmant ainsi un potentiel de 720 W_e en fonctionnement nominal (avec 8 moteurs), légèrement en-deçà du kilowatt.

En 2022, la NASA a lancé la seconde phase du programme FSP (*Fission Surface Power*) pour des applications nécessitant des puissances de plusieurs kilowatts à la surface de la Lune. Dans la phase actuelle de conception, le FSP doit fournir 40 kW_e avec une masse totale (réacteur, câblage et systèmes de contrôle) voisine de 7,5 tonnes³⁸. Ainsi, le FSP aurait une puissance spécifique d'environ 5 W_e/kg. Bien que celle-ci avoisine celle des modules photovoltaïques avec un système de stockage performant, l'intérêt des réacteurs nucléaires réside davantage dans la **gamme de puissance accessible** (bien plus élevée que le solaire) et dans **l'augmentation rapide de la puissance spécifique quand le niveau de puissance croît**.

³⁷ Gibson, M. A., Oleson, S. R., Poston, D. I., & McClure, P. (2017, octobre). NASA's Kilopower Reactor Development and the Path to Higher Power Missions (NASA/TM-2017-219467). NASA Glenn Research Center. Disponible sur ce lien : <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20170011067/downloads/20170011067.pdf>

³⁸ Oleson, S., Packard, T., Turnbull, E., Gibson, M., Rao, D., Barth, C., Wilson, S., Schmitz, P., Colozza, A., Klefman, B., Tian, L., & Mason, L. (2022). A Deployable 40 kW_e Lunar Fission Surface Power Concept (NASA Technical Memorandum). NASA Glenn Research Center. Disponible sur ce lien : https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20220004670/downloads/40%20kW%20Deployable%20FSP%20Paper_FINAL.pdf

La NASA prévoit d'inclure dans le cadre de la mission Artemis VII un démonstrateur de réacteur nucléaire FSP, dans le deuxième lot des infrastructures lunaires permanentes dédiées à la fourniture d'énergie à la base lunaire.

En Europe, et particulièrement en France, des études conceptuelles ont été menées depuis les années 1980 par le CNES et le CEA sur des générateurs nucléaires dans la gamme de 20 kW_e à 1 MW_e pour la propulsion électrique. On peut citer les études ERATO³⁹ (20-200 kW_e), OPUS⁴⁰ (avec la SNECMA, 100-500 kW_e) et une étude avec Areva TA⁴¹ (10 kW_e, 100 kW_e et 1 MW_e).

Dans la décennie 2010, plusieurs initiatives dans le cadre de programmes de R&D européens ont conduit à des feuilles de route pour le développement de générateurs nucléaires dans la gamme du MW_e pour la propulsion électrique. En 2013, le programme MEGAHIT (*Megawatt Highly Efficient Technologies for Space Power and Propulsion Systems*) a abouti à l'élaboration d'une feuille de route pour le développement d'un réacteur de 1 MW_e. Par la suite, le programme DEMOCRITOS (*Demonstrators for Conversion, Reactor, Radiator and Thrusters for Electric Propulsion Systems*), mené en 2015, a élaboré une feuille de route en s'appuyant sur les briques technologiques identifiées par MEGAHIT. Ces deux programmes correspondaient au besoin d'un remorqueur spatial à propulsion nucléaire électrique capable d'emporter des charges utiles vers la Lune et l'espace profond. Pour le même objectif, l'agence russe Roscosmos développe le projet TEM (*Transport and Energy Module*) avec l'objectif de premiers tests dans l'espace au début de la décennie 2030.

De son côté, l'ESA a terminé son projet **Rocketroll** fin 2024, mené par Tractebel Engie et incluant le CEA, Ariane Group et Airbus Defence & Space⁴². **Le consortium a défini une feuille de route technologique, permettant de doter l'Europe de systèmes de propulsion avancés, capable d'entreprendre des missions de longue durée.** La feuille de route a permis d'identifier également les principales questions de sûreté nucléaire posées par la mise en œuvre d'un réacteur pour la propulsion nucléaire électrique et a proposé des objectifs ainsi que des règles de sûreté nucléaire de haut niveau. Elle a, de plus, dégagé des principes de conception et de gestion du système visant à prévenir les accidents susceptibles d'avoir des conséquences radiologiques sur le public lors des phases de lancement et d'exploitation dans l'espace⁴³. Ces travaux présentent des synergies évidentes avec l'instruction des mêmes questions pour les réacteurs destinés à alimenter les bases lunaires.

Aucune étude européenne d'ampleur n'a porté, pour l'instant, spécifiquement sur les réacteurs pour des applications de surface. En revanche, le CEA a récemment mené une brève étude de préconception d'un réacteur nucléaire capable de produire 10 kW_e pendant une dizaine d'années, assez léger et compact pour entrer dans la coiffe de la fusée Ariane 6. Cette étude aboutit à un modèle pesant ~2 tonnes et haut de 5 mètres⁴⁴. Les questions réglementaires posées par le lancement par Ariane 6 seront vues plus loin. Pour sa part, Framatome a étudié un concept analogue au projet américain de 40 kW_e. Plusieurs initiatives sont lancées, par ailleurs, en Europe sans coordination globale.

39 Carré, F., Proust, E., Chaudourne, S., Keirle, P., Tilliette, Z., & Vrillon, B. (août 1989). *Status of the CNES-CEA Joint Program on Space Nuclear Brayton Systems*. In *Proceedings of the 24th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (IECEC-89)*.

40 Raepsaet, X., Marion, D., Valentian, D., & Societe Francaise d'Energie Nucleaire (SFEN), 75 - Paris (France). (2006). Nuclear energy for space: Past CEA activities and ongoing OPUS studies. European nuclear conference.

41 Cliquet, E., Ruault, J.-M., Roux, J.-P., Paris, N., Cazalé, B., & Poinot-Salanon, C. (2011). *Study of Space Reactors for Exploration Missions*. EUCASS — European Conference for Aerospace Sciences. Disponible sur ce lien : <https://www.eucass.eu/component/docindexer/?task=download&id=4382>

42 CEA. (20 juin 2023). Le CEA s'engage pour la propulsion nucléaire spatiale en Europe. Consulté le 14 juin 2024, disponible sur ce lien: <https://www.cea.fr/presse/Pages/actualites-communications/sciences-de-la-matiere/cea-engage-pour-propulsion-nucleaire-spatiale-Europe.aspx>

43 Shelikhov Georgy, Space transportation and Nuclear Propulsion, <https://commercialisation.esa.int/2022/09/space-transportation-and-nuclear-propulsion/>, 26 septembre 2022, consulté le 27 juin 2024

44 Bertrand, F., Droin, J.-B., Charlier, M., et al. (1 octobre 2023). « Preliminary conceptual design of an electronuclear system for space applications. Annals of Nuclear Energy », vol. 191, p. 109906.

Proposition stratégique :

Le rôle de la France et de l'Europe dans le domaine de la production énergétique pour l'exploration spatiale

1. Pour l'énergie solaire :

Le déploiement d'infrastructures photovoltaïques à la surface de la Lune nécessitera de disposer de **panneaux flexibles**, une technologie dont ne dispose pas l'Europe à l'heure actuelle ; mais des développements sont en cours⁴⁵.

Le développement de **cellules à haut rendement à basse température** et présentant une bonne tenue à l'irradiation peut également offrir une opportunité de contribution aux projets lunaires. L'Europe dispose déjà d'acteurs de pointe en la matière, dont certains ont équipé les panneaux des sondes spatiales des missions JUICE (ESA) et NASA Europa Clipper (NASA) d'exploration des lunes de Jupiter).

Sur le plan du solaire thermique, le CNES et l'ESA étudient avec le CNRS (laboratoire PROMES) la faisabilité d'un dispositif de pyrolyse solaire en utilisant les concentrateurs du four solaire.

Le solaire pour l'exploration spatiale constitue un champ d'innovation où l'Europe spatiale pourrait renforcer ses atouts, notamment pour relever les défis de R&D qui persistent.

2. Pour l'énergie nucléaire :

Comme pour les technologies solaires, **le développement de technologies nucléaires pour l'exploration lunaire présente une dimension technique et industrielle évidente**.

La présence en Europe d'**une capacité nucléaire historique et reconnue**, ainsi que la maîtrise d'une filière industrielle complète de la mine d'uranium au réacteur en passant par la fabrication des combustibles et celle des composants permet d'envisager un développement autonome de toutes les solutions nécessaires.

L'expérience européenne permettra l'établissement d'une réglementation robuste qui s'applique aussi bien à l'utilisation de matières nucléaires (production de radio-isotope ou de combustible uranium enrichi, maîtrise des risques de prolifération, etc.) qu'à la mise en œuvre des systèmes en toute sûreté et sécurité depuis leur assemblage et leur lancement par un lanceur européen depuis le Centre Spatial de Guyane, jusqu'à leur exploitation à destination.

En Europe, plusieurs initiatives ont permis d'esquisser des études conceptuelles de systèmes (générateurs radio-isotopiques ou réacteurs), d'élaborer des feuilles de route pour leur développement et de procéder à quelques démonstrations technologiques. Ces premiers travaux, complétés par des documents stratégiques (feuille de route de l'ESA^{46,47}, document CNES/CEA de positionnement français) doivent conduire à l'élaboration d'une feuille de route européenne aussi précise que possible pour développer les technologies indispensables aux objectifs européens d'exploration lunaire. La granularité des feuilles de route de la NASA peut servir d'étalon.

Les objectifs de R&D dépendent des contributions que l'Europe souhaite apporter à l'effort d'exploration international. L'effort de développement technologique peut porter à la fois sur des technologies stratégiques dont l'Europe veut acquérir la maîtrise (générateurs radio-isotopiques par exemple), et sur des contributions à des développements en

⁴⁵ Thales Alenia Space. (8 février 2023). *SolarFlex : les futurs générateurs solaires flexibles des satellites Space INSPIRE*. Consulté le 27 juin 2024, disponible sur ce lien : <https://www.thalesaleniaspace.com/fr/news/solarflex-les-futurs-gene-rateurs-solaires-flexibles-des-satellites-space-inspire>

⁴⁶ ESA. (23 mai 2019). *ESA Strategy for Science at the Moon*. Consulté le 14 juillet 2024, disponible sur ce lien : <https://exploration.esa.int/web/moon/-/61371-esa-strategy-for-science-at-the-moon>

⁴⁷ ESA. (juin 2022). *Terra Novae 2030+ Strategy Roadmap*. Consulté le 11 septembre 2025, disponible sur ce lien : https://destination-orbite.net/documentation/Terrae_Novae_2030+strategy_roadmap.pdf

coopération bilatérale ou multilatérale plus ambitieux (réacteurs nucléaires par exemple). L'objectif de souveraineté devra aussi conduire à élaborer et instituer une réglementation spécifique pour autoriser le lancement de systèmes nucléaires depuis le Centre Spatial de Guyane. À cet égard, la procédure élaborée aux États-Unis, transposée dans le contexte européen, pourra servir de guide.

Le prochain Conseil ministériel de l'Agence Spatiale Européenne qui se tiendra fin 2025, pourra être l'occasion de **concrétiser ces ambitions avec le lancement d'un programme européen à part entière**. Celui-ci devra être réaliste et tirer le meilleur parti des synergies et des savoir-faire nationaux et européens, tout en conservant à l'international des coopérations fortes sur certaines technologies telles que les générateurs radio-isotopiques. **La voie vers une autonomie européenne sera donc progressive** et pourra offrir à l'Europe la souveraineté que lui ont permises Galileo, Copernicus, et bientôt IRIS².

Le développement de technologies radio-isotopiques européennes pour l'espace doit permettre de s'affranchir de la dépendance à des capacités tierces. Il doit se poursuivre à partir du programme ENDURE et conduire à un élargissement au-delà du Royaume-Uni.

Aujourd'hui, les deux voies considérées pour les générateurs radio-isotopiques méritent d'être poursuivies : le Pu-238 pour sa puissance spécifique élevée et l'Am-241 pour sa relative disponibilité. Avec l'une ou l'autre de ces approches (qui présentent entre elles des synergies importantes), les générateurs radio-isotopiques constituent un équipement d'entrée de gamme utile pour une diversité d'applications stationnaires et mobiles, à même d'ouvrir la voie au développement plus ambitieux de réacteurs nucléaires. L'Europe a beaucoup d'atouts sur lesquels s'appuyer, avec des filières nationales fortes d'une grande expertise.

En matière de **réacteurs nucléaires**, la recherche de compacité et d'économie de masse, ainsi que l'évacuation de la puissance thermique non convertie par rayonnement (en l'absence d'eau et d'atmosphère) peuvent orienter les choix techniques vers la haute température⁴⁸, et les réacteurs à neutrons rapides. Ces orientations rejoignent celles des recherches sur les réacteurs de 4^e génération (Gen-IV) qui visent à mieux exploiter le potentiel énergétique de l'uranium et à étendre la production nucléaire décarbonée à la chaleur, à l'hydrogène et aux carburants de synthèse pour les transports. Ces orientations ouvrent des perspectives de synergies avec les recherches sur les prochaines générations de réacteurs sur Terre.

À l'instar des réacteurs nucléaires, les coûts du conditionnement, et de la qualification pour des utilisations spatiales nécessiteront également des investissements importants.

Pour soutenir ces coûts, une **stratégie de mutualisation** devra être établie : si la France et le Royaume-Uni, forts d'une expertise nucléaire, peuvent donner individuellement l'impulsion nécessaire au lancement d'un programme européen, la décision d'investissement devra être prise et assumée en commun. Pour accroître l'efficacité des investissements faits en Europe, des groupements industriels transnationaux pourraient être créés et coordonnés par l'ESA pour conduire le développement de technologies de l'énergie stratégiques pour la politique spatiale européenne, civile et potentiellement militaire.

Le besoin d'articuler les contributions nationales au sein d'un même programme européen s'étend à l'ensemble des technologies stratégiques codéveloppées par l'industrie et les laboratoires nationaux. Ce besoin s'exprime également dans la définition d'une réglementation pour le lancement de systèmes nucléaires mutualisant les obligations et les risques.

Dans cette logique de coopération renforcée, la question juridique entourant le recours à des systèmes nucléaires dans l'espace constitue un enjeu crucial, à la fois pour garantir la sûreté des missions et pour bâtir un cadre commun de responsabilité au sein de l'Europe. Actuellement, le continent ne dispose pas de cadre juridique (national ou européen) permettant le lancement d'équipements nucléaires dans l'espace. En particulier, le lancement de systèmes intégrant une source d'énergie nucléaire impose le respect de normes internationales strictes, telles que celles indiquées dans la résolution 47/68 adoptée par l'Assemblée générale des Nations Unies le 14 décembre 1992, intitulée « *Principes applicables* ».

48 Voir une thèse récente à ce sujet : N. Rey-Tornero, 2023, Étude et conception d'un réacteur spatial à sels fondus (thèse), disponible sur ce lien : <https://theses.hal.science/tel-04099142v1/document>

à l'utilisation des sources d'énergie nucléaire dans l'espace ». Ces principes se déclinent différemment selon le type de système nucléaire embarqué, qu'il s'agisse de générateurs radio-isotopiques (RTG) ou de réacteurs nucléaires spatiaux. Les Principes de 1992 proposent un concept général de « défense en profondeur » qui, lorsqu'il est appliqué aux sources d'énergie nucléaire spatiales (NPS), prévoit l'utilisation de caractéristiques de conception et d'opérations de mission pour prévenir ou atténuer les conséquences des dysfonctionnements du système. D'après les informations officielles du Bureau des affaires spatiales des Nations unies (UNOOSA), bien que les États communiquent régulièrement, conformément à l'article XI du Traité sur l'espace extra-atmosphérique, au sujet de la désorbitation de leurs objets spatiaux et de leur rentrée dans l'atmosphère, très peu de notifications concernent les systèmes nucléaires. En effet, seules trois notes verbales ont été transmises à ce titre : deux par les États-Unis (en 2005 et en 2020) et une par la Fédération de Russie (en 2023), cette dernière faisant référence au principe 4 des Principes de 1992.

Un cadre juridique européen cohérent, basé sur les normes internationales et soutenu par une coordination technique entre États membres, est indispensable pour développer des capacités nucléaires spatiales de manière responsable. Ces capacités constitueront un levier clé pour soutenir des missions de longue durée et, à terme, participer à l'établissement d'une base lunaire européenne durable. Il pourrait être opportun de recommander la mise en place de mécanismes de partage d'informations relatifs aux caractéristiques de conception et aux modalités opérationnelles des missions, afin de prévenir ou d'atténuer les conséquences d'éventuels dysfonctionnements des systèmes, ainsi que de préciser les zones où se dérouleront les activités concernées. Par ailleurs, afin de limiter les risques de contamination ou de radiation, il serait également pertinent d'évaluer les dispositifs de protection des personnes et de l'environnement au sein de la biosphère lunaire face aux dangers, ainsi que les mesures à envisager en cas de risque avéré.

3. Stocker l'énergie

Le stockage de l'énergie est un enjeu essentiel pour les futurs équipements lunaires et pour les éventuelles bases au sol, qu'il s'agisse de l'énergie produite sur Terre et amenée dans l'espace, ou de l'énergie produite *in situ*. Le stockage permet en premier lieu d'assurer une continuité d'alimentation en énergie pendant la nuit lunaire : même au pôle Sud dans les zones illuminées en quasi-permanence, les nuits peuvent durer plus d'une centaine d'heures et les premiers mix énergétiques seront très dépendants de l'illumination. Par ailleurs, les équipements mobiles tels que les rovers (pressurisés ou non) emporteront nécessairement un système de stockage.

À des échelles de temps plus courtes, la continuité se traduit également par un besoin de compenser le **décalage entre la production et la consommation d'électricité**, les périodes de pic de génération et ceux d'utilisation n'étant généralement pas simultanés.

S'y ajoutent des motifs évidents de sécurité : de tels systèmes doivent faire face aux imprévus, et maintenir des opérations vitales en cas de défaillance des systèmes de production. Les systèmes de stockage restent indispensables, même si une diversification du mix énergétique permet de réduire ces risques systémiques.

La NASA estime qu'à moyen terme, le soutien d'installations d'ISRU et d'un avant-poste habité au pôle lunaire nécessiterait un stockage d'énergie électrique **à grande échelle, sûr, de longue durée et nécessitant peu d'entretien**, à l'échelle du **MWh**⁴⁹. Traduit en termes de besoins, pour une durée d'éclipse de 4 jours (environ 100 heures), un MWh correspondrait à la fourniture en continu d'une dizaine de kilowatts, de quoi couvrir les besoins d'un module d'habitat rudimentaire ou en hibernation.

La masse des infrastructures énergétiques reste largement dominée par les systèmes de stockage. Leur optimisation reste donc particulièrement importante, et leur choix repose essentiellement sur plusieurs paramètres : le **niveau de sécurité** de ces systèmes, garantissant qu'ils ne constituent pas de menace pour les astronautes (cela passe notamment par une réduction au maximum des besoins de maintenance), leur **énergie spécifique** et leur **puissance spécifique**, leur **durée de vie**, et la **plage de températures** dans laquelle ils peuvent fonctionner.

La quantité d'énergie à stocker est déterminée par les besoins de puissance des systèmes à alimenter, et la durée pendant laquelle cette puissance doit être fournie en l'absence de production suffisante. La performance de ces batteries peut être évaluée à l'aune de leur énergie spécifique (Wh/Kg), mais aussi à la lumière d'autres critères, tels que la puissance spécifique ou la durée de vie.

La puissance spécifique mesure le débit de charge/décharge. Des technologies de stockage à haute puissance spécifique permettent de décharger rapidement l'énergie stockée pour aider à gérer des pics de demande ou répondre au besoin d'une charge lourde. Un compromis doit souvent être trouvé, selon les applications, entre l'énergie et la puissance spécifique.

La durée de vie des systèmes est essentielle pour éviter de coûteux remplacements et minimiser d'éventuelles interventions des astronautes. Elle peut être quantifiée par le nombre de cycles de charge/décharge que peut supporter le système, ainsi que par la profondeur de décharge. Pour les premières missions où les périodes habitées en surface seront courtes, une partie des systèmes de stockage pourra être placée en hibernation ; il faut donc des systèmes qui ne soient pas détériorés par des périodes de non-utilisation prolongée à basse température et soient capables de redémarrer après ces périodes. Pour les premières missions de plus longue durée, les batteries ou/et le stockage d'hydrogène seront systématiquement utilisés pour assurer l'alimentation électrique pendant la nuit lunaire.

La **plage de température** adaptée au fonctionnement de ces systèmes de stockage est importante, vu les conditions locales sur la Lune. **Ces températures, variant à l'extrême**,

49 Scott, JH. (20 juin 2023), "Envisioned future priorities for: "LIVE: Power and Energy Storage". Art cit. p. 13.

rendent indispensable le recours à un système de contrôle thermique actif et passif. La recherche de technologies de batteries ou de stockage d'hydrogène plus tolérants aux variations de température permet d'augmenter l'énergie spécifique de l'ensemble du stockage en allégeant la masse du système de contrôle thermique.

Pour maintenir les composants électroniques dans leur plage de fonctionnement, on peut soit utiliser des RHU soit une partie de l'énergie disponible. Cette deuxième solution s'avère nettement plus coûteuse, et plus lourde. Ces solutions déterminent à la fois la masse totale du système et la puissance électrique disponible pour les utilisateurs finaux. La part d'énergie recyclée dans le conditionnement thermique est d'autant plus importante que la température à maintenir est élevée.

Les batteries ont pu satisfaire les besoins de stockage et les cycles de charge/décharge requis pour les missions de relativement courte durée menées jusqu'à aujourd'hui. Pour ces missions, elles représentaient la technologie de stockage la plus simple et la plus performante du point de vue de la masse globale⁵⁰.

Cependant, le niveau de puissance et les durées de fonctionnement requis pour les futures missions lunaires conduisent à des masses de batteries prohibitives et **orientent vers l'utilisation de systèmes couplés associant des batteries et des piles à combustibles régénératives.**

A. Batteries électrochimiques

Les batteries électro-chimiques sont une technologie mature de stockage d'énergie pour les applications spatiales. Une batterie électro-chimique classique est composée de deux électrodes, l'anode et la cathode, immergées dans un électrolyte le plus souvent liquide. Les électrons libérés par l'anode circulent à travers un circuit externe, produisant un courant électrique, avant d'être captés par la cathode. On désigne généralement les différentes batteries par la composition de leur électrolyte (Lithium-ion) ou de leurs électrodes (Argent-Zinc, NMC ou LFP⁵¹).

Les batteries primaires

Les batteries primaires (non rechargeables) sont utilisées pour assurer une alimentation pendant des séquences de courte durée (par exemple pendant ou peu après le lancement), ou pour la fourniture d'énergie à bas niveau pendant des périodes prolongées. Elles peuvent offrir de fortes puissances spécifiques et fonctionner en performances réduites jusqu'à des températures de -40 °C⁵². Elles peuvent être utilisées pour certaines applications comme l'alimentation d'une sonde au moment de l'atterrissement **mais elles ne conviennent pas pour le stockage d'électricité à l'échelle d'une base lunaire, car elles ne sont pas rechargeables.**

En conséquence, l'utilisation de batteries primaires se limite aux cas « d'ultime recours » et l'impossibilité de tester le système et de mesurer le niveau de charge après le lancement oriente vers l'emploi de technologies éprouvées.

Les batteries secondaires

Ce sont les batteries secondaires qui, couplées à un système de génération d'électricité comme des panneaux photovoltaïques, peuvent stocker l'énergie pendant les périodes de production et la restituer en continu aux utilisateurs, y compris pendant la nuit lunaire. Les batteries argent-zinc, utilisées du temps des missions Apollo présentent la plus grande énergie spécifique, mais ne sont plus utilisées du fait d'une dégradation rapide des performances après quelques cycles de charge/décharge et de faibles performances en-deçà de -20 °C⁵³.

50 Guzik, M. C., Gilligan, R. P., Smith, P. J., & Jakupca, I. J. (17 septembre 2018). *Energy Storage for Lunar Surface Exploration*. Consulté le 11 septembre 2025, disponible sur ce lien : <https://ntrs.nasa.gov/citations/20190000472>

51 NMC ou LFP : Nickel-Manganèse-Cobalt ou Lithium-Fer-Phosphate pour la cathode (et graphite pour l'anode)

52 Knap, V., Vestergaard, L. K., & Stroe, D.-I. (janvier 2020). A Review of Battery Technology in CubeSats and Small Satellite Solutions. *Energies*, vol. 13, p. 4097.

53 Pathak, A. D., Saha, S., Bharti, V. K., et al. (mai 2023). A review on battery technology for space application. *Journal of Energy Storage*, vol. 61, p. 106792.

Les batteries au lithium, notamment lithium-ion massivement utilisées sur Terre, dominent également le marché spatial. De telles batteries équipent ainsi l'ISS, en remplacement de batteries au nickel deux fois moins performantes⁵⁴. Elles peuvent fonctionner jusqu'à des températures de 40°C en perdant alors 75% de leur capacité⁵⁵. Un dispositif de gestion thermique actif (e.g. RHU ou chauffage électrique) et également passif (isolation thermique) est utilisé pour maintenir les cellules dans leur plage de température fonctionnelle.

Les architectures lithium-ion à électrolyte liquide peuvent présenter certains risques en raison du caractère inflammable de l'électrolyte. En cas de fuite ou de rupture, ces électrolytes peuvent réagir avec d'autres matériaux, entraînant des risques d'incendie ou d'explosion qui appellent des protections particulières.

En plus d'être conçu pour assurer le meilleur niveau de sécurité, le stockage d'énergie à l'échelle d'une base lunaire habitée doit respecter une limite de masse acceptable, ce qui rend nécessaire d'associer des piles à combustible régénératives à des batteries.

B. Les piles à combustible régénératives

Avec les énergies spécifiques actuelles des batteries électro-chimiques, les besoins exprimés par la NASA d'un stockage de l'ordre du MWh correspondraient à une masse de près de 10 tonnes. Les piles à combustible régénératives, ou **RFCS** (*Regenerative Fuel Cell System*), pourraient permettre des gains substantiels de masse. Elles nécessitent cependant de développer toute une logistique de l'utilisation de l'hydrogène H₂ et de l'oxygène O₂, nécessaires à leur fonctionnement.

Les piles à combustible convertissent l'énergie électrique en énergie chimique réversible sous forme d'H₂ et d'O₂ obtenus par électrolyse de l'eau. Lorsque de l'énergie est disponible (par exemple pendant les périodes d'insolation pour une source solaire), les piles consomment une partie de la puissance produite pour électrolyser l'eau en H₂/O₂ gazeux. Pendant les périodes de production insuffisante, l'opération inverse se produit et la recombinaison de l'eau s'accompagne de la production de chaleur et d'électricité. Cette capacité à être réversible, fonctionnant à la fois comme électrolyseur et comme pile à combustible, confère aux RFCS un statut de système autonome de conversion et de stockage de l'électricité. Si l'efficacité globale du système (qui est le rapport de l'énergie obtenue sur l'énergie fournie), est **plus faible que pour les batteries électro-chimiques**, leur énergie spécifique reste malgré tout supérieure à celle des batteries.

Une autre limite des piles à combustible réside dans leur faible compacité principalement liée à la faible densité volumique d'H₂. Il est intéressant d'associer aux piles à combustible une chaîne logistique comprenant un stockage cryogénique d'H₂ (à condition de pouvoir l'approvisionner en énergie) produit à la surface de la Lune pour limiter d'autant le besoin d'emport depuis la Terre.

L'optimisation de piles à combustible réversibles utilisables comme moyens de conversion de l'électricité et de production de chaleur et d'électricité pendant la nuit passe par le perfectionnement de membranes pour les piles à membrane échangeuse de protons (PEM) et d'électrolytes solides pour les piles et électrolyseurs à oxyde solide (SOFC/SOEC). **Le développement de ces technologies de haute performance, avec la fiabilité et la durée de vie requises pour les missions spatiales, est potentiellement porteur de retombées intéressantes pour la production d'hydrogène et le stockage d'électricité sur Terre.**

L'utilisation de ressources spatiales présentes localement (ISRU) peut aussi servir pour des piles à combustible, en recourant à l'H₂ et à l'O₂ produits localement. Le choix de recourir à l'ISRU est encore limité par des défis technologiques importants à surmonter, tout comme il présente un impact environnemental local important et nécessite un approvisionnement énergétique massif pour extraire, raffiner et traiter les ressources en grandes quantités. Si toutefois un tel choix était fait, alors plusieurs étapes seraient à réaliser : (1) **la prospection**, déjà bien avancée par de nombreuses missions en orbite et au sol pour identifier les sites

54 Les batteries installées sur l'ISS à partir de 2017 sont des batteries lithium-ion à cathode NCA (nickel-cobalt-aluminium) et anode en graphite, fournies par GS Yuasa, offrant une densité énergétique deux fois supérieure aux anciennes batteries nickel-hydrogène.

55 Scott, John H. (20 juin 2023), "Envisioned future priorities for: "LIVE: Power and Energy Storage". Art cit.

propices à l'extraction d'eau ou d'autres ressources ; (2) **une exploration plus complète des zones d'ombre permanente** et une évaluation plus précise de leurs ressources, notamment en **eau** ; et (3) **le déploiement d'infrastructures** dont les besoins en énergie pour exploiter les ressources locales auront été préalablement évalués. Une fois ces trois étapes passées vient la phase **opérationnelle** de l'ISRU : elle se décompose en des étapes d'**extraction** et de **traitement** des ressources (e.g. séparation des autres composants et purification de l'O₂ extrait de la glace d'eau). Il faut ensuite **stocker** les ressources pertinentes, notamment l'O₂ et l'H₂, dans des réservoirs à très haute pression ou sous forme liquide, dans des réservoirs cryogéniques.

Le stockage d'O₂ constitue un défi technologique de plus court terme en raison de l'abondance de cet élément dans le régolithe lunaire (à hauteur de 40 % du volume du régolithe⁵⁶) et des autres applications qu'il pourrait trouver, notamment pour les systèmes de support de vie. Le stockage de l'oxygène pourrait se faire à haute pression (300 bar) ou sous forme liquide en dehors des systèmes RFCS pour des gains de volume, ce qui nécessiterait de maintenir le réservoir à une température inférieure à 183 °C. Le stockage d'H₂ liquide nécessitera des systèmes plus complexes et une température maintenue à 250 °C. Il pourra s'appuyer sur les retours d'expérience du stockage d'O₂.

Dans l'hypothèse d'une extraction *in situ* à l'échelle industrielle d'O₂ et d'H₂ à la surface lunaire (i.e. plusieurs dizaines de tonnes par an), des piles régénératives pourront être envoyées sans combustible et être directement approvisionnées sur place. En attendant, la démonstration d'un système RFCS transporté avec de l'eau est envisageable.

C. Méthodes alternatives de stockage

Des méthodes moins conventionnelles de stockage sont également envisagées, notamment par la NASA. C'est par exemple le stockage par volant d'inertie et le stockage thermique dans le régolithe lunaire. La NASA souligne que des prototypes de volants d'inertie capables de stocker 5 MWh_e ont été construits pour des usages terrestres, mais restent encore **peu étudiés pour des applications sur la Lune**, et que le stockage thermique d'énergie en est **encore au stade de concept**⁵⁷.

L'utilisation de volants d'inertie

Des volants d'inertie peuvent stocker de l'énergie sous forme mécanique. Constitués généralement d'un disque ou d'un cylindre en rotation, ils fonctionnent sur le principe de la conservation de l'énergie. Lorsqu'ils tournent, par exemple en étant entraînés par un moteur électrique, ils accumulent de l'énergie cinétique qui peut être restituée lorsque la rotation ralentit. Couplée à un générateur, la rotation des volants d'inertie peut entraîner un rotor qui produit du courant électrique.

Les volants d'inertie offrent de nombreux avantages⁵⁸ : leur durée de vie dépasse 15 ans et 90 000 cycles de charge/décharge, et ils possèdent des profils de charge/décharge flexibles, permettant une utilisation optimale des panneaux solaires. De plus, ils peuvent fonctionner sur de larges plages de température (de -45 °C à 90 °C pour les modèles étudiés par la NASA) en raison de la nature mécanique du stockage, ce qui réduit les besoins en contrôle thermique. Enfin, l'état de charge des volants d'inertie peut être précisément mesuré à l'aide de capteurs.

Sur le plan de la fiabilité, les volants d'inertie **ne se dégradent pas lorsqu'ils ne sont pas utilisés**, constituant ainsi des systèmes intéressants pour les nuits des premières phases d'exploration pendant lesquelles certains systèmes seront mis en hibernation. Ils peuvent assurer une **isolation électrique complète** entre une source d'énergie (par exemple des

56 Crawford, I. A. (avril 2015). *Lunar resources: A review*. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, vol. 39, no 2, p. 137-167.

57 Scott, John H. (20 juin 2023), "Envisioned future priorities for: "LIVE: Power and Energy Storage". Art cit.

58 Dever, T. (21 mai 2013). *Development of a High Specific Energy Flywheel Module, and Studies to Quantify Its Mission Applications and Benefits* (NASA E-664039). NASA Glenn Research Center. Consulté le 11 septembre 2025, disponible sur ce lien : <https://ntrs.nasa.gov/citations/20150009522>

panneaux solaires) et une charge comme l'habitat : un moteur basse tension charge le volant d'inertie à partir des panneaux solaires et un générateur haute tension distinct peut fournir de l'énergie aux équipements lunaires. La fiabilité étant assurée au niveau des composants au sein d'un module de volant d'inertie, une petite ferme de volants d'inertie offrirait un haut niveau de redondance.

L'intérêt des volants d'inertie reste malgré tout limité par leur faible énergie spécifique, bien en deçà de celle des batteries lithium-ion. Le plus récent système développé par la NASA pour des applications spatiales atteignait 80 Wh/kg pour le rotor seul et **35 Wh/kg** en tenant compte de la masse du système de support⁵⁹.

Le stockage dans le régolithe

Le régolithe peut être utilisé comme moyen de stockage d'énergie par chauffage pendant des périodes d'insolation, par exemple grâce à un concentrateur solaire. L'énergie peut être restituée directement sous forme de chaleur ou sous forme d'électricité avec un convertisseur. Sur Terre, l'énergie thermique a l'avantage de pouvoir être stockée relativement facilement et à faible coût, ce qui a conduit au principe des batteries de Carnot, utilisées pour compenser l'intermittence de certaines énergies renouvelables. Sur la Lune, cependant, la difficulté principale d'un tel système réside dans la très faible conductivité thermique du régolithe, qui se présente sous la forme d'une fine poudre peu compacte⁶⁰. Cette faible conductivité peut avoir un réel intérêt pour l'isolation thermique, mais doit être augmentée si on veut utiliser le régolithe pour stocker et restituer rapidement la chaleur.

La NASA a travaillé sur un concept « d'oued thermique » (*thermal wadi*)⁶¹. Il se compose d'un stockage thermique (un matériau capable de capter et de restituer la chaleur) et d'un ou plusieurs réflecteurs d'énergie permettant de diriger l'énergie solaire vers le stockage thermique pendant les périodes d'ensoleillement et de limiter les déperditions d'énergie par rayonnement pendant les périodes d'obscurité. Pendant les périodes d'ensoleillement, l'énergie thermique est absorbée et stockée dans la masse thermique. Pendant les périodes d'obscurité, l'énergie stockée peut être utilisée pour réguler la température des rovers et autres engins d'exploration. A noter que des synergies sont possibles entre stockage thermique, systèmes piles et électrolyseurs à oxyde solide (SOFC/SOEC). Des études européennes sur des projets comparables ont été réalisées, notamment avec l'agence spatiale allemande (DLR)⁶².

Pour améliorer les propriétés thermiques du régolithe et obtenir une capacité thermique qui soit intéressante, il a été envisagé d'y ajouter des composés adéquats, ou encore de le compacter et le fritter préalablement pour obtenir des « briques » conductrices⁶³. Il a également été envisagé de faire fondre directement le régolithe, ce qui demande davantage d'énergie. Le niveau d'énergie nécessaire pour obtenir une capacité thermique intéressante et les coûts associés déterminent la viabilité de ce système, qui n'est pas bien établie.

Le bénéfice attendu de tels systèmes est d'éviter l'emport de masse depuis la Terre, en apportant simplement les systèmes nécessaires pour stocker et chauffer le matériau présent sur place. Si le stockage est réalisé à une profondeur raisonnable, si l'énergie y est stockée en quantité suffisante et si la perte de chaleur par rayonnement peut être limitée, les « oueds thermiques » pourraient devenir une solution intéressante. À ce stade, ils ne constituent pas une option pour les premières phases d'exploration lunaire.

59 Dagnæs-Hansen, N. A., & Santos, I. (2019). Overview of Mobile Flywheel Energy Storage Systems State-Of-The-Art: 13th International Conference on Dynamics of Rotating Machinery. In Proceedings of 13th SIRM: The 13th International Conference on Dynamics of Rotating Machinery, p. 282 294.

60 Liu, Y., Shen, T., Lv, X., et al. (1er avril 2023). Investigation on a lunar energy storage and conversion system based on the in-situ resources utilization. Energy, vol. 268, p. 126681.

61 Balasubramaniam, R., Gokoglu, S. A., et al. (1er janvier 2011). Analysis of Solar-Heated Thermal Wadis to Support Extended-Duration Lunar Exploration. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, vol. 25, p. 130.

62 Celotti, L., Piskacev, M., Vitale, C., Aggarwal, B., et al. (17 avril 2019). *MESG Project – Moon Energy Storage and Generation: Executive Summary Report*. Sonaca Space GmbH / DLR, ESA Contract No. 4000119561/17/F/MOS. Disponible en ligne.

63 Tillotson, B. (février 1992). *Regolith thermal energy storage for lunar nighttime power*. In Proceedings of the Lunar Materials Technology Symposium. Arizona University. Consulté le 14 juillet 2024, disponible sur ce lien : <https://ntrs.nasa.gov/citations/19930018795>

Encadré stratégique : le rôle potentiel de la France et de l'Europe pour le stockage d'énergie pour l'exploration spatiale

1. Pour les batteries électrochimiques :

Des chantiers de recherche sont à mener dans le domaine de la chimie des batteries, afin de les rendre plus résistantes à des plages de température plus importantes. Les SSB (*Solid-State Batteries*) constituent une solution intéressante, en disposant d'une large plage de température de fonctionnement.

Au niveau de la cellule de la batterie, de récentes études montrent que des batteries au lithium à électrolyte solide pourraient théoriquement remplacer les batteries conventionnelles⁶⁴, mais de nombreux obstacles restent à lever sur le plan de la performance à long terme, de la puissance spécifique et de la viabilité économique⁶⁵. À ce stade de développement pour des applications terrestres, il ne semble pas y avoir de perspective pour de telles batteries à court et moyen terme pour les missions lunaires.

Au-delà des batteries lithium-ion, d'autres technologies pourraient être développées. Des batteries **lithium-soufre** ont été étudiées par Airbus Defence & Space pour des applications spatiales⁶⁶. Elles présentent une puissance spécifique supérieure à celles des batteries lithium-ion, mais sont toujours limitées en durée de vie du fait d'une forte dégradation des performances au-delà d'une centaine de cycles de charge/décharge. D'autres types de batteries en développement pour des applications terrestres (visant par exemple à améliorer les performances en sécurité, en énergie spécifique ou en durée de vie) pourront être considérés pour l'espace après un processus de « spatialisation » généralement long.

Il est ainsi probable que le stockage d'énergie sur la surface lunaire ne soit pas seulement assuré par des batteries électro-chimiques mais comporte aussi des piles à combustible régénératives (RFCS).

2. Pour les piles à combustible régénératives :

L'ESA travaille à la maturation des piles à combustible régénératives en collaboration avec le laboratoire industriel norvégien *Clara Venture Labs*⁶⁷, et d'autres autres acteurs français et européens dont Air Liquide, & Airbus. Dans le cadre du projet en cours, *Clara* est chargé du développement de l'électrolyseur, qui opère la décomposition de l'eau en H₂/O₂, et Air Liquide travaille sur la pile à combustible.

Le projet a mené au test par Air Liquide d'un système validant le prototype en laboratoire (cf. fig. 12). Des essais doivent être menés pour valider le fonctionnement du prototype dans les conditions simulées de l'environnement lunaire tout en augmentant la fiabilité (à travers une évacuation passive de l'eau issue de l'électrolyse inverse) et l'efficacité du système. Les réservoirs d'O₂ et d'H₂ doivent encore être conçus.

Bien que les développements des piles à combustible régénératives restent limités au niveau du système complet, en raison des contraintes de volume qui sont plus dimensionnantes pour les usages terrestres, des progrès réalisés sur différents sous-systèmes (e.g. le stoc-

64 Betz, J., Bieker, G., Meister, P., et al. (2019). *Theoretical versus Practical Energy: A Plea for More Transparency in the Energy Calculation of Different Rechargeable Battery Systems*. *Advanced Energy Materials*, vol. 9, no 6, p. 1803170.

65 Janek, J., & Zeier, W. G. (mars 2023). *Challenges in speeding up solid-state battery development*. *Nature Energy*, vol. 8, no 3, p. 230 240.

66 Samaniego, B., Carla, E., O'Neill, L., et al. (2017). *High specific energy Lithium Sulfur cell for space application*. *E3S Web of Conferences*, vol. 16, art. n. 08006.

67 Clara Venture Labs. (8 mai 2023). *Clara Venture Labs develops innovative power system for ESA's Moon missions*. Consulté le 1 juillet 2024, disponible sur ce lien : <https://claraventurelabs.com/news/claraventurelabs-develops-innovative-power-system-for-esas-moon-missions>

kage d'H₂ et d'O₂, ou l'électrolyseur) peuvent présenter des synergies intéressantes pour les usages spatiaux et terrestres.

Sur la Lune, les piles à combustible pourraient être adaptées pour fonctionner avec le module cargo *Argonaut* fourni par l'ESA dans le cadre des accords Artemis⁶⁸. Ce module cargo pourrait ainsi servir de station de stockage d'énergie pour les infrastructures existantes. Avec une charge utile de 1,5 tonne, un seul alunisseur *Argonaut* pourrait offrir une capacité de stockage d'énergie de **600 kWh_e** si les performances visées pour les piles à combustible se confirment.

68 ESA. (3 février 2023). *Surviving the Lunar Night with a Regenerative Fuel Cell System*. Consulté le 1er juillet 2024, disponible sur ce lien : https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Shaping_the_Future/Surviving_the_Lunar_Night_with_a_Regenerative_Fuel_Cell_System

Conclusion

Pour une stratégie européenne en matière d'énergie pour l'exploration spatiale

Dans un contexte géopolitique évoluant vers une compétition accrue, **l'Europe doit aujourd'hui, pour sa souveraineté et sa sécurité, dépasser son statut de partenaire important de grands programmes internationaux**. Elle doit concrétiser une ambition propre de puissance spatiale, ce qui implique une plus grande autonomie stratégique et technologique. Il en va, entre autres, de la capacité d'accéder d'une façon autonome à l'espace et à une présence exploratoire sur le sol lunaire, ainsi que de maîtriser des compétences robustes en matière de robotique et de technologies de l'énergie pour l'exploration spatiale.

Bon nombre d'industries européennes sont déjà très impliquées dans le développement des technologies de production d'énergie solaire et nucléaire, ainsi que de stockage de l'énergie nécessaires aux missions de l'ESA. L'avenir dans ce domaine appelle à poursuivre les travaux de maturation technologique et de démonstration en vol pour des solutions telles que les panneaux solaires flexibles et à très haut rendement, les piles à combustible régénératives (RFCS), les batteries rechargeables à ultra-haute densité énergétique.

En matière d'énergie nucléaire, complémentaire d'autres sources d'énergie, les programmes continentaux comme ENDURE sont à encourager et étendre, car ils permettent le développement de capacités européennes dans le domaine des générateurs radio-isotopiques. **Il est temps de construire un programme européen de générateur radio-isotopique à partir des premiers développements du programme ENDURE et des feuilles de route esquissées dans les programmes-cadres de recherche et de développement de l'Union européenne.** Cette première étape pourra ouvrir la voie parallèle du développement d'un petit réacteur spatial dans la gamme de 10 à 100 kWe adapté aux besoins de propulsion électrique ou d'alimentation d'une base lunaire éventuellement habitée pour les missions de l'ESA. Différentes études conceptuelles, parmi lesquelles *Rocketroll* et *Alumni* pilotées par l'ESA, identifient des feuilles de route pour les industriels européens du nucléaire, déjà très présents dans ces études. Ces développements rejoignent en partie ceux qui sont en cours pour les réacteurs de 4^e génération (Gen 4) et les spécificités de l'environne-

ment spatial, comme elles l'ont fait pour les technologies solaires et de stockage d'énergie, et devraient stimuler l'innovation pour des applications terrestres. **L'objectif d'autonomie requerra aussi de définir et mettre en œuvre un cadre juridique et une réglementation pour autoriser le lancement de systèmes nucléaires avec Ariane 6 depuis le Centre spatial de Guyane.**

Pour l'ensemble de ces objectifs, les approches et les organisations mises en place par les puissances spatiales majeures dont les États-Unis, constituent des précédents intéressants. C'est notamment le cas en matière de procédure d'autorisation de lancement de générateurs nucléaires et d'études prospectives aboutissant à l'élaboration de feuilles de route détaillées sur plusieurs décennies, comme le fait la NASA, pour développer les technologies clés nécessaires aux missions. Ces partenariats pourront être essentiels pour mener un programme réaliste, à la fois ambitieux et volontaire dans ses objectifs à long terme, et compatible avec les moyens qui pourront lui être alloués.

Pour accroître l'efficacité des investissements faits en Europe, des groupements industriels transnationaux pourraient être créés et coordonnés par l'ESA pour conduire le développement des technologies de l'énergie stratégiques pour la politique spatiale européenne. Ce programme coordonné pourrait s'inscrire dans une démarche européenne plus générale consacrée aux technologies d'atténuation et d'adaptation face au changement climatique, avec le bénéfice de retombées directes pour les applications terrestres et potentiellement pour la défense⁶⁹.

La réunion du Conseil ministériel de l'ESA prévue en fin d'année 2025 offre une excellente opportunité de consolider la stratégie européenne et de positionner l'Europe, forte de ses compétences scientifiques et technologiques, parmi les puissances spatiales libres de décider et capables de réaliser leurs propres missions d'exploration humaine et robotique. Il pourra s'y ajouter l'ambition de devenir, dans ce domaine, aussi influente qu'elle l'est pour la maîtrise du changement climatique, pour défendre les impératifs de durabilité et de responsabilité dans la conduite de ces missions et valoriser sur Terre les pratiques de sobriété et de recyclage qui s'imposent dans l'espace.

⁶⁹ L'intérêt des technologies spatiales pour la Défense motive aussi les programmes menés activement aux États-Unis, en Russie et au Royaume-Uni en coopération avec les États-Unis.

Enfin, l'élaboration d'une stratégie commune pour réduire la dépendance vis-à-vis de tiers pour l'exploration spatiale pourra contribuer à faire progresser la construction de l'Europe en amenant à instruire des questions appelant une adhésion des États membres à des réponses plus intégrées, alliant des considérations techniques, économiques, juridiques et duales (civil/défense).

Retombées potentielles pour les applications terrestres de technologies énergétiques développées pour l'exploration spatiale

Le développement des technologies énergétiques pour les missions spatiales, et en particulier pour les futures infrastructures lunaires, offre de nombreuses opportunités de synergies avec les technologies terrestres. Ces passerelles technologiques peuvent contribuer à la transition énergétique, au renforcement de la résilience des infrastructures critiques, et à des avancées pour la société et l'environnement.

L'espace agit comme un intégrateur technologique majeur, imposant des contraintes extrêmes de performance, de fiabilité, de compacité et de durabilité. Ces exigences stimulent le développement de technologies avancées, qui peuvent ensuite être transférées ou adaptées à des usages terrestres, parfois dans des contextes similaires : environnements isolés, infrastructures à risque, ou systèmes exigeant une gestion énergétique autonome.

Plusieurs technologies développées pour le spatial présentent un fort potentiel de retombées pour les applications terrestres :

- **Piles à combustible à hydrogène** : leur développement pour le spatial, avec des exigences élevées de durée de vie et de fiabilité, est porteur de retombées dans les domaines du stockage d'électricité, de la production et de la conversion d'hydrogène pour la transition énergétique.
- **Systèmes photovoltaïques à haut rendement** ($> 20\%$).
- **Batteries haute capacité** ($> 500 \text{ Wh/kg}$) : comme les batteries Li-(CFX)n, leur développement ouvrent des perspectives concrètes pour le solaire de haute performance ou le transport électrique terrestre.
- **Technologies RPS (Radioisotope Power Systems)** : bien que principalement développées pour le spatial, elles présentent des possibilités d'adaptation à des contextes terrestres spécifiques comme les fonds marins profonds ou des sites de stockage de déchets radioactifs à très longue durée de vie (ex. projet CIGEO).
- **Micro-grids intelligents** : dimensionnés pour des installations lunaires isolées, ils pourraient être dé-

ployés sur Terre pour renforcer la résilience énergétique d'infrastructures critiques.

- **Petits réacteurs nucléaires** : les échanges technologiques entre le spatial et le nucléaire terrestre de 4^e génération favorisent une fertilisation croisée, en particulier dans le développement de matériaux, de systèmes de contrôle ou de dispositifs de gestion de la sûreté.

Pour maximiser ces synergies, il est crucial de renforcer la coopération entre les acteurs nationaux et européens. Industriels, centres de R&D, monde académique et agences spatiales doivent collaborer pour structurer des écosystèmes d'innovation intersectoriels. Au niveau international avec des coopérations tournées vers des acteurs historiques de l'énergie spatiale, mais aussi vers des pays ou régions du monde désireuses d'acquérir avec l'Europe des compétences dans ce domaine stratégique.

La prochaine réunion du Conseil ministériel de l'ESA prévue en 2025 et celle de la Commission européenne consacrée au cadre financier pluriannuel (MFF) seront, là encore, des moments cruciaux.



33, rue Rennequin - 75017 Paris
Tél. : 01 55 35 25 50
www.anrt.asso.fr