NOTE STRATEGIQUE

FERTILISATION CROISÉE SPATIAL/NON-SPATIAL :
UN AXE STRATÉGIQUE MAJEUR POUR UN AVENIR COMMUN TERRE-ESPACE
Le cas de l'exploration lunaire à venir

Février 2023

Avec la relecture de **Claudie Haigneré**, ancienne ministre, présidente du Groupe Objectif Lune.

Directrice de publication
Clarisse Angelier, Déléguée Générale de l'ANRT.

Auteur
Alban Guyomarc'h, Coordinateur du Groupe Objectif Lune pour l'ANRT

Contributeurs
Bertrand Baratte, Director of Space Market, Global Market and Technologies, **Air Liquide** • **Sylvain Barthet**, Direction des Programmes de Recherche Avancée, **Michelin** • **Franck Carré,** Conseiller scientifique de la Direction des Energies, **CEA** • **Véronique Coxam**, Directrice de recherche, Cheffe adjointe du Département Alimentation Humaine, **INRAE** • **Tristan Cazenave,** Professeur, LAMSADE, **Université Paris Dauphine** • **Victor Dos Santos Paulino**, chaire-Sirius, **TBS Education** • **Cécile Gaubert**, General Counsel, **Exotrail** • **Franck Gechter,** Professeur des Universités, Laboratoire CIA (UMR 7533), **Université de Technologie de Belfort Montbeliard** • **Pierre-Alexis Joumel,** Director International & New Business, Space exploration – Space System, **Airbus Defense and Space** • **Florian Loire,** Strategy manager for civil launchers, **ArianeGroup** • **Philippe Lognonné,** Professeur, **Université Paris Cité – Institut de physique du globe de Paris** • **Gilles Rabin**, Docteur, conseiller pour l'espace à l'ambassade de France en Allemagne • **Lucien Rapp,** Professeur, IDETCOM, chaire Sirius, **Université Toulouse-Capitole** • **Elodie Viau,** Former ESA Telecommunications and Integrated Applications, **ESA .**

Créé en 2019, le Groupe Objectif Lune de l'ANRT réunit les acteurs du spatial et du non spatial pour conjuguer vision, innovation et communication sur le projet d'une base vie en expansion durable sur la Lune. La transformation de l'industrie spatiale servie par les nouvelles technologiques ouvre de nouveaux possibles et redonne du sens à l'exploration habitée de la Lune. Le groupe est présidé par Claudie Haigneré et soutenu par le CNES.

RÉSUMÉ EXECUTIF

Depuis 2019, le Groupe Objectif Lune de l'ANRT a acté l'intersectorialité en tant que pilier d'une stratégie lunaire européenne. **Il s'agit désormais d'aller plus loin pour parler d'*interdépendance spatial/non-spatial*: l'approche ISNS**. À l'heure du redémarrage de l'exploration lunaire, elle part d'abord du constat de **la diversité des nouvelles compétences nécessaires et des savoir-faire à mobiliser pour l'exploration spatiale aujourd'hui et demain**. Elle repose ensuite sur l'existence d'une **dépendance mutuelle des secteurs spatiaux et non spatiaux pour le développement des technologies futures d'exploration spatiale**. Réciproquement, l'exploration spatiale est aussi un lieu possible d'innovation en matière de **technologies de rupture pour l'avenir terrestre**.

Il s'agit de prendre la mesure de ce **changement de paradigme** pour réaffirmer l'importance du rôle de la puissance publique, revoir les synergies existantes entre les acteurs du spatial et du non-spatial afin de faciliter, *a minima*, **les transferts mutuels de technologies entre les secteurs**, et encourager, *a maxima*, une collaboration étroite dans la définition, la mise en œuvre et la conduite d'opérations spatiales. Cette coopération permet, outre les retombées économiques communes, d'assurer dans le même temps, **un lien Terre-Espace pour les applications ainsi développées**.

L'ISNS assure la collaboration étroite entre des acteurs terrestres qui disposent de connaissances et de savoir-faire terrestres déjà développés ou en cours de développement, *sur Terre*, avec des acteurs spatiaux qui disposent d'une connaissance fine des exigences particulières du milieu spatial.

In fine, l'ISNS est **l'affirmation de la possibilité d'une fertilisation croisée *spatiale - non spatiale*** permettant la synchronisation de développements technologiques complexes et complémentaires, vers la mise en place de nouvelles chaînes de valeur intégrées, et de capacités de services européennes. Nous l'appliquons dans cette note au cas de la Lune. Et notre satellite pourra, là encore, servir de **banc d'essai** pour envisager demain le déploiement d'une stratégie ISNS au reste de l'exploration spatiale.

INTRODUCTION

Depuis les débuts de ses travaux en 2019, le Groupe Objectif Lune de l'ANRT a acté l'intersectorialité en tant que pilier d'une stratégie lunaire européenne. **Nous avons mis en exergue l'importance pour les entreprises du non-spatial d'inscrire dans leur agenda le spatial lunaire pour un engagement dans l'espace, en continuité de leurs activités terrestres, et ainsi contribuer et bénéficier des avancées attendues en matière d'innovation.** Cette idée a été portée auprès des différentes instances de gouvernance des politiques spatiales et industrielles françaises et européennes. Et **une dynamique spatial/non-spatial se constate aujourd'hui en Europe dans différents projets d'exploration**. Cette réflexion stratégique se déroule par ailleurs à un moment charnière d'engagement européen pour l'exploration spatiale, à jeu égal voire en autonomie. Tout changement de paradigme est une occasion de penser à nouveau les dynamiques entre les acteurs et parties prenantes.

Au fil des travaux, nous avons fait un pas supplémentaire : nous ne parlons plus seulement d'intersectorialité mais d'***interdépendance*** spatial-non spatial (ci-après, l'approche ISNS). Il n'y là ni vœu pieux, ni effet de manche, mais plutôt un constat. L'approche ISNS affirme que, **plus qu'une coopération intersectorielle, il existe une dépendance mutuelle des secteurs spatiaux et non spatiaux pour le développement des technologies futures d'exploration spatiale. Réciproquement, l'exploration spatiale est aussi un lieu possible d'innovation en matière de technologies de rupture pour l'avenir terrestre.** L'approche ISNS[1] est à la fois le constat d'une nécessité et un impératif stratégique. Avec l'ISNS, l'exploration spatiale européenne en général et de la Lune en particulier entrent dans **une quadruple dualité : *spatial-non spatial, Terre-Espace, public-privé, civil-militaire***. Au-delà des aspects technologiques, l'ISNS s'ancre aussi dans les domaines géo-économiques, d'attractivité et de mobilisations des jeunes talents des entreprises spatiales et non-spatiales, faisant de l'exploration spatiale une occasion de développer des grands projets porteurs de solutions nouvelles pour l'humanité.

Si le NewSpace a diversifié les sources de financement des activités spatiales, il n'en demeure pas moins que les Etats et leurs agences jouent toujours un rôle prépondérant dans la mise en œuvre des grands projets spatiaux – notamment via des politiques d'investissement et d'appels d'offres. **La mise en œuvre d'une stratégie fondée sur une des approches ISNS a donc besoin du soutien de la puissance publique.** Un soutien d'autant plus important qu'il s'agit de donner un signal positif et encourageant aux acteurs du non-spatial pour les inviter à s'engager sur un domaine qui n'est pas initialement le leur. En étudiant l'incarnation de ce soutien, notre note adopte une optique française. Mais celle-ci est à inscrire dans une dynamique à l'échelle européenne, de collaboration spatiale. La France peut être un leader stratégique et le laboratoire d'une stratégie autonome d'approche ISNS.

[1] Interdépendance spatial-non spatial

1/ L'interdépendance spatial-non spatial : la définition d'une approche

Définir l'ISNS

Le bénéfice technologique mutuel Terre-Espace est déjà une réalité. D'une part, de nombreuses technologies développées à des fins terrestres ont vu leurs domaines d'action étendus à l'espace, *modulo* quelques adaptations – cette dynamique intitulée ***Spin-in*** a notamment permis le développement de panneaux solaires photovoltaïques, de batteries, de piles à combustible ou encore d'électronique pour l'espace. Réciproquement, les avancées technologiques réalisées à des fins spatiales ont trouvé des applications utiles et directes pour la Terre – cette dynamique s'appelant le ***Spin-off***. On peut avancer que le développement de services issus de la navigation et de la télécommunication par satellite a permis d'améliorer les services d'aide d'urgence, de suivi des personnes, des populations ou les évolutions agronomiques d'un territoire. On peut en outre citer deux autres exemples précis. D'abord, le développement d'une turbomachine pour réfrigérer les échantillons biologiques sur la station spatiale internationale en 2006 a permis à Air Liquide d'industrialiser une gamme de Turbo-Brayton compact et fiable, pour reliquéfier les évaporations de méthane sur les containers méthaniers et éviter ainsi toute émission de gaz à effet de serre. Ensuite, celui des recherches sur l'ostéoporose et ses traitements, initialement pour limiter le processus de perte osseuse chez les astronautes. Cette réciprocité s'est incarnée dans différents cadres : réponses d'industriels spatiaux et non spatiaux à des appels d'offres d'agences, coopération internationale en matière spatiale, etc.

Le développement des technologies spatiales va connaître un nouveau souffle avec l'arrivée de bases en expansion durable sur la Lune. On peut aisément penser qu'en trouvant là un nouveau laboratoire technologique et social – dans lequel, par ailleurs, seront envoyés des humains avec leurs besoins multiples – la Lune s'érigera en catalyseur majeur des dynamiques de *Spin-in* et de *Spin-off*.

C'est en s'inspirant de ce bénéfice mutuel que l'approche ISNS se définit. Plus que la collaboration entre le spatial et non spatial, la démarche se concentre sur leur interdépendance**.** Dans le cadre d'un redémarrage de l'exploration spatiale et lunaire, **l'approche ISNS part du constat de la diversité des nouvelles compétences nécessaires et des savoir-faire à mobiliser pour l'exploration spatiale aujourd'hui et demain.** Il s'agit de prendre la mesure de ce changement de paradigme pour **revoir les synergies existantes** entre les acteurs du spatial et du non-spatial afin de faciliter, *a minima*, les **transferts mutuels de technologies** entre les secteurs, et encourager, *a maxima*, une collaboration étroite dans la définition, la mise en œuvre et la conduite d'activités ou de projets spatiaux. Cette coopération permet, outre les retombées économiques communes, d'assurer dans le même temps, **un lien Terre-Espace pour les applications** ainsi développées.

Cette approche ISNS, fondée sur l'interdépendance entre acteurs spatiaux et non spatiaux est un **impératif stratégique**. Les nouvelles missions d'exploration spatiale ambitionnent d'emmener des humains et des robots dans l'espace sur une durée prolongée avec des programmes renouvelés (recherche et utilisation d'eau, extraction et exploitation de ressources, etc.). Les besoins en termes d'autonomie énergétique, d'habitat, de support de vie et de robotique sont reconfigurés. L'ISNS s'érige alors en condition de faisabilité et d'efficience des missions : **elle assure la collaboration étroite entre des acteurs terrestres qui disposent de connaissances et de savoir-faire terrestres déjà développés ou en cours de développement, *sur Terre*, avec des acteurs spatiaux qui disposent d'une**

connaissance fine des exigences particulières du milieu spatial. De façon plus prospective, le contexte spatial offre, dans une certaine mesure, une pré-figuration de certaines conditions terrestres futures requérant de s'adapter à un milieu hostile (pollution, changement climatique, etc) dans un espace contraint (ex. l'agriculture spatiale pourrait inspirer l'agriculture en environnement contrôlé de demain).

L'agrégation d'un tissu économique élargi autour d'un grand projet d'exploration spatiale permet d'assurer une création de valeur accrue autour dudit projet et transforme son coût en investissement. En embarquant des acteurs exploitant déjà sur Terre des compétences utiles aux missions spatiales, on invite ces mêmes acteurs à construire l'espace en laboratoire de leurs futures applications spatiales. De façon plus prospective, l'*in-orbit manufacturing* permettra de fabriquer directement dans l'espace des composants électroniques ou des molécules plus simples à produire en microgravité. La NASA a ainsi sélectionné en 2020 plusieurs entreprises pour mener des expériences de fabrication, en orbite, de câbles et de composants optiques (on pense notamment aux fibres optiques ZBLAN). Cette dynamique de bénéfices mutuels Terre-Espace pour l'exploration spatiale instaure une synergie entre acteurs, à même de garantir les coûts d'un projet d'exploration spatiale en maintenant, dans le temps, l'intérêt d'acteurs économiques pour ce dernier.

Exemples d'approches ISNS pour la Lune

La déclinaison lunaire de l'approche ISNS part du constat évoqué plus haut : à savoir que l'installation d'une base vie en expansion durable sur la Lune appelle des besoins radicalement nouveaux en comparaison des micro-séjours lunaires du programme Apollo. Il ne s'agit plus tant de faire survivre des astronautes que de les faire vivre sur la Lune, en mobilisant notamment les ressources locales pour produire in situ.

L'ISNS lunaire exige une collaboration étroite entre spatial et non spatial dans des domaines aussi variés que :

- **L'énergie :** avec d'un côté des technologies terrestres adaptées ou à adapter aux besoins lunaires (solaire photovoltaïque, générateurs radio-isotopiques, Small modular reactors (SMR : petits réacteurs nucléaires dans la gamme de 10 à 1000 kWe), technologie d'électrolyse ou de catalyse pour l'In Situ Ressource Utilisation (ISRU) etc.) et d'autre part des technologies développées pour le lunaire mais qui, par leurs potentialités terrestres, intéresseraient les acteurs non spatiaux (batteries pour le stockage d'énergie, sources compactes d'énergie, etc). Il pourrait exister une très grande synergie entre investissements effectués pour la transition énergétique sur Terre (filière hydrogène bas carbone), et les besoins de technologies pour stocker l'énergie intermittente disponible dans l'espace.
- **L'habitat spatial :** l'habitat spatial est, par nécessité, un habitat en circuit le plus fermé possible, où tout doit au maximum être réutilisé ou recyclé rapidement pour des usages nouveaux. Le coût du transport spatial appelle à un recyclage optimisé des ressources apportées (on pense notamment à l'eau) – en cela, l'habitat spatial peut constituer un laboratoire de l'habitat terrestre futur, avec l'implication d'acteurs terrestres dès la conception de l'habitat lunaire.
- **La santé :** la présence longue d'astronautes sur le sol lunaire implique par exemple d'équiper les bases de matériels de santé (radiologie, scanners, etc.) adaptés à la fois aux conditions spatiales et optimisés/miniaturisés pour le transport spatial. Les entreprises du secteur de l'imagerie médicale pourraient voir là l'occasion de développer des unités médicales

miniaturisées et légères, utiles notamment pour être déplacées rapidement sur terre dans des situations d'urgence ou des zones difficiles d'accès.

- **La vie dans l'espace :** en lien avec la section précédente, il s'agit également de nourrir les astronautes, produire l'air respiré, l'eau et la nourriture consommées. Toutes les technologies impliquées dans le support de vie peuvent intéresser les secteurs terrestres et spatiaux.
- **La mobilité :** une présence durable sur le sol lunaire permet d'envisager une mobilité accrue des astronautes à distance de la base. Les particularités de l'espace et du sol lunaire invitent à développer des solutions de transport et notamment de pneus/roues sans air adaptées à un sol accidenté, pulvérulent et abrasif – les travaux de Michelin, à ce sujet, sont importants. Ces équipements pourront avoir des utilisations terrestres immédiates sur des sols ou dans des zones arides présentant des analogies avec l'environnement lunaire. Les véhicules lunaires devront également être dotés d'une motorisation adaptée. L'association des industriels de l'automobile et des industriels spatiaux dans le développement de tels véhicules peut s'inscrire dans le cadre d'une approche ISNS assurant un bénéfice mutuel.
- **L'In situ ressource utilisation :** l'eau stockée sous forme de glace aux pôles de la Lune est une ressource pour laquelle un business-plan bénéficiaire peut être imaginé à moyen-terme. Dans un premier temps, l'enjeu sera de réaliser la prospection de cette ressource et d'identifier les sites les plus riches. Cela imposera d'adapter les techniques de prospection terrestres aux environnements lunaires, et ouvrira des perspectives de collaboration entre industrie de l'exploration géophysique, équipementier et laboratoires académiques. Puis dans un second temps, une exploitation massive des autres ressources lunaires exigera, à terme, des infrastructures d'extraction et de raffinage des ressources prélevées. Le savoir-faire des industries minières et chimiques terrestres pourrait être exploité aux fins de développer lesdites infrastructures.
- **Le numérique :** une présence à long terme sur la Lune pose des questions de connectivité. Il est essentiel de pouvoir transmettre des données et de pouvoir communiquer en permanence avec les infrastructures sur place (notamment sur la face cachée de la Lune). Pareillement, l'amélioration de modèles prédictifs et de modélisation numériques pourra servir tant la Terre que les bases lunaires. L'utilisation de l'IA, à la fois comme compagnon des astronautes et support à la gestion technique de la base est également à ranger ici.
- **Le ravitaillement en orbite :** l'utilisation des ressources lunaires permettront de fabriquer des carburants dans l'espace pour l'espace, et profiter d'une gravité sur la Lune 6 fois moindre que sur la Terre, pour favoriser le trajet vers n'importe quelle orbite (ie : même pour rejoindre l'orbite basse, il faut moins d'énergie depuis la Lune que depuis la Terre). Ainsi, la mise en place d'une infrastructure de ravitaillement standard et interopérable en différentes orbites, permettrait d'accroitre la durée de vie des véhicules spatiaux, réduire les débris, minimiser le coût total des missions, et par conséquent favoriserait des opérations spatiales plus durables. De nombreuses synergies avec les stations de remplissage gaz (ex : H2 bas carbone, Biogas) sont en cours de développement pour une mobilité terrestre et une aviation bas carbone.

En plus d'apporter un bénéfice industriel/technologique mutuel Terre/espace, ces développements cités en exemple permettraient de positionner l'Europe sur des services transverses dont toutes les nations présentes auront besoin et sont donc à même de favoriser la collaboration internationale, premier pilier de la durabilité en ce qu'elle permet une action scientifique et technique, commune et

globale. À la condition, toutefois, que des politiques de standardisation et d'interopérabilité soient menées entre lesdites nations.

2/ L'interdépendance spatial-non spatial : favoriser l'approche

L'importance d'une vision stratégique au service du couple appel d'offres ISNS

L'appel d'offres est au cœur approche ISNS, en tant notamment qu'il est une manifestation de la volonté stratégique des Etats et acteurs publics du spatial, mais aussi des grandes entreprises du secteur qui lanceraient des appels d'offres vers leurs partenaires et sous-traitants. Néanmoins, pour que les appels d'offres soient les plus bénéfiques à l'ISNS, il est nécessaire de pouvoir s'appuyer sur **une vision et une stratégie européenne à long terme, négociée et partagée pour solliciter un soutien public dans la durée et obtenir des moyens en rapport avec les objectifs visés.** Trop nombreux ont été les projets spatiaux laissés sans lendemain faute d'un soutien dans la durée. Il est également fondamental de **définir des objectifs de souveraineté communs en matière d'activités commerciales, de services, de technologies, de transports, etc.** L'ensemble de ces choix stratégiques devra par ailleurs **prendre en compte le paysage global des coopérations spatiales internationales de l'Europe pour décider ce sur quoi le continent peut s'engager souverainement et définir ses priorités en tant que partenaire de premier plan**. Par exemple, l'Europe pourrait souhaiter développer une technologie souveraine de générateur radioisotopique (dont disposent déjà les US, la Chine et la Russie), mais une activité européenne en matière de propulsion nucléothermique ne peut aujourd'hui s'envisager que comme une contribution à un programme plus largement international. Aussi, l'Europe pourrait développer des systèmes de pile à combustible régénérative (basée sur les technologies hydrogène), permettant de stocker les énergies intermittentes et de produire de l'électricité avec des rendements améliorés, offrant un bénéfice direct aux usages terrestres.

Au titre des considérations stratégiques**, il est intéressant de comparer les documents de stratégies européens et ceux adoptés par la NASA.**

Outre-Atlantique, ces documents (ex : NASA Technology Roadmaps, 2020 NASA Technology Taxonomy, NASA Strategic Technology Integration Framework, …) généralement de plusieurs centaines de pages **décrivent précisément les briques technologiques à développer et peuvent directement servir de guides pour des appels d'offres visant des développements technologiques complexes et multi-acteurs** (par exemple le réacteur de 1-10 KiloWatt électrique KRUSTY). À l'inverse, les documents stratégiques européens (ex : ESA Terra Novae 2030, ESA strategy for science on the moon, …) sont beaucoup plus courts, s'en tiennent aux objectifs programmatiques et évoquent très peu les développements technologiques nécessaires**. Or, ce sont ces documents stratégiques qui permettent de dégager précisément les domaines dans lesquels acteurs spatiaux et non spatiaux pourraient collaborer.** Plus encore, ces mêmes documents sont la garantie d'une élaboration cohérente et stratégique d'une politique d'appel d'offres ambitieuse.

Dans l'attente d'une définition plus précise des objectifs européens en matière d'exploration spatiale, et lunaire en particulier, les programmes nationaux ou certaines initiatives européennes peuvent apparaître insuffisamment coordonnés, trop peu pris en compte dans des programmes de recherche stratégiques pour des applications terrestres, ou encore trop ponctuelles et sans suite. On peut craindre à cet égard :

- Le peu de connexions avec les acteurs spatiaux des Programmes et Équipements Prioritaires de Recherche (PEPR) sur les batteries, l'hydrogène, les Technologies Avancées des Systèmes Energétiques (TASE) (Solaire PV et al.)

- L'absence du domaine spatial dans les thématiques sur lesquelles l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) émet annuellement des appels à propositions (ce qui n'empêche pas de proposer des thèmes de recherche utiles au domaine spatial dans des domaines génériques tels que la simulation numérique, les matériaux, l'exploitation scientifique des données spatiales).

L'élaboration d'une vision à long terme et d'une stratégie commune avec un degré de définition assez précis pour pouvoir être décliné en feuilles de route de technologies clé (à l'instar des documents de la NASA) **semble rester une étape à franchir en Europe pour orienter plus efficacement les appels d'offres des agences spatiales et d'autres acteurs** (programmes nationaux…). Cela concerne des technologies clés et des intersectorialités à développer pour atteindre le degré d'autonomie/souveraineté visé pour de nouvelles missions telles que l'exploration de la Lune (au-delà de la simple poursuite des partenariats et coopérations résultant des missions spatiales antérieures auxquelles l'Europe a participé). A ce titre, l'Europe doit s'assurer un accès autonome à l'espace et à la Lune en utilisant son propre lanceur lourd, avec, par exemple, le lancement de l'EL3 Argonaut à l'horizon 2030. Cette autonomie d'accès rend alors possible un développement souverain et autonome des activités scientifiques et commerciales européennes dans l'Espace et sur la Lune en particulier ; parmi lesquelles, les projets ayant opté pour une approche ISNS. Un approvisionnement budgétaire suffisant à ces projets spatiaux demeure une condition fondamentale.

Une fois la vision long terme en place, les actions ci-dessous permettraient d'accélérer sa mise en œuvre :

- **Dans les appels d'offres, privilégier la maturation de « chaînes de valeur », plutôt que la maturation technologique brique par brique** : ceci favoriserait la mise en place de consortium d'acteurs complémentaires, soucieux de coordonner leurs efforts de développement vers un service. Pour aller au bout du raisonnement ISNS, les appels d'offres pourraient intégrer le fait d'avoir des équipes mixtes industriels spatial / non spatial / recherche / start up dans les critères de réponse. *In fine*, et plus globalement encore, le couple appel d'offres-ISNS pourrait se mettre au service de grandes missions concrètes – au sens de Mariana Mazuccato dans son récent essai, *Mission économie* (Fayard, 2022) - pour accompagner les transitions technologiques et sociétales nécessaires à un futur soutenable.
- **Favoriser les démonstrations à échelle réduite, à maturité faible, en orbite ou en surface lunaire, en opportunité sur toutes les missions commerciales futures, pour démontrer les usages commerciaux, et tirer le marché par l'émergence rapide d'une nouvelle offre de service** (c'est l'offre générée par la commande institutionnelle qui va faire émerger le marché cislunaire et pas l'inverse). À ce titre, la mise à disposition auprès des différents acteurs d'installations ou d'analogues lunaires en France et/ou en Europe serait un véritable atout. Ces installations permettraient notamment aux acteurs non spatiaux de disposer d'un centre d'essai et de qualification, véritable lieu d'acculturation aux environnements spatiaux.

Faciliter l'ISNS

Il reste, sans perdre de vue l'importance de l'appel d'offres, trois éléments essentiels pour favoriser l'ISNS :

- En premier lieu**, la question du coût de la *spatialisation* des technologies non spatiales.** L'adaptation des technologies terrestres aux conditions particulières et aux besoins de l'espace peut représenter un coût démesurément important comparé au chiffre d'affaires qui pourrait être tiré desdites technologies dans un premier temps par les industriels terrestres. Dans cet esprit, des partenariats publics privés pourraient être développés entre institutions spatiales et champions de l'industrie terrestre, pour apporter l'effort marginal nécessaire à la spatialisation de technologies robustes, existantes sur Terre et nécessaires à la Lune. Si la spatialisation est une prise de risque à part entière, il est nécessaire de l'accompagner.
- Dans le même sens, en second lieu, **le développement de standards** est incontournable si on veut réellement faciliter la collaboration entre les secteurs spatiaux et non spatiaux. Plus encore, ces mêmes standards permettraient aux industriels du non-spatial de développer, en amont, des solutions et technologies compatibles avec le spatial.
- Il **faut encourager, par les politiques de recherche et développement, les programmes d'innovations duales.** Il serait intéressant de s'inspirer des stratégies développées dans le cadre des politiques de recherche civilo-militaires. On pourrait également imaginer la mise en place dans les écoles d'ingénieurs non-spatiales de modules de sensibilisation aux technologies spatiales et y initier et soutenir des défis et challenges favorisant la disruption spatiale/non-spatiale.
- Il faut enfin favoriser **un accès européen à la surface lunaire**, avec une approche comparable aux missions CLPS (voir ci-après) initiées par la NASA. A terme, un objectif allant de ce sens serait un appel d'offres européen pour un ou plusieurs atterrisseurs lunaires permettant de déployer tout à la fois des charges utiles institutionnelles (ESA ou Etats membres) et des charges utiles commerciales.

Apprendre du programme Commercial Lunar Payload Services (CLPS)

Aux Etats-Unis, le programme CLPS de la NASA finance le transport et le déploiement d'alunisseurs privés soumis à un appel d'offres. L'objectif est d'utiliser l'expertise d'acteurs privés pour concevoir et envoyer des équipements sur la Lune.

L'expertise technologique européenne est un atout important pour le développement des activités lunaires. La mise en œuvre d'un programme de type CLPS au niveau européen ferait particulièrement sens. Si dans un premier temps, les acteurs spatiaux sont les premiers à s'engager sur un tel programme, une politique incitative de collaboration ISNS pourrait mener les entreprises du non spatial à y trouver une opportunité. La mission HAKUTO-R d'ISpace a été également rendue possible par ArianeGroup, qui a assemblé, intégré et testé l'alunisseur à Lampoldshausen en Allemagne**.** L'ensemble des compétences mobilisées a permis de concevoir un système propulsif permettant l'alunissage. Il est essentiel de capitaliser. Sur ce type de savoir-faire pour le développement d'autres activités lunaires.

3/ Exemples de domaines et exemple de technologies de cross-fertilisation spatial-non spatial dans le cas de la Lune

Le tableau suivant présente, *de façon non-exhaustive*, les domaines et exemples de *cross-fertilisation* spatial-non spatial dans le cas de l'exploration de la Lune. Sur la colonne de gauche se trouvent les technologies spatiales, et la colonne de droite les technologies non spatiales. La mise en relation des deux colonnes illustrent une communauté d'enjeux technologiques entre la Terre et la Lune.

Technologies spatiales	Technologies non spatiales
MOBILITE	
▪ ROVERS LUNAIRES ▪ TRANSPORTEURS LUNAIRES ▪ DRONES DE SURFACE (PROSPECTION, RECONNAISSANCE)	▪ Motorisations électriques ▪ Drones terrestres ▪ Stations de remplissage gaz et cryogéniques terrestres automatiques.
CONSTRUCTION/HABITAT	
▪ Fabrication de matériaux de construction lunaire (base régolithe par ex) ▪ Construction et équipement d'habitats et abris lunaires (hangars, stockages) ▪ Logistique et robotique avancée.	▪ Construction et bâtiment (notamment environnements extrêmes : déserts, régions polaires, environnement sous-marin) : cimentiers, industriels de l'isolation, de l'étanchéité, réseaux électriques et fluides ▪ Architectes ▪ Logistique et robotique. ▪ Designers d'intérieur
SANTE	
▪ Télémédecine ▪ Equipement médical d'appoint ▪ Metavers de santé	▪ Télémédecine ▪ Conditions d'étude de la plasticité du vivant à appliquer à la problématique du vieillissement des populations et de l'émergence induite de maladies chroniques ▪ Appareils médicaux (échographes, défibrillateurs, respirateurs, syst. de monitoring, appareils d'analyse…) ▪ Extension terrestre de médicaments développés pour les astronautes
CONNECTIVITE	
▪ Objets connectés pour astronautes/infra Lunaire : communications, capteurs d'environnement, diagnostic médical/psycho, surveillance technique ▪ Réseaux de communication lunaires ▪ Stations Sol	▪ Objets connectés ▪ Réseaux locaux ▪ Réseaux terrestres
ALIMENTATION	
▪ Nourriture de synthèse ▪ Agriculture spatiale	▪ Biotechnologies, OGM ▪ Agriculture cellulaire (cellules souches->viande, poisson) ▪ Agriculture en envi contrôlé, hydroponie, aéroponie, cultures à bas niveau d'intrants ▪ Nouvelles sources de protéines pour pouvoir nourrir la planète et répondre aux enjeux démographiques (insectes, production par des organismes unicellulaires…). ▪ Optimisation des cultures par l'IA
IA	
▪ Assistants/compagnons de spationaute ▪ Optimiser utilisation ressources	▪ Développement d'assistants vocaux connectés à domicile

▪ Autonomie des systèmes ▪ Planification missions.	▪ Automatisation des tâches ▪ Autonomie des véhicules et des drones
ISRU	
▪ Prospection géologique lunaire ▪ Synthèse de carburants de véhicules spatiaux	▪ Prospection géologique ▪ Extraction minière des minéraux, métaux ▪ Industrie chimique
SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE	
▪ Panneaux solaires légers *(Thales Alenia)* 2,2 kg/m², 90 W/m² ▪ Panneaux solaires flexibles et déployables ▪ Cellules à hétérojonctions InGaP/AlGaAs/Si ▪ Cellules à concentration par lentilles	▪ Solaire PV à haut rendement *(Pérovskites, Tandem perovskites/SiC…)* ▪ Cellules à hétérojonctions InGaP/GeAs/Ge ▪ Cellules à colorants ▪ Electronique de puissance *(onduleurs…)*
BATTERIES	
▪ Batteries à haute densité d'énergie ▪ Batteries Li-CFX 500 Wh/kg ▪ Batteries de grande capacité	▪ Batteries à électrolyte solide haute performance (450 Wh/kg) ▪ Batteries à capacité accrue (Ah/kg) *(lithium-soufre, sodium-ion, magnésium-ion)* ▪ Batteries organiques ▪ Electronique de puissance *(GaN, SiC, Diamant…)*
PILES A COMBUSTIBLES ET AUTRES TECHNOLOGIES DE L'HYDROGENE	
▪ Piles à combustible PEM 2,5 kW - 4,5 kWh 10 kg H_2/O_2 (pour Mars) *(Prototech, Airbus DS, Air liquide)* Gestion aux basses températures ▪ Piles à combustible réversibles SOFC-SOEC ▪ Piles à combustilble régénérative ▪ Eléctrolyseurs	▪ Utilisation des piles à combustibles développées pour l'espace à des fins terrestres ▪ Rendement des installations de production d'hydrogène bas-carbone ▪ Piles à combustilble régénérative ▪ Eléctrolyseurs
TECHNOLOGIES NUCLEAIRES	
▪ Générateurs radioisotopiques *(Pu238, Am241…)* ▪ Réacteurs nucléaires 1-10 kWe (KRUSTY…) ▪ Réacteurs nucléaires 20 kWe-1 MWe ▪ Réacteurs de propulsion nucléothermique 100s MWth	▪ Générateurs radioisotopiques *(CIGEO…)* ▪ Réacteurs nucléaires
MATERIAUX	
▪ Matériaux composites (fibres de carbone, céramiques…) ▪ Polymères composites avec nanotubes de carbone ▪ Protection contre les débris spatiaux ▪ Réservoirs H_2, O_2 légers sous pression ▪ Réservoirs cryongéniques gonflables	▪ Matériaux composites (fibres de carbone, céramiques…) ▪ Réservoirs H_2, O_2… sous pression ▪ Reservoirs cryogéniques gonflables
SCIENCES ET INSTRUMENTATIONS NUCLEAIRES	
▪ Radioprotection ▪ LIBS ▪ Télescope à longue focale (50-100 m) pour l'astronomie à haute énergie (X-durs, gammas…) ▪ Sismomètrie pour la surveillance de la sismicité de la Lune et sa structure profonde ▪ Détecteurs d'ondes gravitationelles lunaires	▪ Radioprotection ▪ Specromètre LIBS ▪ Instrumentation géophysique de prospection des ressources ▪ Magnétomètres ▪ Imagerie (IR, visible, UV, X…) ▪ Analyses isotopiques ▪ Analyses par activation
AUTRES TECHNOLOGIES DE L'ENERGIE	
	▪ Simulation numérique des composants et des réseaux électriques ou multi vecteurs ▪ Gestion et pilotage des composants et réseaux ▪ Valorisation des pertes thermiques et des énergies fatales ▪ Stockage thermique ▪ Convergences d'usage pour une gestion optimisée (habitat-mobilité…)