



HAL
open science

Retourner sur la Lune pour y rester

Dimitri Chuard, Gregory de Temmerman, Jean-Baptiste Rudelle

► **To cite this version:**

Dimitri Chuard, Gregory de Temmerman, Jean-Baptiste Rudelle. Retourner sur la Lune pour y rester : Quels modèles économiques à l'appui du nouvel élan lunaire ?. [Rapport de recherche] Zenon Research. 2021. hal-03344792

HAL Id: hal-03344792

<https://hal.science/hal-03344792>

Submitted on 31 May 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

NOTE DE RECHERCHE

RETOURNER SUR LA LUNE POUR Y RESTER

Quels modèles économiques à
l'appui du nouvel élan lunaire ?

RETOURNER SUR LA LUNE POUR Y RESTER



Quels modèles économiques à l'appui du nouvel élan lunaire ?

Introduction

Depuis quelques années, la Lune fait l'objet d'un regain d'intérêt. Délaissée depuis 1972 et les dernières missions Apollo, elle est de nouveau au centre des projets d'exploration des grandes nations spatiales. Avec cette fois, des ambitions nouvelles : y aller pour y rester, et s'y établir dans la durée, mais aussi dans l'idée de préparer de futures missions habitées vers Mars.

En France, l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT) a récemment pris position en faveur d'un « engagement européen lisible et immédiat » dans les missions lunaires habitées à venir, répondant à deux enjeux principaux : d'une part, assurer une place à l'Europe dans le déploiement et la gouvernance des futures activités lunaires, d'autre part, mobiliser et dynamiser les écosystèmes scientifiques,

économiques et industriels européens, bien au-delà du seul secteur spatial¹.

L'ANRT propose de prendre appui sur les atouts de l'Europe pour définir une feuille de route coordonnée, inscrivant l'effort d'installation sur la Lune dans la durée, avec la perspective que les innovations développées pour la Lune bénéficient également à la Terre, et vice-versa. Comme le soulignent les auteurs de la note stratégique, la « démultiplication des défis offre l'opportunité de mobiliser les scientifiques et les innovateurs au-delà des usual suspects du spatial européen ».

Dans le cadre de son travail de prospective à long terme et d'exploration des opportunités de développement compatibles avec les limites planétaires, Zenon Research s'est intéressé à ce nouvel élan lunaire, notamment pour en éclairer les implications économiques. Car, plus qu'une opportunité, la mobilisation des acteurs économiques et industriels au-delà du seul secteur spatial est une nécessité pour inscrire un projet lunaire dans la durée.

En effet, du côté européen, l'Agence spatiale européenne (ESA) ne pourra pas mener seule un programme lunaire en parallèle de ses autres activités, ni même avec le renfort des agences spatiales nationales. Si ses moyens ont récemment été augmentés dans le cadre du plan de relance EU Next Generation jusqu'à atteindre 6,49 milliards d'euros en 2021, et si les deux agences spatiales nationales les mieux dotées, le CNES français et le DLR allemand, peuvent compter sur environ un milliard d'euros de fonds propres chacune, le budget spatial européen reste modeste, notamment en comparaison des 23,7 milliards de dollars (Md\$) annuels de la NASA.

Les missions d'exploration vers la Lune sont aujourd'hui sans intérêt pour les investisseurs privés, qui ont pourtant intégré de longue date d'autres secteurs de l'économie spatiale

dont la réalité du retour sur investissement est indéniable, à commencer par celui des satellites artificiels. Comment, dès lors, rendre la destination lunaire attractive en vue de mobiliser des capitaux privés aux côtés des fonds publics pour financer un retour sur la Lune ?

De la réponse à cette question dépend en partie l'ambition que se donneront les Européens en matière d'exploration spatiale. C'est dans cette perspective que Zenon Research a exploré les modèles économiques associés à l'élan lunaire européen.

Pour alimenter ce travail, Zenon Research a mobilisé les membres de l'ANRT lors d'une série d'ateliers collaboratifs entre janvier et avril 2021. Le présent rapport se situe donc à la rencontre de la vision des acteurs académiques et industriels français réunis au sein du groupe prospectif « Objectif Lune » de l'ANRT et de l'analyse technico-économique de Zenon Research. Il ne prétend pas dresser un inventaire exhaustif des modèles économiques possibles, mais plutôt d'en explorer les critères de succès afin d'aider à faire des choix clairs et argumentés pour établir la feuille de route lunaire européenne.

Si le secteur du tourisme spatial pourrait permettre l'implication immédiate d'acteurs privés, les autres modèles s'avèrent complexes et incertains. Leur développement nécessitera un fort soutien du secteur public.



PARTIE 1

Le tourisme et les besoins en infrastructures peuvent fournir les premiers éléments d'un modèle économique

A L'identification de potentialités économiques tirant parti des spécificités de la Lune doit être une priorité du projet lunaire européen

1. L'intérêt économique, jusqu'à présent secondaire dans les projets lunaires, est essentiel pour atteindre une masse critique

Vingt-sept astronautes, tous américains, ont atteint l'orbite de la Lune. Douze d'entre eux se sont posés à sa surface et y ont séjourné entre un et trois jours. Parmi eux, six se sont même éloignés de plusieurs kilomètres de leur site d'alunissage lors de sorties extravéhiculaires. Enfin, ils ont collecté et ramené sur Terre plus de 380 kg de roches lunaires. Mais malgré ces succès, **aucune mission habitée n'a plus atteint la Lune depuis 1972.**

Près de cinquante ans après la fin prématurée du programme Apollo, la volonté de retourner sur la Lune est plus forte que jamais.

Même si la date annoncée est probablement optimiste², les États-Unis prévoient leur retour à la surface en octobre 2024, avec la mission Artemis III. La Chine et la Russie ont annoncé un projet commun de station de recherche lunaire internationale. L'Europe, enfin, est partenaire du programme américain Artemis, pour lequel elle doit livrer plusieurs modules, et a porté la vision d'un « Moon Village » à l'horizon 2040-2050.

Les ambitions de ces différents projets reposent sur une combinaison d'intérêts géopolitiques, scientifiques, militaires, économiques et commerciaux. La compétition géopolitique reste centrale aujourd'hui comme hier, avec un enjeu nouveau : le retour sur la Lune est désormais souvent pensé comme une première étape vers Mars. Dans tous les cas, les motivations économiques et commerciales restent secondaires.

Si des retombées économiques sont espérées, a minima dans une perspective keynésienne d'investissement public, il faut admettre que **les projets d'exploration spatiale ne répondent pas à un besoin économique direct.** Le programme Apollo en est un parfait exemple : succès géopolitique indéniable pour les États-Unis, il a nécessité un investissement public exceptionnel. En 1965 et 1966, le budget de la NASA représentait à lui seul plus de 4 % du budget fédéral. Le coût total du programme Apollo, corrigé de l'inflation, se monte ainsi à plus de 250 milliards de dollars, si bien qu'un tel effort n'a pas pu être maintenu dans la durée une fois la course à la Lune remportée. Par conséquent, pour aller au-delà d'un retour symbolique et ponctuel sur la Lune, et pour y pérenniser une présence humaine, comme le défend l'ANRT dans sa note stratégique, il faudra actionner autant de leviers que possible, y compris économiques et commerciaux. **La recherche de modèles économiques est donc centrale pour la pérennité du projet**

Par la suite, d'autres modèles d'affaires, notamment commerciaux, seront nécessaires pour tendre vers une « économie lunaire » autosuffisante à même de pérenniser les activités lunaires.

lunaire européen.

On distinguera ici deux types de modèles économiques. **Les modèles économiques directs** correspondent à des activités qui se développeraient autour des spécificités de notre satellite et pourraient constituer un marché. Innovants, potentiellement prometteurs, mais incertains, **ces modèles économiques sont conditionnés au retour sur la Lune et pourraient, à ce titre, en justifier l'exploration.** Ils relèvent d'investissements risqués.

Les **modèles économiques dérivés** visent à répondre aux besoins des précédents, ainsi que des projets lunaires à visée non économique, comme les bases scientifiques. Ils sont notamment liés aux besoins en infrastructures : habitats, véhicules, énergie, etc. Ils se situent dans la continuité des modèles d'affaires actuels de l'industrie spatiale, tablant sur des retombées économiques plus ou moins directes. Cependant, **les défis posés par un retour sur la Lune étant particulièrement complexes, de nombreuses filières industrielles peuvent être impliquées au-delà du secteur spatial traditionnel,** par exemple dans les domaines des matériaux, de l'énergie, des biotechnologies ou de la gestion de l'eau. Ces industries ne seront pas



Messages clés

Pour aller au-delà d'un retour symbolique et ponctuel sur la Lune et inscrire les nouveaux programmes lunaires dans la durée, il est nécessaire d'actionner autant de leviers que possible, c'est-à-dire y compris économiques et commerciaux.

Les besoins en infrastructures et en services des activités lunaires, notamment scientifiques, seront une première occasion de mobiliser le monde socio-économique. Cette mobilisation doit se faire bien au-delà de la seule filière spatiale, dans une logique de co-investissement et d'innovation, et non pas seulement de fourniture de service.

Par la suite, d'autres modèles d'affaires, notamment commerciaux, seront nécessaires pour tendre vers une « économie lunaire » autosuffisante à même de pérenniser les activités lunaires.

Si le secteur du tourisme spatial pourrait permettre l'implication immédiate d'acteurs privés, les autres modèles s'avèrent complexes et incertains. Leur développement nécessitera un fort soutien du secteur public.



seulement des fournisseurs, dans une logique de consommation de budgets publics, mais aussi des investisseurs. En effet, les produits et services développés en vue de servir des projets lunaires peuvent trouver d'autres débouchés sur Terre. Les sommes colossales investies dans la R&D du projet Apollo ont par exemple eu des retombées bien au-delà d'un simple effet de multiplicateur keynésien. Un exemple souvent cité est la miniaturisation à marche forcée des ordinateurs, qui a contribué à l'essor de ce qui est devenu la Silicon Valley³. Le retour sur investissement ainsi généré a grandement contribué à l'économie américaine, alors même que le programme Apollo n'était pas directement motivé par un enjeu économique.

Ces deux types de modèles sont complémentaires. Leur bonne articulation, d'une part, et les volumes totaux d'investissements alloués d'autre part, conditionneront en partie le succès et la pérennité du projet lunaire européen.

2. La recherche de modèles économiques réalistes doit être une priorité du projet lunaire européen

L'identification de modèles économiques directs doit s'appuyer sur les spécificités de la Lune, notamment afin de déterminer en quoi, pour un problème donné, une solution lunaire présente un avantage sur les solutions existantes, sur Terre ou en orbite basse.

Les caractéristiques physiques de notre satellite permettent de considérer une grande diversité d'applications économiques. Par exemple, le fait que la Terre et la Lune soient séparées de 384 000 kilomètres en moyenne, soit deux à quatre jours de trajet, peut conduire à imaginer des vols touristiques, étant donné le temps de trajet raisonnable

(ce que ne permet pas la planète Mars par exemple), tandis que le fait que la Lune soit environ quatre fois plus petite que la Terre peut suggérer d'y construire une infrastructure de lancement de fusées tirant parti de sa gravité six fois plus faible que celle de la Terre.

Parmi les spécificités de la Lune qui pourraient être exploitées par des modèles directs, l'extraction de matières premières difficiles à trouver sur Terre est régulièrement citée. **Plusieurs missions lunaires gouvernementales trouvent ainsi une justification dans l'exploitation potentielle de l'hélium 3**, un isotope léger de l'hélium quasiment absent sur notre planète mais implanté à la surface de Lune par le vent solaire. Cet hélium 3 pourrait être utilisé dans des réactions de fusion nucléaire pour répondre aux besoins énergétiques sur Terre.

Une tonne d'hélium 3 est équivalente à environ 100 millions de barils de pétrole, ce qui permet d'estimer la valeur théorique de l'hélium 3 à plusieurs milliards de dollars la tonne⁴. Toutefois, la concentration en hélium 3 des roches lunaires est à relativiser : elle est estimée à quelques dizaines de microgrammes par mètre cube de régolithe* dans les mers basaltiques⁵, ce qui représente certes une quantité importante rapportée à l'ensemble de la Lune, mais reste extrêmement faible en comparaison des gisements exploités sur Terre.

La concentration en hélium 3 des roches lunaires est à relativiser : elle reste extrêmement faible en comparaison des gisements exploités sur Terre.

La teneur moyenne des gisements de cuivre est en effet de l'ordre de 1%, tandis que, pour les platinoïdes, beaucoup moins abondants, on trouve par exemple des teneurs de l'ordre de 5 à 500 ppm dans le complexe du Bushveld, en Afrique du Sud. La concentration en hélium 3 lunaire (0,02 ppm) est 250 à 25 000 fois plus faible, et donc plutôt à rapprocher des abondances naturelles de l'or et du platine dans la croûte terrestre, hors de tout gisement.

Par conséquent, on imagine la difficulté des procédés d'extraction qui seraient nécessaires pour l'exploiter. D'autre part, **la possibilité technique de réacteurs de fusion de deuxième ou troisième génération capables d'exploiter l'hélium 3 est loin d'être démontrée. Leur existence semble donc très peu probable d'ici la fin du siècle**, ce qui relativise fortement la valeur de la ressource lunaire⁴.

Les difficultés techniques et économiques à surmonter sont encore très nombreuses, d'autant que la fusion de l'hélium 3 fait l'objet d'un très faible intérêt dans le monde académique. Il est donc tout à fait possible que la fusion de première génération à base de deutérium et de tritium, que cherchent à démonter le projet ITER et un florilège d'initiatives privées⁶, soit une source d'énergie concurrente, suffisamment attractive et abondante pour repousser très loin dans le temps la nécessité de développer une nouvelle génération de réacteurs fonctionnant à l'hélium 3.

L'exemple de l'hélium 3 confirme le diagnostic du Science & Technology Policy Institute (STPI) américain qui, dans un récent rapport, appelle les décideurs publics à **faire**

* Le régolithe est la couche de roches et de poussières produites par les impacts de météorites qui couvre la surface de la Lune sur une épaisseur de plusieurs mètres.



preuve de vigilance face à des projections excessivement optimistes, et à réserver les financements aux missions scientifiques, aux vols habités et aux secteurs où le soutien public peut permettre d'atteindre la viabilité commerciale⁷.

L'échec de l'entreprise Planetary Resources, qui visait l'exploitation des ressources des astéroïdes et qui a fait perdre 12 millions d'euros d'argent public à l'État luxembourgeois⁸, rappelle la nécessité d'une **évaluation préalable de la viabilité des projets associée à une bonne appréciation du risque** lié aux investissements publics.

B Le tourisme et les besoins en infrastructures représentent de premiers leviers économiques à court-moyen terme

1. Le tourisme lunaire est le secteur le plus mature et le plus propice à des retombées économiques directes

Le tourisme lunaire apparaît comme le modèle économique le plus proche de la viabilité commerciale dans le cadre du retour sur la Lune. En effet, les technologies de vol habités sont pour la plupart déjà disponibles, et celles à venir pourront compter sur des transferts de technologie avec les

programmes gouvernementaux développés pour les astronautes professionnels. De plus, le marché du tourisme, s'il n'a pas encore atteint la Lune, intègre déjà l'orbite terrestre basse puisque sept touristes ont volé à bord de la station spatiale internationale (ISS) entre 2001 et 2009. L'arrivée de nouveaux moyens d'accès à l'ISS, notamment le Crew Dragon de SpaceX, va d'ailleurs permettre le retour des touristes en orbite basse dès cette année après douze ans d'interruption.

À terme, le développement d'un second véhicule côté américain laisse présager un fort développement des activités touristiques en orbite basse, avec des missions commerciales dédiées Axiom et une politique de rentabilisation des places désormais vacantes sur Soyouz côté russe. Le tourisme suborbital, récemment mis à la une de l'actualité par Virgin Galactic et Blue Origin, mais porté aussi par des start-ups comme la française Zephalto, devrait également se développer et pourrait constituer une porte d'entrée vers des expériences plus lointaines.

Le succès du tourisme lunaire repose d'ailleurs probablement sur le développement préalable du tourisme en orbite basse, qui peut à la fois offrir la preuve de la fiabilité des séjours touristiques spatiaux et amorcer la constitution d'un marché touristique de luxe. À terme cependant, un voyage vers la Lune pourrait offrir une expérience plus complète qu'un vol sur l'ISS, pour un coût et une durée proches. Son attractivité pourrait donc être supérieure à celle d'un vol orbital et représenter une opportunité unique de diversification du portefeuille de produits touristiques liés à l'espace. Si les activités en gravité réduite à la surface de la Lune pourraient représenter l'essentiel du potentiel touristique de la destination, elles impliquent un saut de complexité très important. **Dans un premier temps, il sera possible de contourner cette difficulté en proposant des vols touristiques**

se bornant à un survol de la Lune sans séjour à la surface, de type Apollo 8. La complexité des opérations et des infrastructures nécessaires serait alors significativement diminuée. D'une durée de six jours, soit moins qu'un séjour à bord de l'ISS, de tels séjours circumlunaires limiteraient également fortement les conséquences négatives de la microgravité sur la santé et le confort des voyageurs.

Jusqu'à ce jour, tous les touristes de l'espace ont acheté leur billet auprès de Space Adventures, une entreprise américaine assurant le rôle de tour-opérateur. Pour environ 50 millions de dollars, la prestation comprend une année de préparation, dont plusieurs mois à la Cité des étoiles en Russie, le trajet aller-retour à bord d'un vaisseau russe Soyouz et un séjour d'une dizaine de jours à bord de l'ISS. **Avec le temps exigé et la part de risque personnel, le prix très élevé restreint évidemment la demande**, puisque cela représente encore près d'une centaine de fois le prix d'un séjour de même durée dans la suite hôtelière la plus chère du monde.

Pour aller au-delà d'un retour symbolique et ponctuel sur la Lune et inscrire les nouveaux programmes lunaires dans la durée, il est nécessaire d'actionner autant de leviers que possible, c'est-à-dire y compris économiques et commerciaux.



En supposant que les candidats au voyage acceptent de consacrer jusqu'à 10 % de leur fortune à un tel projet, comme l'a fait Dennis Tito en 2001, et d'après les chiffres du *World Ultra Wealth Report 2020* et du classement Forbes, nous estimons qu'au plus 7500 personnes dans le monde pourraient s'offrir un séjour de ce type. Le marché réel est évidemment beaucoup plus réduit, notamment parce qu'au-delà des considérations économiques, la longue préparation et le niveau de condition physique exigés limitent le nombre de clients potentiels. Plusieurs candidats au séjour en orbite basse ont ainsi dû renoncer pour raisons de santé. Il ne s'agit pour autant pas de critères rédhibitoires comme le montre l'engouement pour le tourisme qualifié d'aventure ou extrême, symbolisé par les embouteillages sur le mont Everest. Un marché assurantiel dédié pourrait d'ailleurs voir le jour pour couvrir les risques spécifiques aux séjours touristiques spatiaux.

D'après Elon Musk, qui a déjà vendu un premier vol circumlunaire au milliardaire japonais Yusaku Maezawa pour 2023, le prix du ticket vers la Lune pourrait être « comparable » à celui d'un vol sur l'ISS⁹. Space Adventures, qui propose la destination Lune en une de son site internet, vendrait quant à elle le ticket à 150 M\$¹⁰. **Le coût d'un vol circumlunaire reste donc proche**

Une dernière limite vient du fait que le tourisme spatial souffre d'un problème d'image. Il soulève de vives critiques sur les plans éthiques et environnementaux.

de celui d'un séjour en orbite basse. Inclure un alunissage ferait en revanche exploser le prix du vol, The Golden Spike Company annonçant un ticket à 750 M\$¹¹. Il en découle que le marché adressable serait dix à quarante fois plus petit pour un séjour avec alunissage que pour un simple survol circumlunaire.

Ces coûts pourraient diminuer à mesure que les coûts d'accès à l'espace, et donc potentiellement à la Lune, vont baisser. En effet, alors que les coûts de lancement ont longtemps stagné autour de 10 000 dollars pour envoyer un kilogramme de charge utile en orbite basse, la fusée Falcon 9 de SpaceX permet désormais d'atteindre un coût d'environ 3000 dollars par kilogramme. Le futur lanceur Starship pourrait permettre de diviser encore ce chiffre par deux¹². Les capacités de lancement vers l'orbite lunaire étant environ 2,5 fois plus faibles que celles en orbite basse pour un lanceur donné, les chiffres présentés ici sont à multiplier par ce même facteur pour estimer les coûts de lancement vers la Lune.

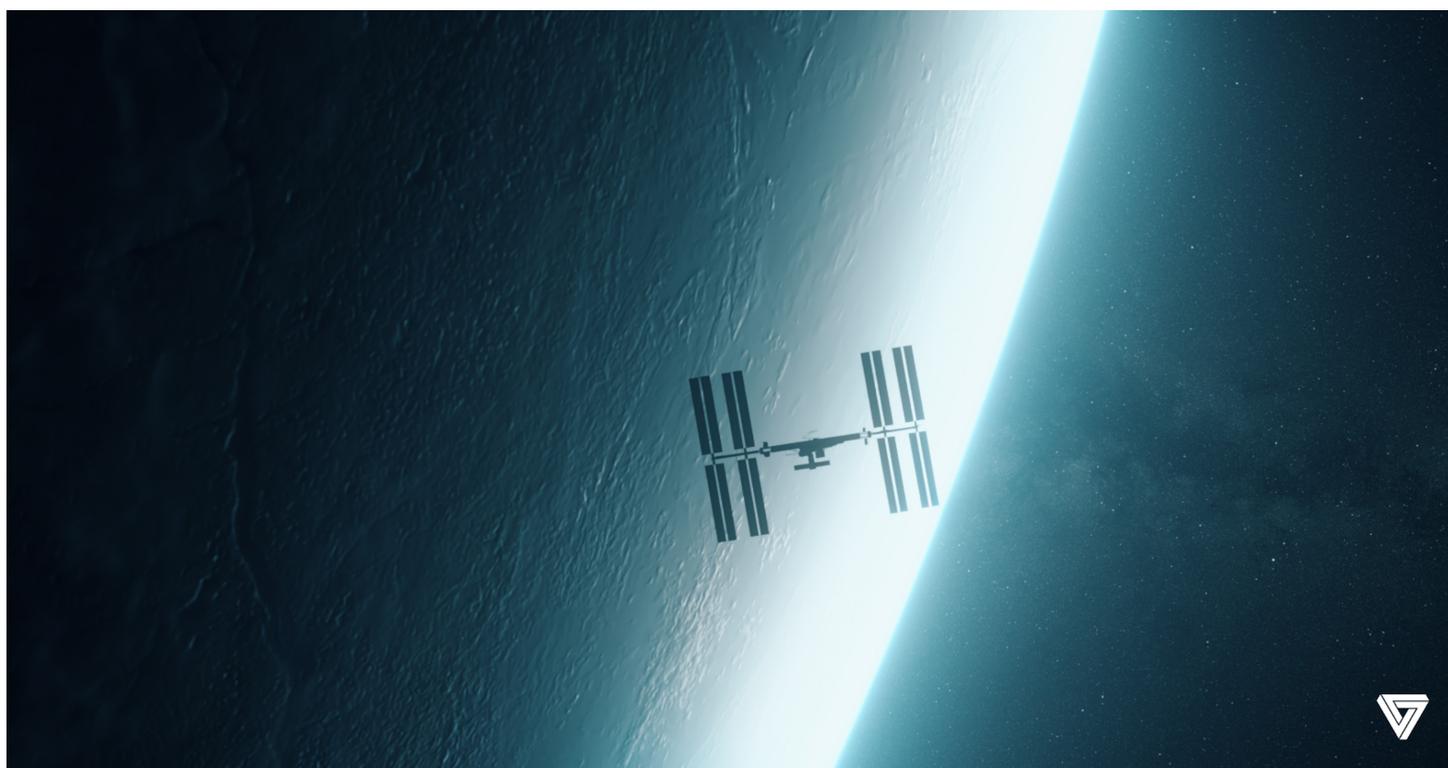
Pour autant, même si le coût des missions spatiales diminue et si le nombre de particuliers ultra-fortunés progresse fortement (+9,5 % en 2019), **le tourisme spatial, a fortiori lunaire, restera un marché d'ultra-niche.** La réussite économique du secteur peut cependant s'envisager et s'apprécier avec un marché adressable très réduit, dans la mesure où le nombre de places pouvant être proposé sera de toute façon très limité. De plus, pour une entreprise qui investirait dans un tel projet, la création de valeur toucherait aussi la marque, à la fois pour les autres produits et pour la constitution d'une valeur de référence sur un marché futur ; autant d'éléments de nature à susciter l'intérêt d'investisseurs, dans le cadre de levées de fonds. Le tourisme spatial est ainsi la porte d'accès aux ressources financières d'acteurs spécialisés dans cette industrie, susceptibles de prendre des positions dans

des entreprises cherchant à augmenter leur capital et « vendant » littéralement la Lune à leurs investisseurs. Du côté des acteurs financiers, des fonds spécialisés, notamment dans le *Private Equity* (capital investissement), seraient également mobilisables. Autant d'acteurs capables de prendre une part de risque, et d'assumer parfaitement la création de valeur d'une opération apparemment à perte.

Une dernière limite vient du fait que **le tourisme spatial souffre d'un problème d'image**¹³. Il soulève de vives critiques sur les plans éthiques et environnementaux¹⁴. Réservé à un nombre très réduit de clients fortunés, il implique un impact carbone individuel très au-delà des objectifs climatiques. Ainsi, il est estimé qu'un vol de Starship libèrera 3800 tonnes CO₂e¹⁵, alors que la Stratégie Nationale Bas Carbone française prévoit par exemple de limiter les émissions à 2 tonnes CO₂e par habitant et par an d'ici 2050. Mais cette dimension doit être tout autant prise en compte que relativisée. En effet, si un mouvement comme le « *flygskam* » (honte de prendre l'avion, en suédois) ou les

polémiques autour de la chasse aux trophées ont un retentissement médiatique important, leur impact économique sur la demande reste encore très modeste à ce jour.

En résumé, les barrières à l'entrée sont plus faibles pour le marché du tourisme lunaire que pour la plupart des autres modèles économiques étudiés. **Il est donc primordial que l'Europe s'interroge sur sa stratégie dans ce secteur**, notamment en pesant son poids potentiel vis-à-vis de ses objectifs éthiques et environnementaux. Si elle décidait de prendre position en faveur du tourisme lunaire, elle devrait le faire sans tarder étant donné l'avantage concurrentiel dont disposent déjà les acteurs américains, en installant des mécanismes de soutien et un cadre juridique favorable, comme l'a fait par exemple le Luxembourg dans le domaine de l'exploitation des ressources spatiales.



2. Même principalement à but scientifique ou géopolitique, le projet lunaire européen aura un fort potentiel économique lié aux infrastructures

Comme l'écrit l'ANRT dans sa note stratégique, « mobiliser les forces créatrices de nos entreprises et de nos start-ups sur ces nouveaux défis permettra d'offrir au tissu industriel mobilisé un nouveau potentiel de développement ». En effet, **un projet lunaire, même d'abord pensé dans un but de recherche scientifique ou d'influence géopolitique, a nécessairement des implications économiques**, en tout premier lieu en raison des besoins en infrastructures. Par exemple, la construction d'installations scientifiques, telles qu'un radiotélescope dédié aux basses fréquences inaccessibles depuis la Terre (< 30 MHz) ou une base habitée abritant des expériences biomédicales, généreront des besoins en infrastructures et en services très variés : terrassement, alimentation énergétique, ravitaillements, stockage et transferts de données, véhicules, plateformes de lancement, habitats, routes, réseaux, etc. Selon une étude Delphi récente, un avant-poste lunaire pourrait ainsi nécessiter dix fois la puissance électrique de la station spatiale internationale, en cas d'utilisation de ressources in situ¹⁶.

Fournis par des acteurs industriels, les infrastructures et les services supports des activités scientifiques sont un puissant moteur pour générer un retour sur investissement. En effet, **répondre à ces besoins dans les conditions hostiles de l'environnement lunaire** (abrasivité et nature électrostatique du régolithe, absence d'atmosphère, températures extrêmes, radiations, etc.) représente un immense levier d'innovation technologique.

Un projet de l'ampleur du retour sur la Lune va ainsi bien au-delà d'une stricte logique de réponse aux appels d'offre et d'investissement industriel. En effet, **fournir les infrastructures nécessaires aux premières missions de retour sur la Lune représente une opportunité d'établir des leaderships technologiques** sur certains secteurs, offrant un avantage concurrentiel à l'Europe dans la suite du développement des activités lunaires. Les possibilités d'innovations managériales associées³, ainsi que l'impact pour les marques, notamment dans leur attrait auprès des talents de demain, viennent compléter la palette de retours sur investissement possibles.

Dans le cadre d'un contrat de l'Agence spatiale italienne, Thales Alenia Space explore déjà seize projets nécessaires au retour sur la Lune, comme la mise en place d'un data center capable de réduire les délais de latence dus à la distance Terre-Lune, qui sont incompatibles avec les standards actuels en VoIP¹⁷, ou encore la conception d'habitats pressurisés, de moyens de transport et d'une installation énergétique¹⁸. La construction d'une plateforme d'atterrissage et de lancement est également envisagée afin d'éviter la formation de cratères et la dispersion de poussières lunaires¹⁹.

Fournir les infrastructures nécessaires aux premières missions de retour sur la Lune représente une opportunité d'établir des leaderships technologiques sur certains secteurs, offrant un avantage concurrentiel à l'Europe.

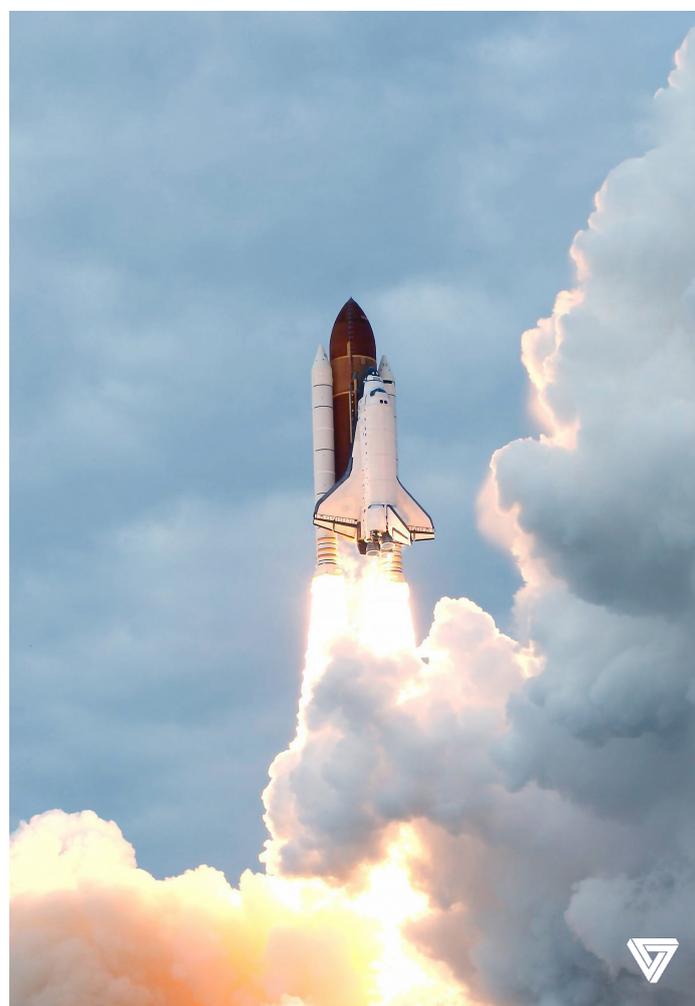
Alors que la mise en place d'un service de communication et de navigation lunaire est à l'agenda de l'Agence spatiale européenne avec le programme Moonlight, la NASA a choisi de faire appel au groupe Nokia pour mettre en place un réseau de téléphonie mobile sur la Lune²⁰. Côté européen, la jeune pousse allemande PTS a proposé de mettre en place un réseau de télécommunications lunaire avec le soutien de Vodafone, et développé un concept de rover en partenariat avec le constructeur automobile Audi²¹.

Ces exemples montrent que **la mobilisation des acteurs économiques n'est pas limitée au secteur spatial traditionnel**. Au contraire, il est nécessaire d'inclure tous les acteurs économiques à même de répondre aux défis lunaires, quelle que soit leur taille, des startups aux groupes transnationaux, en passant par des PME et ETI à la frontière technologique.

La France possède de nombreux atouts à faire valoir de ce point de vue et, sur certains segments de R&D, ses grands groupes sont capables d'endosser des positions de co-investisseurs et non pas seulement de fournisseurs, que ce soit au niveau des solutions énergétiques (EDF, Engie, Orano, CEA, Naval Group, TotalEnergies, BRGM...), de la cryogénie (Air Liquide), des mobilités (Renault, Stellantis, Michelin...), de la construction (Vinci, Bouygues, Saint-Gobain...), des télécommunications (Orange, Bouygues...), de la gestion des déchets (Suez, Veolia, Andra...), mais aussi de l'alimentation (Danone, INRAE, Ifremer...).

L'implication des acteurs industriels privés pourrait être encouragée par la **signature d'un accord de partenariat fédérant plusieurs pays autour d'une stratégie de long terme partagée**, visant à mutualiser les coûts et à garantir un accès partagé aux infrastructures lunaires. L'Europe, de par son organisation politique, est idéalement placée pour tenter de faire émerger cette vision commune.

Les besoins en infrastructures et en services représentent aussi une opportunité **d'augmenter les volumes d'achat pour le secteur spatial**, ce qui est un levier important pour en garantir la compétitivité internationale. Il y a par exemple un fort enjeu pour soutenir la filière des lanceurs européens, notamment sur le marché en perte de vitesse des gros satellites, à condition d'établir une préférence européenne²². Enfin, la diversité des besoins donne l'opportunité de faire appel à des budgets, en particulier publics, autres que ceux explicitement affectés au spatial. Rappelons ici que la NASA n'est que l'une des agences fédérales qui financent ce domaine, et qu'à son budget propre de 27 milliards s'ajoutent une vingtaine de milliards de dollars au titre d'autres programmes, dont l'espace n'est pas le sujet mais pour lesquels il a une valeur instrumentale. Le développement d'infrastructures lunaires pourrait présenter un fort intérêt pour de tels programmes.



PARTIE 2

Un soutien public fort est nécessaire pour encourager le développement des activités commerciales et la recherche de modèles économiques pouvant s'autofinancer à terme



A Augmenter la quantité d'argent disponible pour les projets lunaires passe par un soutien public fort pouvant être dopé par des mécanismes innovants

1. Complexes et incertains, les projets lunaires auront besoin d'un important soutien public

Pour aller au-delà des premières missions de retour sur la Lune, pour lesquelles les motivations inspirationnelles et géopolitiques peuvent suffire, une incitation économique forte sera indispensable. En effet, après un important effort de construction, opérer la Station spatiale internationale en orbite basse coûte encore aujourd'hui environ 5 Md\$ par an. Si cette charge est acceptable pour les États-Unis et la Russie, principaux financeurs, ils cherchent toutefois à en réduire la portée par le développement d'activités commerciales en orbite.

Dans le cadre du retour sur la Lune, si une collaboration internationale émergeait, il est possible d'imaginer qu'un budget d'une ampleur comparable pourra être consacré annuellement aux activités lunaires. En revanche, **si le budget nécessaire devait être très supérieur, il est à craindre que la pérennité du retour sur la Lune soit remise en cause** comme l'ont été les missions Apollo après 1972. D'autre part, en l'absence de collaboration internationale, l'Europe ne pourrait pas assurer seule un tel niveau d'engagement, le budget annuel de l'ESA s'élevant, tous programmes confondus, à 6,49 milliards d'euros en 2021. En résumé, pour reprendre les mots du responsable du programme Constellation de la NASA en 2009, « les technologies dont on a besoin pour retourner sur la Lune sont largement maîtrisées. S'il y a un défi, c'est un défi fiscal – la quantité d'argent que la nation peut se permettre de dépenser »²¹.

Pour pallier un possible manque de financements publics, l'implication d'acteurs privés est donc indispensable. Cependant, **beaucoup de segments de l'économie spatiale sont encore jugés trop risqués** par les investisseurs privés, notamment en raison de l'importance des besoins en capitaux initiaux, de la faible maturité des marchés et des incertitudes technologiques et réglementaires²³.

À court terme, en raison de ces obstacles, l'initiative privée restera probablement limitée à quelques niches comme le tourisme. Pour contourner les barrières à l'entrée et faire émerger d'autres modèles d'affaires centrés sur la Lune, une **forte impulsion publique initiale sera nécessaire**. En effet, comme la rappelle une enquête de la Banque européenne d'investissement (BEI) auprès de plus de quarante entreprises du secteur spatial, **les financements publics sont essentiels car ils sont souvent les seuls mobilisables pour les startups dans**

les phases amont, ainsi qu'un important gage auprès des investisseurs privés pour mobiliser du capital-risque lors du scale-up²³. D'ailleurs, aujourd'hui encore, y compris avec l'émergence des acteurs du New Space, l'économie spatiale reste financée pour moitié par de l'argent public, dont 60 % proviennent des seuls États-Unis⁷.

En premier lieu, des appels d'offre et des appels à projets doivent amorcer la demande, en suivant la recommandation de la BEI d'être **technology agnostic, c'est-à-dire de commander un service final, et non pas une technologie en particulier**. La BEI rappelle également la nécessité de définir **les projets en termes d'indicateurs clés de performance**.

Des dispositifs complémentaires innovants peuvent être mis en place, notamment pour encourager l'innovation et la création de startups, comme le fait le CNES avec TechTheMoon, présenté comme « le premier incubateur lunaire au monde ». Des concours tels que le Google Lunar X-Prize, lancé en 2007, et qui promettait 20 millions de dollars à la première équipe qui parviendrait à envoyer un robot sur la Lune, capable de parcourir 500 mètres et de réaliser des photos et des vidéos en haute définition, sont aussi un excellent moyen d'encourager la création de nombreuses start-ups et de faire émerger des propositions parfois très originales²¹.

Pour contourner les barrières à l'entrée et faire émerger d'autres modèles d'affaires centrés sur la Lune, une forte impulsion publique initiale sera nécessaire.



L'accès à la Lune pourra aussi permettre des transferts de technologie, en fournissant de nouvelles applications à des projets de R&D déjà en partie ou totalement financés. Des synergies peuvent naître en particulier avec les travaux liés à la transition énergétique, qu'il s'agisse du bouclage des cycles écologiques en lien avec les villes du futur, des systèmes énergétiques ou de la recherche sur des matériaux innovants.

La Lune présente enfin un **intérêt pour des activités de R&D** en raison des conditions très particulières qu'elle offre. La microgravité peut ainsi intéresser les recherches en matériaux et en mécanique des fluides²⁴, tandis que l'absence de biodiversité à protéger sur la Lune ouvre la porte à des expérimentations en biotechnologies par exemple.

2. La recherche de mécanismes de financement innovants peut permettre d'accroître les moyens publics affectés au retour sur la Lune

Afin de financer le projet lunaire européen et, en particulier, les infrastructures nécessaires à l'émergence des activités présentant des retours sur investissement à même d'intéresser les acteurs privés, plusieurs mécanismes innovants peuvent être considérés. Il a par exemple été proposé que la **Banque européenne d'investissement émette des obligations pour financer le développement du New Space**^{25,26}. Les émissions obligataires sont un instrument financier qui garantit un revenu fixe aux investisseurs notamment utilisé pour le financement de la transition énergétique (*green bonds*). Un récent rapport rappelle ainsi comment la ville de San Francisco et cinq autres comtés environnants avaient émis des obligations pour financer le

Golden Gate, dans le contexte de la Grande Dépression. Les obligations étaient garanties pour une durée de quarante ans grâce au péage installé sur le pont. Les souscriptions avaient alors été dopées par la perspective du fort développement économique permis par cette construction.

Sous réserve de conformité avec le droit spatial, **la mise en place d'un système de concessions pourrait également favoriser la création d'infrastructures**. Cela a été le cas historiquement, notamment à la fin du dix-neuvième siècle et au début du vingtième, avec la course à l'obtention des grandes concessions portuaires et ferroviaires et la construction du canal de Suez²⁷. La concession permet de mobiliser des compétences et des capitaux au service de l'intérêt général et à moindre coût pour la sphère publique. L'enthousiasme généré par la construction du canal de Suez, symbole du progrès technique, a ainsi permis que la majorité des capitaux de la Compagnie du canal de Suez soit apportée par des petits porteurs français. Dans le même esprit, **une large souscription européenne pourrait être organisée**, sur le modèle du financement de l'Expédition antarctique et du Fonds de la recherche scientifique en Belgique.

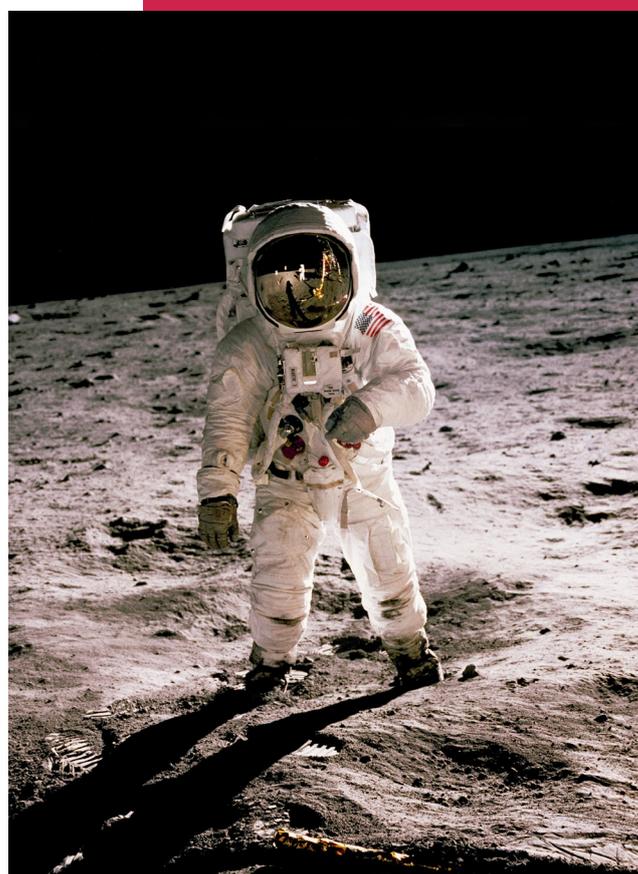
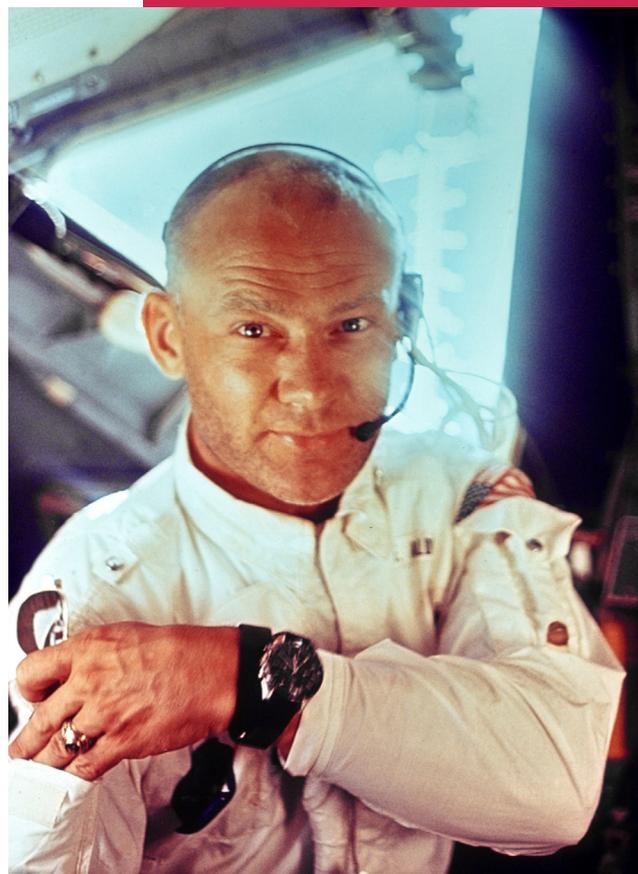
Obligations, concessions et souscriptions n'auront toutefois un intérêt que si des modèles économiques viables émergent. L'exploitation des ressources, en proposant l'établissement d'un marché boursier des matières premières spatiales et dont la demande pourrait être amorcée par la constitution de réserves stratégiques, est une option évoquée en ce sens²⁶.

Des mécanismes de financement plus originaux ont également été proposés, comme la création d'une « space bank » qui aurait la capacité d'émettre de la « space money » dédiée au financement et au développement des activités spatiales²⁸. Une

dernière possibilité régulièrement évoquée consiste à vendre des titres de propriété lunaires. En disposant que « l'espace extra-atmosphérique, y compris la Lune et les autres corps célestes, ne peut faire l'objet d'appropriation nationale par proclamation de souveraineté, ni par voie d'utilisation ou d'occupation, ni par aucun autre moyen »²⁹, le Traité de l'espace de 1967 a créé une ambiguïté dont ce modèle d'affaires pourrait profiter. La formulation retenue, « appropriation *nationale* », est en effet sujette à interprétation quant à savoir si l'interdiction concerne seulement les États ou également les acteurs privés³⁰.

Le traité de 1967, comme le Traité sur la Lune de 1979 qui n'a jamais été ratifié par les grandes puissances spatiales, est né de la guerre froide et visait à empêcher toute appropriation par les États-Unis ou l'URSS. Dans le contexte actuel, des interprétations plus libérales se font jour, notamment en vue d'encourager l'investissement privé. Les États-Unis ont ainsi voté une loi en 2015 autorisant les entreprises privées à forer des corps célestes pour en extraire les matières premières, et les commercialiser. En Europe, le Luxembourg a suivi avec la loi du 20 juillet 2017 qui énonce clairement, dans son article premier, que « les ressources de l'espace sont susceptibles d'appropriation ». Aux États-Unis, des organismes tels que le Space Settlement Institute proposent d'aller encore plus loin en appelant à voter une loi reconnaissant les revendications territoriales privées sur la Lune³¹.

En pratique toutefois, **dans le but de générer un retour sur investissement, la vente des terrains lunaires ne présente un intérêt que si les terrains deviennent effectivement accessibles**, c'est-à-dire si un moyen de transport fiable et régulier est disponible. Le retour planifié d'astronautes sur la Lune, aidé par la diffusion de logiques low-cost dans l'industrie spatiale, pourrait être une première



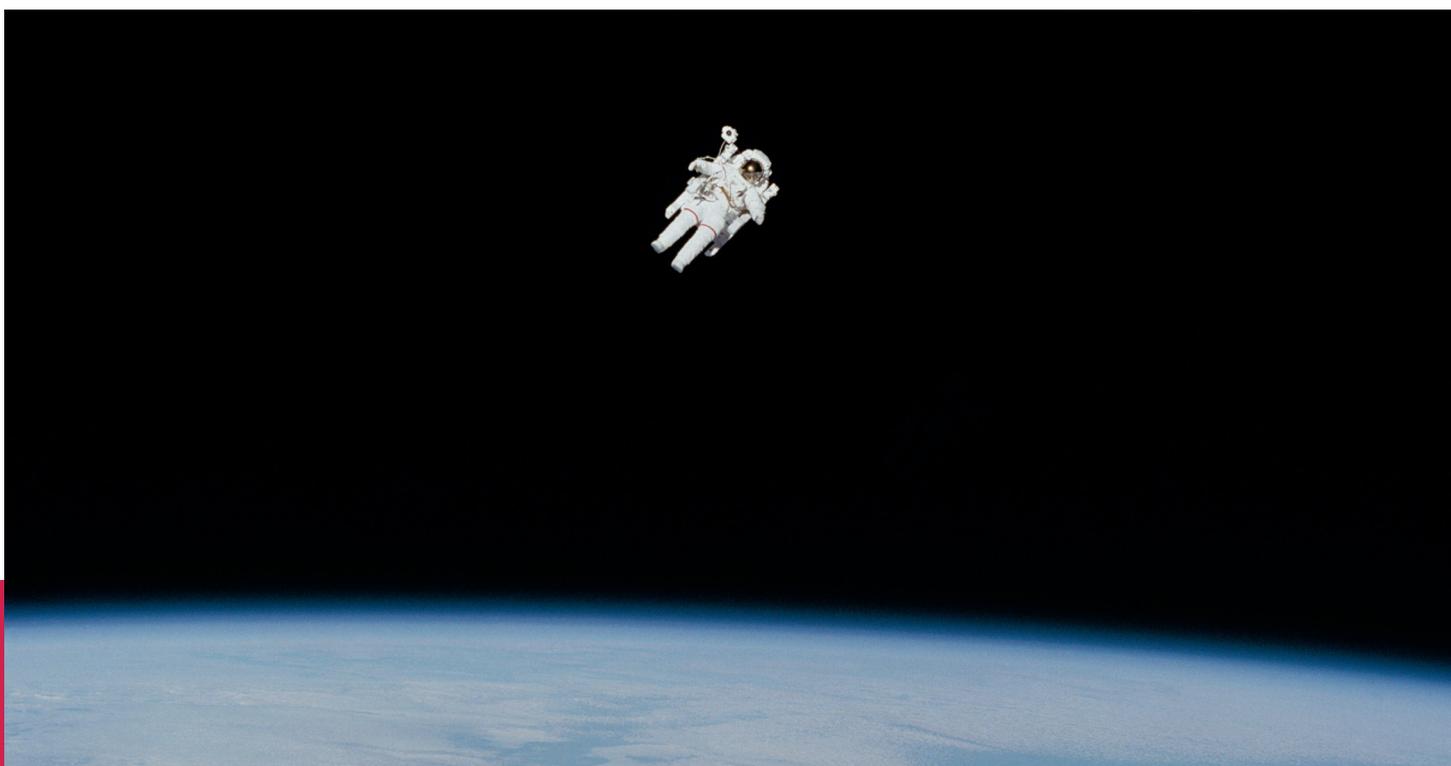
étape en ce sens. À terme, la mise en vente de terrains lunaires pourrait donc être envisagée moyennant une révision du droit de l'espace, ce qui nécessiterait une forte coordination internationale.

Si cette coordination internationale semble pour le moins lointaine, elle est pourtant cruciale, non seulement pour garantir la légalité du processus, mais aussi pour formaliser un engagement à long terme dans les activités lunaires, et ainsi donner une garantie claire aux investisseurs potentiels. Dès lors, différents modèles économiques pourraient être envisagés comme l'établissement d'un droit de passage, l'indexation de la valeur sur le potentiel en ressources du terrain ou sur son potentiel d'utilisation. De plus, une reconnaissance juridique large des titres immobiliers lunaires, c'est-à-dire non limitée à quelques États comme le Luxembourg et les États-Unis, pourrait encourager l'émergence d'un marché secondaire.

B Encourager les activités commerciales et la recherche d'autres modèles économiques pour tendre vers une « économie lunaire » autosuffisante

1. Le développement d'activités commerciales sur la Lune devra être encouragé dans le but de générer un retour sur investissement

Après un premier retour sur la Lune, financé essentiellement par l'argent public, le potentiel commercial de la Lune devra être exploité pour en poursuivre l'occupation dans la durée. D'après une étude Delphi réalisée auprès d'experts du spatial, le développement d'activités commerciales est même une condition à ce qu'une potentielle



base lunaire abrite plus de 50 personnes en 2040¹⁶.

Le développement d'activités commerciales repose sur une réduction des coûts et des barrières d'accès à la Lune, comme la NASA cherche à le faire actuellement en orbite basse. L'encadrement des activités commerciales via des appels d'offres de l'Agence spatiale européenne permettrait aussi d'éviter un éparpillement, voire un « *Far West* » lunaire.

Plusieurs options peuvent être imaginées, notamment liées à **l'économie culturelle** : tournage de films, d'émissions de télévision, compétitions de gaming, etc. **Le retour d'échantillons de roches lunaires** pourrait également alimenter un marché de souvenirs et de collectionneurs. La société Astrobotic, née du Google Lunar X Prize, avait aussi envisagé, en partenariat avec DHL, de proposer **un service de livraison de colis sur la Lune**, annoncé au coût de 4500 € le paquet de deux centimètres sur deux²¹. Dans un futur plus lointain, des compétitions sportives pourraient être organisées en gravité réduite. La vente des droits télévisuels associés pourrait alors apporter une contribution financière au programme lunaire.

Des **serveurs informatiques** pourraient également être installés sur la Lune. Il a par exemple été proposé que la NASA utilise un supercalculateur placé sur la face cachée pour limiter la saturation de son Deep Space Network, le réseau de télécommunication dédié aux missions interplanétaires³². Un projet de data center lunaire a également été formulé³³ dans la droite ligne du mouvement qui consiste à choisir l'emplacement des serveurs de données afin de satisfaire leurs besoins de puissance et de refroidissement tout en minimisant leurs impacts.

L'explosion des usages d'internet, de services de streaming et de cloud-computing ont amené une très forte augmentation de la

Le développement d'activités commerciales repose sur une réduction des coûts et des barrières d'accès à la Lune, comme la NASA cherche à le faire actuellement en orbite basse.

quantité de données échangées. Ainsi, le trafic Internet a augmenté d'un facteur 20 entre 2007 et 2017. En 2018, les serveurs de données dans le monde consommaient l'équivalent de 200 TWh d'électricité, dont 40 % pour leur seul refroidissement. La liste des endroits utilisés pour l'installation de nouveaux centres de données comprend d'anciennes mines refroidies par des fjords, des installations au nord du cercle polaire, et même des installations sous-marines, comme tente de le faire le projet Natick de Microsoft. L'idée commune est de tirer parti d'une source froide naturelle.

Placées près d'un pôle lunaire, dans des cratères perpétuellement dans l'ombre où la température est constamment à environ -230 °C³⁴, ces installations pourraient ainsi être refroidies à moindre coût. La démonstration de cette possibilité reste toutefois à fournir, tout comme la durabilité des composants dans les conditions lunaires. De plus, une source de puissance continue ou un système avec batteries seraient nécessaires pour assurer le fonctionnement continu du serveur. Si le temps de latence entre la Terre et la Lune exclut des applications de type cloud, un stockage de données sensibles ou à sécuriser pourrait être pertinent, quitte à opter pour une déconnexion totale avec le réseau



terrestre. Plusieurs start-ups visent ce marché, en proposant toutefois des solutions plutôt en orbite que sur la Lune^{35,36}.

Si le modèle économique reste à démontrer, ce type d'initiative se fonde sur la baisse attendue des coûts de lancement et sur l'hypothèse d'un coût opérationnel réduit par rapport aux serveurs sur Terre. Une difficulté est le verrouillage technologique que ce type d'approche risque d'induire. Il est en effet très difficile de modifier le matériel après lancement alors que les équipements informatiques évoluent très rapidement. Dans le cas de serveurs lunaires déconnectés du réseau terrestre, un problème d'accès à la Lune, comme ont pu le connaître les États-Unis avec l'ISS lorsque les navettes spatiales étaient clouées au sol, pourrait également entraîner une perte d'accès aux données.

Enfin, une autre activité commerciale possible est la **fourniture d'ergols produits à partir des ressources lunaires**. Il s'agit du premier cas d'utilisation des ressources in situ (ISRU) imaginé historiquement, dès la fin des années 1970³⁷. Deux cas d'usage peuvent être envisagés. Le premier concerne les satellites arrivant à court d'ergols, qui sont aujourd'hui généralement abandonnés, et qui pourraient donc être réapprovisionnés par une « station-service » lunaire, ainsi que le propose la start-up Orbit Fab. Cette solution permettrait de **prolonger la vie des satellites, à condition qu'elle soit compétitive par rapport au coût de conception et de lancement d'un nouveau satellite** (typiquement 100 M€). Il faut toutefois noter que le lancement d'un nouveau satellite est généralement l'occasion d'implémenter des innovations, ce qui peut être préférable à l'extension de durée de vie d'un satellite devenu obsolète.

Le second cas d'usage consiste à lancer un satellite à vide et à l'approvisionner en ergols seulement une fois en orbite. Cela permet de **réduire la masse au lancement**, et donc

Le ravitaillement depuis la Lune permettrait de prolonger la vie des satellites, à condition qu'il soit compétitif par rapport à la conception et au lancement d'un nouveau satellite.

soit d'augmenter la masse du satellite à capacité de lanceur équivalente, soit de faire appel à un lanceur plus économique. De la même manière, un lanceur arrivant en orbite peut être réapprovisionné pour rejoindre une seconde destination. Cette option est notamment envisagée par SpaceX dans le scénario de mission habitée vers Mars³⁸.

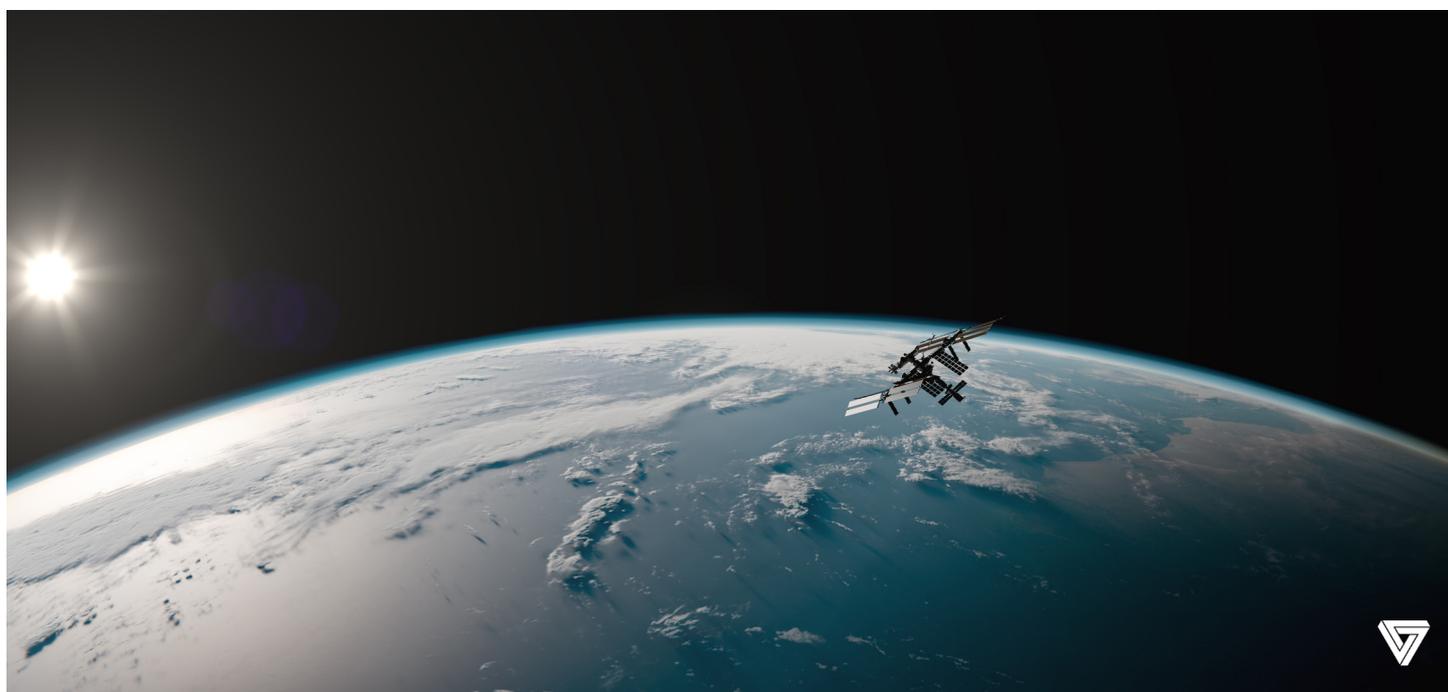
S'il peut donc y avoir un intérêt réel à ravitailler un satellite ou un lanceur en orbite, **deux « stations-services » sont en compétition : la Terre et la Lune**. La production d'ergols sur Terre se fait à un coût très faible, inférieur à un dollar par kilogramme. En revanche, c'est leur acheminement vers le satellite à ravitailler qui est coûteux, de l'ordre de 3000 \$/kg pour rejoindre l'orbite basse¹². Sur la Lune, à l'inverse, **la gravité réduite pourrait permettre de réduire les coûts de lancement en réduisant la taille du lanceur nécessaire** pour une quantité donnée d'ergols. Le cas de l'étage supérieur du module lunaire Apollo en donne un exemple parlant. D'une masse de 4,7 tonnes, il a nécessité 2,3 tonnes d'ergols pour quitter la Lune, là où, sur Terre, il aurait fallu environ cent fois plus d'ergols pour lui permettre de rejoindre l'orbite basse. Le coût des ergols étant négligeable sur Terre, c'est donc surtout l'opportunité d'utiliser un lanceur beaucoup plus léger sur la Lune qui présente un intérêt.

La principale limite à ce modèle de ravitaillement depuis la Lune vient de la difficulté à produire des ergols à partir des ressources in situ. **Compte tenu de l'immensité des défis techniques à relever, la viabilité économique n'est pas assurée**³⁹. Même dans une hypothèse favorable, le coût de production des ergols lunaires sera probablement très supérieur à leur coût de production sur Terre. Il faut également tenir compte de la quantité d'ergols supplémentaire nécessaire pour rejoindre le satellite à ravitailler depuis la Lune.

La production d'ergols lunaires in situ nécessite d'extraire de l'oxygène et de l'eau du régolithe. Le défi est immense car l'oxygène se trouve principalement au sein de silicates, ce qui implique des températures supérieures à 1000 °C pour l'en extraire³⁹, et la glace d'eau est mélangée de manière complexe aux grains de régolithe, ce qui rend sa purification très difficile⁴⁰. Les feuilles de route lunaires américaine et européenne reconnaissent le faible niveau de maturité de ces technologies. Mener de telles opérations industrielles à la surface de la Lune représente aussi un défi humain, étant donné l'environnement de travail très difficile (température, radiations, poussière...). Si des start-ups, comme

OffWorld, installée en partie au Luxembourg, cherchent à développer des systèmes faisant appel à l'intelligence artificielle pour exploiter les ressources lunaires de façon totalement autonome, il n'est pas clair de savoir dans quelle mesure et à quels coûts les tâches pourraient être déléguées à des systèmes robotiques.

Par conséquent, **au moins dans un premier temps, le ravitaillement en vol des satellites et des lanceurs pourrait être plus simple à mettre en œuvre à partir d'ergols terrestres**, notamment si la baisse des coûts de lancement se poursuit. Dans tous les cas, il faudrait que les satellites soient conçus de façon à être ravitaillés (ce qui n'est pas le cas actuellement), idéalement avec des systèmes standardisés. De plus, le développement de moteurs fonctionnant avec un mélange oxygène-méthane implique qu'une partie du mélange (22 % en masse¹⁹) doit être acheminée depuis la Terre, tout comme une part des ergols liquides azotés utilisés pour le contrôle de trajectoire, le carbone et l'azote ne pouvant être obtenus sur la Lune⁵.



2. La recherche d'autres modèles économiques sera nécessaire pour espérer tendre vers une « économie lunaire » autosuffisante

Pour permettre à terme une installation pérenne sur la Lune, il sera nécessaire d'aller au-delà de la notion de retour sur investissement, et ce, même si les effets de levier de la dépense publique spatiale sont importants. **L'émergence d'une « économie lunaire » pouvant s'autofinancer est probablement la condition d'une installation définitive sur notre satellite.** Or, à ce jour, les modèles économiques nécessaires à son existence sont encore à identifier.

La start-up Trans Astronautica Corporation propose par exemple de créer un avant-poste dans les régions polaires de la Lune et d'y exploiter les ressources dans le but de financer son développement jusqu'à devenir une colonie privée permanente. **L'exploitation des ressources est en effet très régulièrement citée comme fondement d'une « économie lunaire ».** Comme nous l'avons vu, l'hélium 3 pourrait représenter un intérêt économique, mais de manière très incertaine, et pas avant la fin de ce siècle. Les difficultés techniques et économiques à surmonter pour développer des réacteurs de fusion de deuxième ou troisième génération, alors que la première génération se fait encore attendre, sont très nombreuses.

Même si l'exploration et l'exploitation sont deux segments différents de l'économie minière, portés par des acteurs qui, précisément, gèrent les risques d'une façon très différente, il reste que **l'hypothèse d'une exploitation minière de la Lune fait face aux incertitudes encore très fortes sur la distribution des ressources** en profondeur, la majorité des données disponibles provenant

de relevés satellitaires. Il est en particulier nécessaire de mieux comprendre l'histoire géologique de la Lune afin de savoir si des gisements ont pu se former. En effet, la survenue de processus minéralisateurs demande des conditions très particulières, expliquant la forte hétérogénéité de la distribution des ressources minérales sur Terre.

Plusieurs missions de prospection, dont l'europpéenne PROSPECT, sont ainsi prévues pour mieux connaître le sous-sol lunaire et décider des endroits les plus prometteurs pour l'extraction de ressources. Dans sa note stratégique, l'ANRT a d'ailleurs parfaitement saisi cet enjeu en écrivant que « l'Europe, par ses orientations stratégiques passées, a su être à la pointe de l'observation de la Terre. À elle de se faire le premier acteur de l'observation de la Lune. La connaissance encore trop partielle de notre satellite permettra d'y envisager, en connaissance de cause, son exploration durable. L'Europe peut ainsi se positionner sur la cartographie minérale de la Lune indispensable à la transformation

Pour que l'exportation vers la Terre soit économiquement viable, il est nécessaire que la ressource considérée ait une forte criticité, ce qui dépend notamment de sa rareté sur Terre, de la demande associée, de son degré de substituabilité par d'autres ressources et de son taux de recyclage.

du régolithe ou de la glace en différentes molécules de base pour la reconstruction de fluides énergétiques ».

Il faut noter cependant que la financiarisation des marchés de matières premières a contribué à introduire dans ces marchés de nouveaux acteurs, à visée clairement spéculative et capables de jouer aussi bien le très court que le très long terme ; des fonds spécialisés richement dotés seraient ainsi à même de prendre des positions qui, même marginales à l'échelle de leur portefeuille, n'en constitueraient pas moins des fonds significatifs rapportés aux projets lunaires.

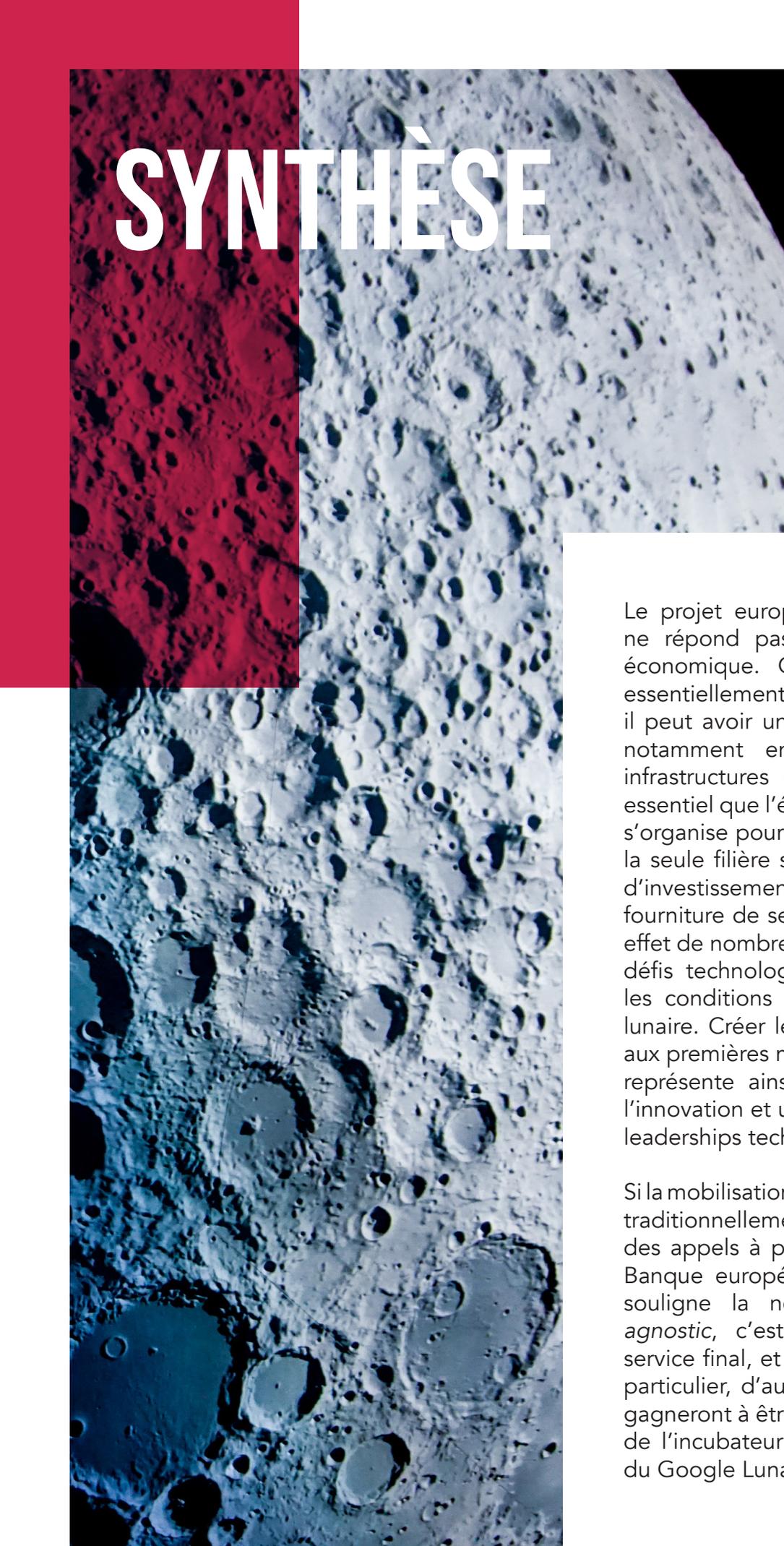
À terme, **l'exploitation des ressources lunaires peut se décliner en trois cas d'usage : l'utilisation in situ, l'utilisation dans l'espace cis-lunaire et l'export vers la Terre**⁵. Les deux premiers cas répondent à la nécessité de réduire les coûts des missions en s'affranchissant des coûts de lancement depuis la Terre⁴¹. Si l'eau et l'oxygène, par exemple, peuvent être extraits dans une perspective d'utilisation in situ, leur exportation vers la Terre, où ils sont abondants, n'aurait aucun intérêt. En revanche, le fer est un coproduit de leur extraction du régolithe qui pourrait être utilisé, comme le titane et l'aluminium lunaires, pour la construction d'infrastructures sur la Lune ou dans l'espace cis-lunaire⁵. Ces trois cas d'usage sont donc complémentaires.

Pour que l'exportation vers la Terre soit économiquement viable, il est nécessaire que la ressource considérée ait une forte criticité, ce qui dépend notamment de sa rareté sur Terre, de la demande associée, de son degré de substituabilité par d'autres ressources et de son taux de recyclage. Il convient de rappeler que l'épuisement des ressources sur Terre est un concept imprécis pour les ressources métalliques, et qu'il faut plutôt parler de diminution de la qualité des minerais, qui implique une forte augmentation du coût financier et énergétique

de l'extraction⁴². Les enjeux écologiques et géopolitiques doivent également être pris en compte dans la limitation possible des capacités d'extraction et d'approvisionnement d'une aire géographique donnée. Les sites de production de métaux sont en effet généralement concentrés dans un petit nombre de pays : l'Australie domine le marché du lithium, la République démocratique du Congo celui du cobalt, et la Chine a une forte mainmise sur les métaux critiques. Cette concentration peut être source de tensions comme l'a montré la crise en Chine et Japon en 2010⁴³.

Enfin, il faut évidemment que la ressource soit présente sur la Lune en quantité suffisante. La teneur minimale nécessaire dépend de la stratégie économique envisagée, des contraintes technico-économiques qui pèsent sur l'exploitant. Dans tous les cas, l'industrie minière est à forte intensité capitaliste, ce qui implique une exploitation dans la durée afin de récupérer l'investissement initial, et des marges significatives. L'adoption d'un droit minier lunaire prévoyant la délivrance de concessions d'exploitation pourrait être à même d'encourager les acteurs privés à réaliser des campagnes de prospection.

Si les métaux du groupe du platine présents sur la Lune pourraient avoir un intérêt à l'export vers la Terre⁵, il est à noter que les technologies d'extraction nécessaires pour exploiter des ressources très faiblement concentrées sur la Lune pourraient, une fois développées, être également déployées sur Terre, et ce probablement plus facilement, rendant donc paradoxalement le recours à la Lune moins nécessaire.



SYNTHÈSE

Le projet européen de retour sur la Lune ne répond pas directement à un besoin économique. Cependant, même à visée essentiellement scientifique et géopolitique, il peut avoir un fort potentiel économique, notamment en raison des besoins en infrastructures et en services. Il est donc essentiel que l'écosystème industriel français s'organise pour y répondre, bien au-delà de la seule filière spatiale et dans une logique d'investissement et non pas seulement de fourniture de service. La France possède en effet de nombreux atouts pour répondre aux défis technologiques immenses posés par les conditions hostiles de l'environnement lunaire. Créer les infrastructures nécessaires aux premières missions de retour sur la Lune représente ainsi un puissant moteur pour l'innovation et une opportunité d'établir des leaderships technologiques.

Si la mobilisation des acteurs industriels passe traditionnellement par des appels d'offre et des appels à projets, à propos desquels la Banque européenne d'investissement (BEI) souligne la nécessité d'être *technology agnostic*, c'est-à-dire de commander un service final, et non pas une technologie en particulier, d'autres mécanismes de soutien gagneront à être mis en place, sur le modèle de l'incubateur TechTheMoon du CNES et du Google Lunar X-Prize.

Le soutien public est en effet essentiel car beaucoup de segments de l'économie spatiale sont encore jugés trop risqués par les investisseurs privés, notamment en raison de l'importance des besoins en capitaux initiaux, de la faible maturité des marchés et des incertitudes technologiques et réglementaires.

Les moyens publics sont cependant limités et l'Agence spatiale européenne, même compte tenu de l'augmentation de son budget, dispose de moyens plus modestes que ceux de la NASA. Cette situation doit inciter les Européens à adopter une vision originale et pragmatique, reposant sur des choix éclairés, leur permettant de se distinguer des autres nations spatiales.

Pour augmenter la quantité d'argent disponible, et en parallèle des investissements portés directement par des acteurs privés, des mécanismes de financement innovants pourront être mis en place, comme l'émission d'obligations dédiées au financement de l'exploration de la Lune, la mise en place de concessions ou encore, plus hypothétiquement, la vente de titres de propriétés lunaires rendue possible par la mise place d'un cadre juridique favorable.

À court terme, le tourisme apparaît comme le modèle économique le plus proche de la viabilité commerciale dans le cadre du retour sur la Lune, bien que le prix très élevé du voyage restreigne fortement la demande. Actuellement spectatrice, l'Europe doit s'interroger sur sa stratégie dans ce secteur controversé.

À plus long terme, la recherche d'autres modèles économiques sera indispensable à la pérennité du projet lunaire, afin de ne pas reproduire le schéma du programme Apollo après 1972. Les modèles économiques directs, qui tirent directement parti des spécificités de notre satellite, sont les seuls

à pouvoir justifier une occupation de la Lune dans la durée.

Plusieurs options peuvent être imaginées, notamment lié à l'économie culturelle, à la vente d'échantillons de roches, à des livraisons de colis, à l'organisation de compétitions sportives en gravité réduite, ou encore à l'installation de serveurs de données sur la Lune dont les droits télévisuels apporteraient une contribution financière au programme lunaire européen.

L'exploitation des ressources, notamment pour produire des ergols, pourrait être une option à condition que le coût du ravitaillement depuis la Lune soit compétitif avec le coût de conception et de lancement d'un nouveau satellite. L'hypothèse d'une exploitation minière de la Lune fait face à notre méconnaissance de des ressources et pose la question de la viabilité économique d'un export vers la Terre, possible uniquement pour une ressource fortement critique. Si des études plus poussées seront nécessaires pour évaluer les tailles de marché et quantifier les retours sur investissement possibles, il apparaît qu'une infrastructure commune, ouverte aux activités commerciales et à l'innovation, pourrait fédérer l'effort lunaire européen.

Enfin, même si la Lune est souvent présentée comme une étape préliminaire à la conquête de Mars, il faut rappeler à quel point la planète rouge est encore lointaine. Dans une étude Delphi récente, 80 % des experts interrogés pensaient qu'aucune mission habitée n'aura atteint Mars d'ici 2040¹⁶. Les défis que pose un voyage habité vers Mars sont sans commune mesure avec ceux d'un retour sur la Lune, si bien qu'une des conditions de réussite du projet lunaire européen est de voir dans la Lune avant tout une fin, bien plus qu'un moyen.



Bibliographie

1. ANRT. Objectif Lune : pour une ambition européenne. 6 (2021).
2. Greenfieldboyce, N. NASA To Test Rocket In The Next Step Toward Returning To The Moon. NPR.org <https://www.npr.org/2021/03/17/978163949/nasa-to-test-rocket-in-the-next-step-toward-returning-to-the-moon>.
3. Wattles, J. How NASA's Apollo program kicked off Silicon Valley's tech revolution. CNN <https://www.cnn.com/2019/08/04/tech/nasa-management-apollo-silicon-valley-scn/index.html> (2019).
4. De Temmerman, G., Chuard, D. & Rudelle, J.-B. The helium bubble: prospects for 3He- fuelled nuclear fusion. (2021).
5. Crawford, I. A. Lunar resources: A review. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 39, 137–167 (2015).
6. De Temmerman, G. Vers une bulle de la fusion nucléaire ? Les Echos <https://www.lesechos.fr/idees-debats/cercle/opinion-vers-une-bulle-de-la-fusion-nucleaire-1325321> (2021).
7. Crane, K. W., Linck, E., Lal, B. & Wei, R. Y. Measuring the Space Economy: Estimating the Value of Economic Activities in and for Space. 61 (2020).
8. Defranoux, L. Le Luxembourg, du paradis fiscal au paradis spatial. Libération (2019).
9. Yuhas, A. SpaceX to send two people around the moon who paid for a 2018 private mission. *The Guardian* (2017).
10. Fly me to the moon. *The Economist* (2012).
11. Achenbach, J. Space-tourism company to offer two seats to the moon. *The Independent* (2012).
12. Mesnier, P., Chuard, D., De Temmerman, G. & Rudelle, J.-B. ISS, Lune, Mars : jusqu'où ira SpaceX ? *Usbek & Rica* <https://usbeketrica.com/fr/article/iss-lune-mars-jusqu-ou-ira-spacex> (2021).
13. Foust, J. Space tourism's image problem. *SpaceNews* <https://spacenews.com/foust-forward-space-tourisms-image-problem/> (2019).
14. Lehoucq, R., Rio, E. & Graner, F. Tourisme spatial : quand les plaisirs de quelques-uns polluent la planète de tous. *The Conversation* <http://theconversation.com/tourisme-spatial-quand-les-plaisirs-de-quelques-uns-polluent-la-planete-de-tous-146552> (2020).
15. Final Environmental Assessment for the SpaceX Starship and Super Heavy Launch Vehicle at Kennedy Space Center (KSC). (2019).
16. Spedding, C. P., Lim, S. & Nuttall, W. J. ISRU technology deployment at a lunar outpost in 2040: A Delphi survey. *Acta Astronautica* 181, 316–324 (2021).
17. Moss, S. A data center on the Moon. *Data Center Dynamics* <https://www.datacenterdynamics.com/en/analysis/a-data-center-on-the-moon/> (2021).
18. Thales Alenia Space remporte un contrat d'étude de faisabilité portant sur les habitats lunaires. *Thales Group* https://www.thalesgroup.com/fr/monde/espace/press_release/thales-alenia-space-remporte-contrat-detude-faisabilite-portant-habitats.
19. Zubrin, R. Toward a coherent Artemis plan. *SpaceNews* (2020).
20. Nokia selected by NASA to build first ever cellular network on the Moon. *Nokia* <https://www.nokia.com/about-us/news/releases/2020/10/19/nokia-selected-by-nasa-to-build-first-ever-cellular-network-on-the-moon/>.
21. Gévaudan, C. Le low-cost à l'allumage. *Libération* (2019).
22. Primas, S. & Bockel, J.-M. Lanceurs spatiaux : restaurer l'ambition spatiale européenne. <https://www.senat.fr/notice-rapport/2019/r19-131-notice.html> (2019).
23. European Investment Bank. The future of the European space sector: how to leverage Europe's technological leadership and boost investments for space ventures : executive summary. (Publications Office, 2019).
24. Microgravity Advantage. *Axiom Space* <https://www.axiomspace.com/microgravity>.
25. Investir dans le New Space : une (r)évolution ?
26. Cahan, B. & Sadat. *US Space Policies for the New Space Age: Competing on the Final Economic Frontier*. 112.
27. Barjot, D., Petitet, S. & Varaschin, D. La concession comme levier de développement ? *Entreprises et histoire* n° 31, 5–12 (2002).
28. Beldavs, V. Blockchains and the emerging space economy. *The Space Review* (2016).
29. Nations Unies, Assemblée générale, Office des Nations Unies à Vienne, & Bureau des affaires spatiales. *Traités et principes des Nations Unies relatifs à l'espace extra-atmosphérique: texte et état des traités et des principes régissant les activités des États en matière d'exploration et d'utilisation de l'espace extra-atmosphérique adoptés par l'Assemblée générale des Nations Unies*. (Nations Unies, 2002).
30. Couston, M. *Droit spatial*. (Ellipses, 2014).
31. *The Space Settlement Institute*. <http://www.space-settlement-institute.org/strategy.html>.
32. Rath, J. Could A Lunar Supercomputer

Work? Data Center Knowledge <https://www.datacenterknowledge.com/archives/2012/09/28/could-a-lunar-supercomputer-work> (2012).

33. Akil, A. Data Centres on Moon. 11, 3 (2020).

34. Flahaut, J. et al. Regions of interest (ROI) for future exploration missions to the lunar South Pole. *Planetary and Space Science* 180, 104750 (2020).

35. Donoghue, A. The Idea of Data Centers in Space Just Got a Little Less Crazy. *Data Center Knowledge* <https://www.datacenterknowledge.com/edge-computing/idea-data-centers-space-just-got-little-less-crazy> (2018).

36. Mellor, C. Spacebelt aims to store data in satellites. *Blocks and Files* <https://blocksandfiles.com/2020/04/21/spacebelt-store-data-in-satellites-analysis/> (2020).

37. Ash, R. L., Dowler, W. L. & Varsi, G. Feasibility of rocket propellant production on Mars. *Acta Astronautica* 5, 705–724 (1978).

38. SpaceX. SpaceX <https://www.spacex.com/human-spaceflight/mars/>.

39. Rapp, D. Use of Extraterrestrial Resources for Human Space Missions to Moon or Mars. (Springer-Verlag, 2013). doi:10.1007/978-3-642-32762-9.

40. Patel, N. V. Here's how we could mine the moon for rocket fuel. *MIT Technology Review* (2020).

41. Anand, M. et al. A brief review of chemical and mineralogical resources on the Moon and likely initial in situ resource utilization (ISRU) applications. *Planetary and Space Science* 74, 42–48 (2012).

42. Geldron, A. Epuisement des métaux et minéraux : faut-il s'inquiéter ? 22 (2017).

43. Golla, M. La Chine prive le Japon de métaux rares. *Le Figaro* (2010).

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une collaboration entre Zenon Research et l'ANRT et a bénéficié de la participation des membres du groupe de prospective "Objectif Lune". Les auteurs souhaitent également remercier Victor Dos Santos Paulino pour les suggestions.

Ce travail a été financé par Zenon Research et réalisé en partenariat avec l'université PSL et Mines ParisTech PSL.

Auteurs et contributeurs

Dimitri Chuard

Mines ParisTech PSL, IHEIE

dimitri.chuard@mines-paristech.fr

Jean-Baptiste Rudelle

Zenon Research

jb@zenonresearch.org

Greg de Temmerman

Zenon Research

Mines ParisTech PSL, IHEIE

greg@zenonresearch.org



À propos de Zenon Research

Zenon Research est un think tank qui œuvre à identifier les facteurs clés structurant le futur à long terme.

Face à un futur nécessairement incertain, l'élaboration de scénarios et l'évaluation de leur probabilité permettent d'y voir plus clair. Parvenir à distinguer les futurs plausibles de ceux qui resteront dans le domaine de la science-fiction est essentiel. Notre but est d'identifier les limites dures et les contraintes qui pèsent sur le futur à long terme. Grâce à cette approche, nous aidons les décideurs à construire leur vision de l'avenir.

Zenon Research produit des travaux de recherche originaux fondés sur une approche transdisciplinaire, sous la forme de livres blancs, de rapports et de vidéos pour le grand public. Notre approche est pragmatique, à la croisée des sciences dures et de l'économie, car nous sommes convaincus que ce sont les contraintes technologiques et économiques qui dessinent le monde de demain.

Pour citer ce rapport :

D. Chuard, G. De Temmerman and J.-B. Rudelle, 2021: Retourner sur la Lune pour y rester. Quels modèles économiques à l'appui du nouvel élan lunaire ? Zenon Research, Paris, France.

