

MISSION DE PROSPECTIVE TECHNOLOGIQUE

L'EAU SUR LA LUNE

21.04.2020

VALENTINE
CILLA

FRANCK VAILLANT
GUERRERO

CAMILLE
TO

MASTER
MTI

► MANAGEMENT ◀
DE LA TECHNOLOGIE
ET DE L'INNOVATION

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier les personnes ayant partagé avec nous leur expertise et qui nous ont transmis leurs connaissances ainsi que leurs intérêts pour ces problématiques :

- **Christophe Lasseur**, coordinateur des activités Support - Vie de l'ESA, directeur du projet MELISSA
- **Sébastien Straube**, fondateur et directeur général d'Interstellar Ventures
- **Pascal Bultel**, expert des "tendances clés" à long terme à la Direction des Applications, de la Science et de l'Innovation du CNES
- **Philippe Clerc**, référent conformité et éthique d'entreprise ainsi que responsable des affaires juridiques au CNES
- **Roger Ben Aïm**, créateur de l'Institut de la Filtration et des Techniques Séparatives (IFTS) et Président du conseil scientifique de l'IFTS
- **Roland Lehoucq**, astrophysicien au Commissariat à l'énergie atomique, enseignant, auteur et vulgarisateur

Ces entretiens et ces rencontres ont été riches en enseignements et réflexions. Ils nous ont donné matière à alimenter notre travail et, nous l'espérons, à proposer des recommandations pertinentes pour le **CNES, l'ANRT** et tout autre décideur du programme "Objectif Lune".

Nous dédions un remerciement particulier à l'équipe pédagogique qui nous a suivi et coaché tout au long de ce projet, composée de **Nathalie Popiolek et Lionel Montoliu**, ainsi qu'à notre commanditaire **François Spiero**, sans qui cette étude de prospective technologique n'existerait pas.

SOMMAIRE

OBJECTIF DE L'ÉTUDE	3
INTRODUCTION	4
CHAPITRE 1 : CONTEXTE ET ENJEUX DE L'ÉTUDE PROSPECTIVE	5
Cadrage de l'étude	5
Contextualisation et repères historiques sur la démarche de colonisation lunaire et la mission "Objectif Lune"	7
Méthodologie de l'étude prospective	11
CHAPITRE 2 : MODÉLISATION ET ANALYSE DU SYSTÈME PROSPECTIF	17
Présentation du Système	17
Présentation des sous-systèmes du mapping des variables	19
Le sous-système VIE	19
Le sous système Environnement Lunaire	21
Le sous-système Technologie	24
Le sous système Économique	27
Le sous système social	30
Le sous système légal institutionnel	33
Ruptures envisageables et Faits Porteurs d'Avenir (FPA)	33
Repérage des tendances lourdes	34
Les Faits Porteurs d'Avenir	35
CHAPITRE 3 : TABLEAU DES ACTEURS ET OBJECTIFS DU DÉCIDEUR	41
Panorama des acteurs du système	41
Analyse du décideur	44
Présentation des objectifs et des moyens du décideur	44
Identification des leviers d'action	47
Stratégies d'action pour le décideur	50
CHAPITRE 4 : PROJECTION DU SYSTÈME PAR SCÉNARIO	55
Scénario 1 : Optimisation et avancée commune	55
Scénario 2 : Mauvaise perception des enjeux et bridage de l'activité	58
Scénario 3 : Course aux ressources	60
CHAPITRE 5 : AIDE A LA DEFINITION DE LA STRATÉGIE DU DÉCIDEUR	63
Croisement des stratégies avec le scénario 1	64
Croisement des stratégies avec le scénario 2	66
Croisement des stratégies avec le scénario 3	69
Recommandations sur la stratégie la plus adaptée pour le décideur au vu des différents scénarios	71
Recommandations générales	73
CONCLUSION	76

OBJECTIF DE L'ÉTUDE

Cette étude a été commanditée par le CNES, au Master MTI dans le cadre du programme "Objectif Lune" de l'ANRT.

"Objectif Lune" est un groupe de prospective, rassemblant acteurs publics et privés français et européens, dédié à l'installation d'une base-vie sur la Lune, co-présidé par Claudie Haigneré (ESA) et Gilles Rabin (CNES).

Ce travail a pour but d'engager une réflexion stratégique et prospective sur l'exploitation de l'eau sur la Lune. Elle s'inscrit dans l'objectif de création d'une base humaine lunaire pérenne à long terme.

Notre approche est prospectiviste et exploratoire. Elle est *technology push*, mais aussi *social pull* puisque l'on part d'un changement technique en explorant les scénarios d'impact et les logiques de rétroaction économiques et sociales.

L'objectif de l'étude n'est pas de dresser un état de l'art des technologies existantes pour exploiter l'eau sur la Lune, mais d'éclairer les décideurs du domaine spatial à travers l'identification de scénarios exploratoires. Ces derniers s'appuient sur l'analyse des tendances passées et présentes pour amener à un futur logique concernant l'exploitation des ressources en eau sur la Lune. Cette étude prend ainsi en compte les tendances possibles, les faits porteurs d'avenir et les ruptures technologiques potentielles quant à cette exploitation, en incluant l'aspect technologique, mais aussi le contexte politique, économique et sociétal.

Grâce à cette étude mêlant prospective, prévision technologique et aide à la décision multicritère, nous souhaitons ici proposer des scénarios exploratoires qui aideront les décideurs et autres lecteurs à réfléchir, mais également agir de manière pertinente et pionnière face à cet inconnu désirable qu'est la colonisation lunaire.

INTRODUCTION

“C’est un petit pas pour l’homme, un bond géant pour l’humanité” - Neil Armstrong

Il y a plus de 50 ans, l’humanité faisait le premier pas sur la Lune. Le 16 juillet 1969, le vaisseau spatial américain de la mission Apollo 11 effectue son alunissage, permettant à Neil Armstrong et son collègue de mission Buzz Aldrin de fouler le sol lunaire. Depuis, les programmes spatiaux se sont montrés discrets vis-à-vis de la Lune, mais l’ambition lunaire est aujourd’hui à nouveau d’actualité. Le programme Artemis¹ prévoit en effet le retour de l’humanité sur notre satellite en 2024, avec un équipage composé d’un homme et d’une femme. L’objectif du programme américain est d’explorer davantage la surface de la Lune pour à terme y installer une base humaine pérenne. La France et l’Europe sont associés au projet en intervenant notamment sur Gateway, qui est l’une des composantes du programme. Celle-ci consiste en l’établissement d’une station spatiale en orbite autour de la Lune et assurera une fonction support à l’exploration humaine et scientifique de la Lune. Ainsi, la station Gateway permettra des missions lunaires de plus longue durée ainsi qu’une exploration plus poussée dans le système solaire.

Le programme Artemis a pour vocation de prendre le relais de la Station Spatiale Internationale (ISS), dont la retraite devrait arriver en 2030. Selon Jean Yve le Gall, Président du CNES, les collaborations internationales sur le programme Artemis seront du même type que pour l’ISS². L’homme ferait ainsi un pas de plus dans l’exploration spatiale, une ambition pour laquelle la Lune représente une étape stratégique. En effet, la Lune intéresse de plus en plus les puissances spatiales pour sa localisation et son environnement gravitationnel stratégiques, mais également pour les ressources qu’elle possède. Après la mise en évidence de la présence d’eau et de minéraux, la Lune revient au cœur des enjeux spatiaux et incarne un objet de convoitise. Tous ces éléments participent à conforter l’ambition humaine d’aller plus loin dans l’exploration du système solaire.

Pour cela, l’eau constitue une ressource indispensable pour la vie humaine qu’il faudra fournir aux spationautes. Comme en témoigne l’ESA, “Au fur et à mesure que nous explorerons plus loin de notre planète, fournir de l’eau et de la nourriture aux astronautes deviendra de plus en plus difficile. Tout comme sur Terre, réduire, réutiliser et recycler est le mantra des explorateurs extraterrestres et de leurs agences spatiales”³. C’est pourquoi l’exploitation des ressources en eau lunaire constitue un enjeu significatif pour l’exploration spatiale et pour répondre à des problématiques terrestres.

¹ [NASA Artemis](#)

² [2020 : la décennie du retour sur la Lune](#)

³ [ESA - Water in space](#)

CHAPITRE 1 : CONTEXTE ET ENJEUX DE L'ÉTUDE PROSPECTIVE

A. Cadrage de l'étude

Afin de cibler au mieux nos recherches, il a d'abord été choisi, en accord avec notre commanditaire, le sujet précis de notre étude : **l'exploitation des ressources en eau lunaire.**

Le sujet qui nous a été initialement présenté pour cette étude, portait sur l'extraction et l'utilisation de l'eau sur la Lune. Il était formulé de la manière suivante : *“De l'eau sous forme de glace existe au fond de certains cratères lunaires. Dans la perspective à long terme de bases humaines autonomes sur la Lune, il sera indispensable d'avoir accès aux ressources locales en eau. Les étudiants sont invités à :*

- o Répertorier les ressources en eau de la Lune (quantité, localisation)*
- o Proposer des méthodes d'extraction de l'eau*
- o Réfléchir à l'acheminement de l'eau vers les bases humaines*
- o Proposer des méthodes de filtration et de recyclage de l'eau”*

En effet, l'approvisionnement en eau est un élément crucial de la base lunaire pour assurer une présence humaine à long terme. Répertorier les ressources en eau sur la Lune n'est pas une tâche aisée, et ce même pour les grandes puissances spatiales telle que la NASA. En effet, cette ambition requiert des outils technologiques extrêmement sophistiqués ainsi que des experts hautement qualifiés. Notre rôle vis-à-vis des ressources, est donc d'identifier les différentes sources d'eau présentes sur la Lune et d'imaginer son exploitation future.

La réflexion autour des méthodes d'extraction, d'acheminement, de filtration et de recyclage de l'eau, a été d'abord réalisée de manière prospective. Pour cela, nous avons eu recours à de nombreuses recherches et analyses de l'existant sur ces différents enjeux, tant au niveau des technologies que des structures.

Nous avons ensuite poursuivie la réflexion avec une partie projective, proposant différents scénarios avec des possibilités souhaitables ou envisageables pour l'exploitation de cette eau lunaire. Ces scénarios d'exploitation s'appuient sur le cycle de vie de la ressource : de son extraction des cratères, en passant par son acheminement vers la ou les bases lunaires, sa filtration pour la rendre potable, et sans oublier enfin le recyclage de ces eaux usées dans une démarche de base pérenne et durable.

Comme le conseille la méthodologie prospective de Nathalie Popiolek, le sujet doit comporter l'objet de notre étude et définir l'horizon temporel auquel se situe l'étude. L'horizon qui a été établi avec l'aide de notre commanditaire François Spiero, est l'horizon 2050. En effet, cette étude s'inscrit dans l'initiative "Objectif Lune" traduisant l'ambition de créer une base humaine pérenne sur la Lune. Selon l'ambition de Claudie Haigneré il y aurait "40 hommes sur la Lune en 2040"⁴ en hésitant avec "50 hommes sur la Lune en 2050". Nous avons donc choisi d'être ambitieux, mais également d'opter pour un horizon raisonnable et envisageable pour notre étude. Un horizon réaliste et marquant : la moitié du siècle, pour ne pas faire les choses à moitié !

L'espace géographique étudié se concentre sur le pôle Sud de la Lune pour des raisons stratégiques propres au sujet traité. C'est d'abord à cet endroit que se trouvent la majorité des cratères aux fonds desquels se trouveraient les couches de glace potentiellement exploitables. Ensuite, l'arrête de ces cratères sont inondés quasi-incessamment par la lumière du soleil, ce qui n'est pas le cas des autres cratères lunaires subissant la nuit lunaire. Le pôle Sud représente alors un environnement favorable, avec la capacité d'exploiter des systèmes d'énergie solaire. Le cratère Shackleton⁵ fait l'objet d'une attention particulière des scientifiques puisqu'il pourrait répondre au trois principales attentes qui sont de disposer d'une partie abritée des rayonnements solaires, d'une autre partie exposée pour produire de l'énergie solaire et d'abriter des quantités intéressantes de glace lunaire. Finalement, "pour installer une base lunaire, l'Homme devra chercher cette association quelque peu paradoxale d'ombre et de lumière éternelles".⁶ Le pôle Sud est connu pour ses atouts et devient même un nouvel "eldorado" pour les scientifiques, mais aussi pour les nouveaux entrepreneurs spatiaux, tels que Blue Origin et Elon Musk. La concurrence technologique, politique et économique risque donc de s'y développer dans les prochaines décennies

Finalement, ce travail de prospective retient comme objet d'étude principal l'eau potable que l'on pourra produire sur la Lune, puisqu'il s'agit de l'eau à destination de la base humaine.

⁴ Déclaration de Claudie Haigneré lors du colloque du 13 décembre au CNES en partenariat avec l'ANRT

⁵ Spudis, Paul & Bussey, Ben & Plescia, Jeffrey & Josset, Jean-Luc & Beauvivre, Stéphane. (2008). Geology of Shackleton Crater and the south pole of the Moon. *Geophys. Res. Lett.* 35. 10.1029/2008GL034468.

⁶ [Le pôle sud lunaire. nouvel eldorado céleste](#)

Synthèse du cadrage de l'étude	
Sujet	L'exploitation des ressources en eau lunaire
Champ géographique	Pôle Sud de la Lune
Décideur	Le CNES
Objet de l'étude	La quantité d'eau potable produite et exploitée quotidiennement sur la Lune (ce qui inclut son extraction, son acheminement, sa filtration et son recyclage)
Horizons prospectifs	2050 - Base humaine pérenne sur la Lune

B. Contextualisation et repères historiques sur la démarche de colonisation lunaire et la mission "Objectif Lune"

"L'espace inspire sans aucun doute l'avenir de l'Humanité."

Jean-Yves Le Gall, Président du CNES

L'exploitation des ressources lunaires s'inscrit dans une ambition plus grande, qui est celle de progresser dans l'exploration du système solaire. Celle-ci passerait par l'établissement d'une colonie lunaire prévue à horizon 2050, à travers le programme Objectif Lune.

❖ **Présentation du CNES**

Le Centre National des Etudes Spatiales (CNES), créé en 1961, est un établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC) chargé d'élaborer et de proposer au gouvernement français le programme spatial, ainsi que de le mettre en œuvre. Dirigé par Jean-Yves Le Gall, l'agence spatiale française est affiliée au Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche ainsi qu'au Ministère des Armées. Sa mission principale est de concrétiser une ambition politique, entreprise depuis bientôt 60 ans, avec l'objectif de *"construire un futur où l'espace est au service de tous"*⁷.

⁷ [L'espace, une ambition pour la France](#)

Les activités du CNES se répartissent en 5 domaines d'intervention, composant l'ensemble des compétences nécessaires à la définition et à la mise en oeuvre de la politique spatiale française :

- **Les lanceurs** : l'autonomie d'accès à l'espace est un enjeu de souveraineté garanti par la gamme des lanceurs européens.
- **Les sciences** : l'exploration de l'espace cherche les réponses aux questions fondamentales de l'humanité sur l'origine du système solaire, des galaxies, de la vie.
- **L'observation** : la planète Terre vit sous le regard constant des satellites qui l'observent, étudient son atmosphère et fournissent des données indispensables pour la météorologie, l'océanographie, ou encore l'altimétrie.
- **Les télécommunications** : les satellites jouent un rôle irremplaçable pour les télécommunications à haut débit, la localisation, la collecte de données environnementales, la recherche et le sauvetage.
- **La défense** : l'observation optique à très haute résolution, l'écoute, les télécommunications hautement sécurisées, la surveillance de l'espace contribuent à la paix et à la sécurité des citoyens.

Avec un budget de 2.780 milliard d'euros en 2020, en hausse exceptionnelle de 14% par rapport à 2019⁸, le CNES a les moyens de se concentrer sur un axe prioritaire: **innover pour inventer l'espace de demain**. Les recettes et les dépenses de l'agence publique sont étudiées par des organismes indépendants, chargés de veiller au bon respect de leur utilisation, notamment au profit de l'industrie française et de la communauté scientifique.

En effet, tous les 5 ans l'Etat renouvelle sa confiance au CNES avec un "Contrat d'Objectifs & de Performance" (COP)⁹ fixant des objectifs ambitieux et précis : nouveaux partenariats avec l'industrie, solutions inédites en réponse aux besoins actuels et futurs, lutte contre le changement climatique, etc. Dans le cadre du COP "Innovation & Inspiration" 2016-2020, le CNES a impulsé de nombreuses évolutions au sein de son établissement et répondu aux missions fixées : intelligence artificielle, biotechnologies, nouvelles énergies, Connect by CNES, révolution numérique. Le challenge a été relevé et l'espace de demain a bien été inventé. Le futur COP, qui couvrira la période 2021-2025, fixera alors les nouvelles ambitions de l'État en matière de politique spatiale. Le CNES commence d'ores et déjà à en poser les bases dans le cadre de l'exercice « **Stratégie 2025** » impliquant l'ensemble des collaborateurs du CNES. En inventant les systèmes spatiaux de demain, le CNES est donc un acteur majeur de l'innovation technologique, du développement économique et de la politique industrielle en France.

⁸ <https://cnes.fr/fr/budget-exceptionnel>

⁹ <https://cnes.fr/fr/le-cnes/le-cnes-en-bref/contrat-dobjectifs-et-de-performance-etat-cnes-2016-2020>

L'agence spatiale française occupe une place importante au niveau national mais il est aussi un acteur européen et international. Créée en 1975, l'ESA met en oeuvre la politique spatiale de l'Europe, au service de ses États membres, au nombre de 22 à ce jour, et oeuvre également pour le compte de l'Union Européenne. La France est l'un des principaux contributeurs à l'ESA avec une participation de 1.401 milliard d'euros au budget de l'ESA en 2020, soit une hausse de près de 20% par rapport à 2019¹⁰. Le CNES soutient également le programme spatial de l'Union Européenne et en particulier ses 2 programmes phares que sont Galileo et Copernicus. L'Europe est ainsi la 3ème puissance spatiale mondiale, grâce à ses 3 grands acteurs : les États membres de l'ESA, l'Agence spatiale européenne et l'Union Européenne. L'étroite coopération entre ces différentes entités s'est muée au fil du temps en une véritable action politique commune.

En effet, indépendamment de la concurrence, la coopération internationale demeure nécessaire dans le secteur spatial. Le CNES multiplie les accords avec le monde entier, créant un pont technologique entre les nations en partageant ses connaissances, sans perdre de vue sa mission de valorisation de l'industrie française. Ces coopérations permettent un partage des coûts, et donc une plus grande possibilité d'action, ainsi qu'une valorisation des compétences scientifiques et industrielles françaises conduisant à l'acquisition de nouveaux savoirs.

Pour résumer, 3 types de partenariats internationaux existent aujourd'hui avec le CNES :

- **Les coopérations européennes**, dans le cadre de l'Agence spatiale européenne (ESA) ou de l'Union Européenne (UE), grâce auxquelles le CNES demeure au centre du jeu, en tant que grand contributeur historique de l'ESA et moteur de la stratégie spatiale et du règlement « espace » de l'Union.
- **Les coopérations historiques et structurantes** avec les grands acteurs spatiaux hors Europe (Chine, Etats-Unis, Inde, Japon, Russie), qui constituent une part centrale de l'activité internationale du CNES.
- Et enfin, **la coopération avec les nouvelles puissances spatiales** (Corée, Émirats Arabes Unis, Israël, Maroc, Mexique, Singapour, Vietnam...) voulant transformer leurs sociétés et leurs économies grâce au spatial.

¹⁰ [ESA - L'ESA : faits et chiffres](#)

❖ Le Programme Objectif Lune : Prospective d'une présence humaine sur la Lune

Le Programme Objectif Lune, lancé par l'ANRT et co-présidé par Claudie Haigneré (ESA) et Gilles Rabin (CNES), est un programme de prospective, rassemblant acteurs publics et privés, français et européens, du secteur spatial comme non spatial, pour conjuguer vision, innovation et communication sur le projet d'une base vie en expansion durable sur la Lune.

L'ambition est de faire partager la réflexion sur cet objectif de colonisation lunaire et de mobiliser au-delà de la communauté spatiale. Se voulant intersectorielle, cette initiative vise à développer des coopérations inédites et d'envisager de nouveaux business models. En effet, "Objectif Lune" propose de réfléchir à ce que pourrait être un village lunaire, qui, selon Claudie Haigneré "ne se situe pas dans la compétition mais dans une ouverture à des entités publiques ou privées"¹¹. Effectivement, il n'y a pas seulement les agences spatiales qui s'intéressent à ce projet, mais également de nombreuses entreprises privées qui en font leur fer de lance : c'est ce qu'on appelle communément le New Space. Ce programme réfléchit donc à l'installation durable de dizaines de personnes qui pourraient autant y vivre qu'y travailler, faisant appel à des industriels et des scientifiques, mais aussi des architectes et des médecins. Urbanisme, habitat, santé, mobilité, hygiène, communication, énergie, logistique, éthique : toutes les problématiques sont couvertes, mobilisant de nombreux acteurs afin de créer un large écosystème européen désireux de contribuer de façon durable et en autonomie aux missions lunaires.

La mission d'Objectif Lune est claire, dans cet appel lancé sur le site de l'ANRT. Sur son site officiel, l'ANRT explique : "*La construction de l'écosystème public-privé « Objectif Lune » repose sur l'adhésion très large à un narratif qui donne du sens sur les plans économique et social, un récit qui mobilise les intelligences et les talents de nos jeunes européens. Le paradigme est devenu bjectif : quelles recherches et innovations pour la Terre peuvent servir le programme Lune et en quoi ce qui sera fait pour la Lune est transposable sur la Terre ?*"¹²

Quand aux objectifs de la colonisation lunaire, Jean-Yves Le Gall¹³ explique que "*L'idée est de mener des études scientifiques qu'on n'a pas eu le temps de faire lors des six missions Apollo, qui n'ont fait que passer. Il y a 50 ans, par exemple, on ne savait pas qu'il y avait de l'eau sur la Lune. Aujourd'hui, on sait qu'il y en a*". Les opportunités sont indéniables, les enjeux sont français, européens et internationaux.

¹¹ [Claudie Haigneré, objectif lune](#)

¹² [Objectif lune](#)

¹³ [2020 : la décennie du retour sur la Lune](#)

La compétitivité scientifique et technologique est cruciale, le retour sur investissement du marché cislunaire et lunaire étant grandissant. Mais, les atouts économiques et technologiques ne feront pas tout. Cet objectif, s'il se veut ambitieux et global, appelle aussi à un *“plan de communication qui emporte la société, qui fasse rêver, s'engager les jeunes cerveaux et qui soit vecteur de nos valeurs européennes dans un environnement international multilatéral”*.¹⁴ L'engouement politique et social sera donc déterminant.

Pour cela, l'aspect éthique est un axe de réflexion et de conduite auquel le programme Objectif Lune tient particulièrement. S'installer sur la Lune, alors même que notre Terre fait face aux dérives de la mondialisation et à une crise écologique indéniable pose des questions, peut même sembler paradoxal pour certains. Les agences spatiales doivent donc mener des missions pionnières mais surtout exemplaires. Il faudra être vigilant quant à l'utilisation des ressources, mettre en place une économie circulaire et appréhender des technologies en circuits fermés pour s'inscrire véritablement dans ce critère de durabilité souhaité par Objectif Lune.

Enfin, Claudie Haigneré résume de façon pertinente la mission Objectif Lune et ses enjeux : *“C'est tout l'enjeu éthique de cette vision globale du village lunaire. Trouver le meilleur équilibre entre des intérêts à la fois politiques, économiques, scientifiques et technologiques, au service du bien commun de l'humanité, tout en respectant les intérêts privés, permettre à tous de travailler ensemble et non pas seulement en tant que nations souveraines. Il faut retrouver le sens du bien commun. C'est un véritable projet de civilisation, inspirant et mobilisateur, pour une voix européenne.”*

C. Méthodologie de l'étude prospective

◆ Description de la méthodologie

Afin de mieux comprendre la construction de cette étude, il est intéressant de revenir sur la méthodologie de prospective utilisée et les différentes étapes suivies pour réaliser ce travail de recherche.

Il existe différentes méthodes de prospective :

1. La méthode Futurable (N. Popiolek)
2. Collaboration avec le CNAM GERPA
3. Fondation pour la Recherche Stratégique (FRS - (prospective/ veille)

¹⁴ <http://www.anrt.asso.fr/fr/objectif-lune-32335>

4. We Do Studios (think tank prospectiviste)

La méthodologie employée pour cette étude est celle de Futurible proposée par Nathalie Popiolek, enseignante chercheuse au CEA. La méthode est détaillée dans son ouvrage *Prospective technologique, un guide axé sur des cas concrets* auquel nous nous sommes référés pour notre travail.

Cette méthode est structurée autour de plusieurs grandes étapes.

- **Le cadrage du sujet et la formulation de la question de prospective technologique**

Il s'agit tout d'abord de cibler le sujet. En effet, il est essentiel de définir, en s'accordant avec le commanditaire de l'étude, cinq éléments constitutifs et décisifs pour le travail à mener : le décideur, l'objet d'étude, les objectifs visés, l'espace géographique concerné et l'horizon temporel auquel se place notre étude. Ces éléments permettront alors de reformuler le sujet et d'aboutir à la question de prospective technologique à laquelle nous répondrons tout au long de notre étude.

Cette étape de cadrage et de contextualisation du sujet a été réalisée dans les paragraphes précédents.

- **Un mapping de variables et la définition de différents sous-systèmes**

C'est ensuite une partie conséquente et minutieuse de l'étude qui se présente au prospectiviste : la construction du mapping de variables. Il s'agit d'un véritable travail de modélisation.

Pour se faire, il est indispensable de définir la **variable coeur du sujet**, qui se révèle être la traduction précise et quantifiée de l'objet d'étude. La variation de cette variable coeur est le résultat d'influences provenant d'une multitude d'autres variables. Il est ainsi question de lister, de façon visuelle, toutes les variables qui influent de près ou de loin sur la variable coeur, en représentant ces liens dans ce que l'on appelle le mapping de variables.

Cette cartographie mentale comporte au centre la variable coeur, entourée de toutes les autres variables qui l'influencent. Ces influences peuvent être directes, autrement dit au plus proche de la variable coeur, ou indirectes, soit éloignées de la variable coeur et considérées comme **variables frontières** permettant de délimiter le système d'étude. Certaines variables sont plus structurantes que d'autres, mais chaque variable doit être quantifiable et donc associée à une unité (par exemple en degré ou en euros).

Toutes ces variables sont classées par **sous systèmes disciplinaires** (exemple : le système technologique ou économique) et elles sont organisées, au delà des degrés concentriques d'influence, autour des différents enjeux de la question traitée.

Une fois le mapping réalisé, l'exercice consiste à produire des **fiches variables** (présentées en [Annexe 3 : Fiches variables](#)) permettant d'approfondir en détails chaque variable. Il s'agit d'une véritable fiche d'identité de la variable comprenant : la définition de la variable, son unité, les acteurs qui exercent une influence sur cette variable, une rétrospective historique de la variable, les risques et incertitudes la concernant et enfin nos projections quant à cette variable.

Le mapping est la pièce maîtresse de l'étude prospective puisqu'elle se reporte constamment à celui-ci. Le mapping permet d'établir les liens entre les différentes variables, de savoir sur quel levier le décideur peut agir (**les variables leviers**) et il aide à la production des scénarios.

- **Une étude des acteurs et du décideur**

La deuxième partie importante de l'étude concerne les acteurs avec la création d'un **tableau des acteurs**. Si le mapping de variables a permis de dégager certains acteurs, l'identification de l'ensemble des acteurs ayant une influence sur le système prospectif repose sur une série de questions à se poser. *Qui sont les acteurs favorables à la technologie ? Qui sont les financeurs, utilisateurs, diffuseurs potentiels ?* Il s'agit alors de répertorier ces acteurs et d'analyser leurs stratégies au sein du système en identifiant leur influence sur les variables identifiées. Cette étape permet d'obtenir un panorama détaillé des parties prenantes et de leurs rôles vis-à-vis de la variable cœur. De la même manière que les fiches variables, cette étape repose sur la réalisation de **fiches acteurs**, pour les plus influents d'entre eux.

C'est une partie importante de l'étude pour le décideur, puisqu'elle lui permet d'identifier les acteurs avec qui il serait stratégique de travailler ou de coopérer pour atteindre ses objectifs.

Ensuite pour apporter une aide stratégique au décideur, le **SWOTTR** vient compléter cette étape de l'étude. Il s'agit de l'outil d'analyse SWOT (Strengths Weaknesses Opportunities Threats) adapté à la méthode de prospective en incluant les **Tendances** et les **Ruptures**. Cette analyse permet d'adapter les propositions stratégiques destinées au décideur par le prisme de ses forces et faiblesses, les opportunités et les menaces intrinsèques à son statut et son secteur, mais aussi par les tendances et les ruptures envisageables à un niveau plus macro. En le croisant avec le mapping de variables et le tableau des acteurs, le SWOTTR participe à identifier les variables constituants des leviers d'action pour le décideur et construire ainsi les stratégies qui s'offre à lui.

A la fin de cette étape, la fondation du travail de prospective technologique selon la méthodologie futurible est construite : la « base » est posée, la structure est créée. Il s'agit à présent de faire rentrer l'incertitude dans notre étude et de passer à l'étape clé de la prospective : la projection du système selon différents scénarios.

- **Une projection du système selon plusieurs scénarios**

Il s'agit dans cette partie, d'établir des scénarios potentiels, réalistes mais aussi futuristes et pionniers, résultant de jeux d'hypothèses autour de nos différentes variables. Finalement on projette le système étudié jusqu'à maintenant, soit la « base » abordée dans l'étape précédente.

Différentes méthodes existent pour la conception des scénarios : les méthodes théoriques, probabilistes, empiriques et exploratoires . Elles permettent toutes d'éviter le risque d'aboutir à des projections dénuées de sens technologique en donnant de la cohérence aux hypothèses.

Cette étape mobilise donc toutes les informations recueillies précédemment. Il faut cependant y intégrer un peu de créativité et un esprit critique pour envisager, des scénarios à la fois envisageables et en rupture. Il est idéal de proposer plusieurs scénarios car l'avenir est pluriel et incertain, mais il faut savoir se restreindre pour qu'ils soient qualitatifs et pertinents pour le décideur.

La construction des scénarios correspond donc à la construction réfléchie et argumentée de futurs possibles afin d'éclairer le décideur.

- **L'aide à la définition de stratégies pour le décideur grâce à des recommandations**

Finalement, toute cette étude de prospective possède un objectif : éclairer le décideur et l'aider à affiner ses stratégies quand à l'objectif visé. Cependant, l'incertitude est grande et identifier des stratégies futures pour le décideur représente un challenge.

Dans cette dernière étape, il s'agit de croiser les stratégies et les leviers d'action à la disposition du décideur avec les scénarios de contexte, afin d'élaborer quelle sera la meilleure stratégie à adopter selon les scénarios possibles.

D'abord, des recommandations pourront être réalisées sur la meilleure stratégie à adopter pour chaque scénario. Puis, il est conseillé de définir, selon l'aversion au risque du décideur, la meilleure stratégie à mettre en place aujourd'hui. Pour cela trois options se présentent :

- Recommander la stratégie qui ressort dans le scénario le plus probable

- Recommander la stratégie qui limite les risques encourus pour le décideur quelque soit le scénario
- Définir une stratégie flexible que le décideur pourra faire évoluer au fil du temps, et à mesure que l'asymétrie d'information sera réduite.

❖ **Rencontres avec les experts & événements**

En complément de la méthodologie proposée par Nathalie Popiolek, nous avons enrichi notre étude et nos recherches avec des entretiens réalisés avec des experts. L'objectif était de cerner au mieux les enjeux relevant de la colonisation lunaire et de l'exploitation de l'eau, mais également de combler le manque de connaissances et d'expertise sur des sujets très techniques pour lesquels il est parfois difficile d'accéder à des ressources. Ces entretiens nous ont donc permis de croiser les avis d'experts du spatial avec des connaissances et expertises sur l'eau, sa filtration et son exploitation, afin d'aboutir à des connaissances sur notre sujet : l'exploitation de l'eau lunaire.

Ainsi, cette étude s'appuie sur les témoignages récoltés auprès de :

- **Christophe Lasseur**, Coordinateur des activités Support - Vie de l'ESA, directeur du projet MELISSA, qui a pu nous éclairer sur son dispositif en circuit fermé et le recyclage de l'eau.
- **Sébastien Straube**, fondateur directeur général d'Interstellar Ventures, qui nous a parlé du financement des projets spatiaux et du développement d'un écosystème autour de l'économie lunaire.
- **Pascal Bultel**, expert des "tendances clés" à long terme à la Direction des Applications, de la Science et de l'Innovation du CNES
- **Philippe Clerc**, référent conformité et éthique d'entreprise ainsi que responsable des affaires juridiques au CNES, qui nous a apporté des notions de droit et d'éthique autour de notre sujet.
- **Roger Ben Aïm**, créateur de l'Institut de la Filtration et des Techniques Séparatives (IFTS) et Président du conseil scientifique de IFTS, qui nous a été d'une aide précieuse pour comprendre les mécanismes de filtration de l'eau.
- **Roland Lehoucq**, astrophysicien au Commissariat à l'énergie atomique, enseignant, auteur et vulgarisateur, qui a contribué à développer l'idée de la technologie "RVFC" et à calculer le coût énergétique de nos technologies et de l'exploitation de l'eau sur la lune

De plus, la participation à diverses conférences a également contribué à affiner nos connaissances sur le sujet. À ce titre, nous pouvons citer deux conférences qui se sont révélées particulièrement intéressantes pour l'étude menée :

- Le colloque « L'Homme en autonomie sur la Lune : quelles opportunités pour les Européens ? », au CNES?, le vendredi 13 décembre 2019 à l'ANRT
- La Conférence *From space to Impact on earth* de l'événement Change Now, le samedi 1er février 2020.

Enfin, nous aurions aimé assister aux deux journées du 13 et 14 mars autour de la construction des récits du programme « Objectif Lune ». Cet atelier organisé par l'ANRT, au sein de l'espace de prospective Léonard, a été reporté en raison du COVID 19.

❖ **Les enjeux de l'application de la prospective au sujet d'étude**

La prospective technologique incarne une étude pertinente à réaliser sur le sujet. En effet, bien que la colonisation lunaire fasse l'objet d'études, il n'en est pas de même pour l'exploitation de l'eau sur la Lune où très peu de travaux ont été réalisés.

Dans un premier temps, la prospective technologique appliquée à notre sujet permet d'observer rétrospectivement où nous en sommes dans la conquête lunaire et de mesurer l'importance de la ressource en eau dans cette dernière. La réalisation d'un mapping de variables permet de modéliser la complexité de l'exploitation de l'eau sur la lune. Il existe de nombreux enjeux aussi bien technologiques et économiques, que politiques, sociétaux et humains. Il s'agit alors d'un challenge de taille pour les institutions spatiales comme pour les gouvernements : une colonisation à construire, à réaliser mais aussi à faire accepter aux citoyens et à notre société. La prospective permet également de mettre en lumière les acteurs pouvant être influents et les points d'attention que le décideur doit prendre en compte.

La seconde partie de l'étude, celle de la projection, permet d'ouvrir les champs du possible et de réfléchir aux différents scénarios pour l'exploitation de l'eau lunaire. Les scénarios de contextes sont construits en fonction des variables et des acteurs identifiés mais ils peuvent également avoir une influence sur ces éléments. Il existe alors un enrichissement rétroactif et proactif entre les deux grandes parties de l'étude de prospective, idéal pour faire face aux challenges auxquels sont confrontés les agences spatiales.

Nous espérons sincèrement et humblement que notre étude pourra les y aider.

CHAPITRE 2 : MODÉLISATION ET ANALYSE DU SYSTÈME PROSPECTIF

1. Présentation du Système

Cette partie de l'analyse vise à expliciter la démarche et le raisonnement qui sous-tendent la construction du système prospectif. L'enjeu ici n'est pas d'analyser toutes les influences opérées par les variables mais d'avoir une vision globale du système ([annexe 1](#)).

La variable coeur de notre système est **la quantité d'eau potable**, en L. Elle représente la quantité totale d'eau potable produite quotidiennement pour couvrir le besoin des 50 personnes de la base humaine à horizon 2050. Cette variable nous permet de couvrir les enjeux d'extraction, de filtration, d'acheminement et de stockage de l'eau. De plus, elle représente un bon indicateur de performance de l'exploitation des ressources en eau sur la Lune. La variable coeur est détaillée en [Annexe 2 : Fiche variable coeur](#).

Nous avons choisi la potabilité comme finesse de filtration car cela permet à notre étude d'intégrer les usages nécessitant de l'eau potable, mais également d'envisager les usages qui se développeront à terme et qui requerront une eau claire et filtrée, non nécessairement potable.

Pour avoir une idée de la quantité d'eau potable nécessaire sur la base humaine lunaire, la Station Spatiale Internationale possède un système de recyclage de l'eau, le Water Recovery System (WRS), capable de recycler jusqu'à 80%¹⁵ de l'eau utilisée et produite par les astronautes. Cela représente environ 6000 L¹⁶ d'eau recyclée par an, produisant environ 14 litres d'eau potable par jour¹⁷ et permettant ainsi de réduire la quantité de réapprovisionnement en eau et autres consommables nécessaires de 6,8 tonnes par an, envoyé depuis la Terre vers l'ISS¹⁸. Sur l'ISS, on distingue actuellement l'eau pour les besoins physiologiques utilisée pour l'alimentation, l'hydratation et l'hygiène personnelle, et l'eau pour les besoins "techniques", soit la production d'oxygène et les expérimentations scientifiques. On peut imaginer que la consommation de l'eau, par individu et pour ces mêmes besoins, sur la base lunaire serait similaire à celle de l'ISS. Ce système a également contribué à ce que deux fois plus de personnes puissent être hébergées à bord, soit un passage de 3 à 6 astronautes.

¹⁵ [ESA - Water in space](#)

¹⁶ [Le recyclage de l'eau à bord de l'ISS](#)

¹⁷ [How Do Astronauts Get Drinking Water on the ISS?](#)

¹⁸ [Water Recovery System, International Space Station](#)

Acheminer de l'eau depuis la Terre vers l'ISS coûte cher, c'est pourquoi les eaux sont recyclées au maximum. Une bouteille d'eau de 50 cl coûterait entre 9 100 et 43 180 \$ à être acheminée jusqu'à l'ISS¹⁹. Par ailleurs, il faut garder à l'esprit que l'ISS se trouve en orbite entre 330-420 km de la Terre tandis que la Lune se trouve à 386 000 km de la Terre. Le coût d'acheminement d'un demi litre d'eau serait donc encore plus élevé, c'est pourquoi il semble pertinent de considérer l'exploitation des ressources in situ, soit l'eau lunaire.

Cependant, il est aujourd'hui difficile de savoir s'il sera possible d'exploiter la glace lunaire à horizon 2050 pour en produire de l'eau claire et potable, indispensable aux besoins d'une base humaine lunaire. La présence d'eau sous forme de glace a été évoquée en 2008 mais confirmée seulement en 2018. Le sujet est donc relativement récent et il possède peu d'antériorité. Il est donc difficile d'établir des tendances et prévisions sur l'exploitation des ressources en eau lunaire.

Par ailleurs, cette problématique fait face à de sérieux challenges scientifiques et technologiques, nécessitant d'importants financements. Le défi est également sanitaire car soumis à un environnement particulièrement hostile, que nous aborderons dans la suite de l'étude, ce qui permettrait de répondre à la problématique mondiale d'accès à l'eau. Finalement, l'exploitation des ressources en eau lunaire répond à une ambition bien plus grande que celle de l'établissement d'une base humaine sur la Lune à horizon 2050. Cette exploitation permettrait de lever des défis terrestres, mais également spatiaux pour aller plus loin dans l'exploration du système Solaire.

Notre système s'articule autour de 6 sous-systèmes. Ces derniers sont à l'origine d'une ou deux variables de résultat conditionnant la variable cœur, à savoir la quantité d'eau potable produit quotidiennement.

- Le sous système vie replace l'humain et l'intérêt de l'exploitation des ressources en eau lunaire au centre de l'étude. Il est à l'origine du **besoin en eau quotidien**, variable résultante des usages, qui vient directement influencer la variable cœur.
- Le sous-système environnement lunaire dresse l'état de l'environnement et rend compte de l'hostilité dans lequel se positionne notre sujet d'étude. La variable résultante de ce sous-système est **la réserve en eau lunaire**, c'est-à-dire la quantité de la ressource qui sera économiquement et techniquement exploitable. Celle-ci vient de fait conditionner la variable cœur.
- Le sous-système technologique rend compte du challenge technologique que représente l'exploitation de l'eau sur la Lune à travers les verrous

¹⁹ Annexe : Calcul du coût d'acheminement d' 1 lb vers l'ISS selon Business Insider, article disponible sur <https://www.businessinsider.fr/us/spacex-rocket-cargo-price-by-weight-2016-6>

technologiques. La variable qui en résulte est **la quantité d'eau filtrée quotidiennement** et elle conditionne la variable coeur car elle rend compte de la capacité opérationnelle du projet.

- Le sous-système économique relève la complexité de l'environnement économique spatiale en abordant notamment les problématiques de financement des programmes spatiaux, les dynamiques du secteur en lien avec celles d'autres secteurs d'activité, ses retombées terrestres ou encore l'ensemble des retombées collatérales résultantes d'une initiative spatiale. Les deux variables résultats de ce sous-système sont le **retour sur investissement (ROI)** et le **coût d'accès à la ressource**. Elles conditionnent la variable coeur car elles traduisent la nécessité de rentabilité du projet (qui n'est pas forcément financière).
- Le sous-système social rend compte de l'importance de l'opinion publique et du soutien politique dans ce type de projet.
- Et le sous-système légal et institutionnel, qui considère les éléments de gouvernance et les normes à prendre en compte dans la réussite du projet. Ainsi le **taux d'adhésion** renvoie à la variable résultat de ces deux derniers sous-systèmes et il conditionne la variable coeur car il rend compte d'une marge de manoeuvre plus ou moins grande.

Nous détaillerons ces sous-systèmes dans la suite de notre étude et vous retrouverez les fiches des variables les plus importantes en [Annexe 3 : Fiches variables](#) .

2. Présentation des sous-systèmes du mapping des variables

❖ Le sous-système VIE

L'exploitation des ressources en eau lunaire est corrélée à la vie humaine. Si le sujet est étudié c'est dans un premier temps pour répondre aux besoins physiologiques de l'homme dans l'espace, avec une volonté progressive de devenir autonome vis-à-vis de la Terre. Parmi les **usages** possibles des ressources en eau lunaire sont identifiés, par ordre de priorité, les suivants : boire et manger (réhydratation des aliments), assurer l'hygiène personnelle, la production d'oxygène, la production d'hydrogène, l'agriculture, et les expérimentations scientifiques. Ces usages viennent influencer le besoin en eau quotidien.

Le sujet de notre étude privilégie les usages indispensables à la vie humaine que l'on ne pourrait assurer sans eau à savoir l'hydratation, l'alimentation et l'hygiène. Si l'on compare avec la Station Spatiale Internationale, les usages extra-terrestres en eau sont très différents de ceux sur Terre car la ressource est limitée. Les habitants de l'ISS

utilisent 0,5L²⁰ d'eau pour une hygiène minimale et il en utilise en moyenne moins de 4 litres²¹ pour se doucher contre 50 litres d'eau pour se doucher sur Terre. Selon Christophe Lasseur²², chercheur à l'ESA, il existe 2 types d'eau : l'eau potable dont le besoin est de 3L par jour et par personne et les eaux d'hygiène dont le besoin est entre 15 et 20 L. Émettant une hypothèse haute, le besoin en eau quotidien pour 50 personnes serait d'environ 1150 L.

La France, au sein de la coalition européenne spatiale, est un des leaders mondiaux sur les sujets de support vie, c'est-à-dire tout ce qui participe à soutenir la vie à moyen et long terme de façon pérenne et sans soutien depuis la Terre. Parmi les projets de support vie, on retrouve notamment Aquapad, une solution permettant d'identifier rapidement si de l'eau est potable dans l'espace. Aquapad²³ a été développée par le CNES en collaboration avec le laboratoire Biomérieux, et la solution a pu faire l'objet d'expérimentation en condition réelle lors de la mission habitée Proxima de Thomas Pesquet. Le projet MELISSA²⁴ (Micro-Ecological Life Support System Alternative) est également démonstratif de l'expertise européenne. Le projet a pour objectif l'étude de systèmes autonomes principalement pour l'alimentation humaine, lors des missions spatiales de longue durée (Lune, Mars).

L'oxygène est également indispensable à la vie humaine mais la production d'oxygène à partir de l'eau lunaire ne sera pas considérée comme une priorité. En effet, d'autres pistes sont étudiées pour produire de l'oxygène à partir de l'environnement lunaire, notamment à partir de régolithe. À ce sujet, l'ESA dévoile en octobre 2019 une technique²⁵ permettant d'extraire l'oxygène de la poussière lunaire avec un bon rendement.

Cette technique d'extraction d'oxygène, tout comme Aquapad ou MELISSA constituent un ensemble de facteurs porteur d'avenir pour l'exploitation des ressources lunaires et plus globalement pour les projets d'exploration spatiale.

Cependant, il ne faut pas oublier que voyager dans l'espace suppose des conséquences physiques, physiologiques et psychologiques liées aux spécificités de l'environnement. Les risques liés à la vie humaine sur la Lune sont donc :

- L'apesanteur ou une pesanteur différente de celle de la Terre : elles peuvent provoquer le mal de l'espace, des conséquences musculo squelettiques, des troubles visuels, une altération du statut nutritionnel, modifier la redistribution des liquides biologiques ou encore.

²⁰ <https://www.esa.int>

²¹ [Water on the Space Station](#)

²² Interview réalisée le 5 février 2020, Paris

²³ <https://presse.cnes.fr/fr/le-cnes-et-biomerieux-prolongent-leur-collaboration-sur-aquapad-outil-unique-devaluation-de-la>

²⁴ [Melissa Foundation](#)

²⁵ [Oxygen and metal from lunar regolith](#)

- Les radiations : les astronautes sont exposés à d'éventuelles conséquences des radiations cosmiques sur leur état de santé.
- Le stress inhérent à un vol spatial : les conséquences sont également psychologiques car les astronautes sont soumis au stress inhérent à un vol spatial. Ils peuvent alors faire l'objet d'une mauvaise adaptation psychologique, des problèmes de sommeil et de rythme circadien, des problèmes de l'interface humain/système, des affections neuropsychiatriques comme un syndrome anxiodépressif.
- Le risque d'intoxication : si les systèmes de filtration et de traitement de l'eau présentent des faiblesses, le risque peut être grands pour les habitants de la base.

Ces éléments posent la question du **profil des habitants** de la futur base humaine lunaire. Seront-ils homologues ou au contraire très différents ? Quel sera l'état de santé des habitants et leur impact sur l'usage de l'eau ? Selon la réponse à ces questions, ces paramètres auront une influence sur le **besoin en eau quotidien** afin de répondre aux enjeux sanitaires. De plus, comme sur Terre, on peut imaginer que les normes sanitaire et de potabilité seront très strictes.

❖ Le sous système Environnement Lunaire

Notre sujet prend place dans un environnement hostile, pouvant avoir une influence sur la finalité du projet. En cela, il nous a paru cohérent d'établir un sous-système Environnement Lunaire, prenant en compte les éléments constitutifs de cet environnement spécifique afin de voir comment les éléments variables peuvent agir sur l'exploitation des ressources en eau lunaire.

Ce sous-système n'intègre pas les contrainte fixes de l'environnement lunaire, qui restent cependant primordiaux dans l'étude de la faisabilité du projet.

Tout d'abord, opérer sur la Lune suppose une gravité à $\frac{1}{6}$ soit $1,622 \text{ m/s}^2$ (0,1654 g) ce qui correspond à faire 3 mètres sur la Lune avec l'énergie d'un pas sur Terre. Cela induit alors de nombreux défis technologiques et modifie les lois de la physique (loi de gravitation, d'attraction, d'écoulement des fluides). De plus, la Lune est soumise à des anomalies de champ gravitationnel²⁶ dues à la présence de mascons (pour mass concentration en anglais), avec des zones où le champ de gravité est plus élevé ou plus faible que la moyenne. En comparaison avec la Terre, cette différence de gravité ne permet pas à la Lune de conserver une atmosphère. Cela explique l'absence de couche d'Ozone à l'origine de l'enveloppe gazeuse nous permettant de respirer et nous protégeant des radiations nocives du Soleil. Cependant, la Lune semble tout de

²⁶ [SciencesActualité Le mystère des anomalies du champ de gravité de la Lune résolu](#)

même disposer d'une fine couche d'atmosphère, composée notamment des atomes de sodium et de potassium mais aussi d'argon et d'hélium.²⁷

Ensuite, la surface de Lune est composée d'une couche de plusieurs mètres d'épaisseur de poussière lunaire que l'on appelle régolithe. Celle-ci provient de la désintégration des roches basaltiques et anorthositiques causée par les impacts continus de météorites et de particules chargées. La poussière lunaire serait ainsi caractérisée de "trésor d'éléments chimiques" selon le géologue Peter Schultz²⁸, en dévoilant une composition riche en oxygène, de sodium, de magnésium, d'aluminium, de silicium, de titane et de fer. Ces éléments constituent plus de 99 % des atomes de la surface mais on peut également y retrouver de l'eau sous forme de cristaux de glace ou la présence de monoxyde de carbone, de dioxyde de carbone (CO₂), de méthane, d'ammoniac, d'argent, d'hydrogène et de mercure.

L'érosion spatiale et les tempêtes solaires rendent les grains de poussière coupants et provoquent des courants électriques dans les roches les rendant chargés. Ces phénomènes produisent également des nanoparticules d'hélium 3 qui pourraient permettre la production d'énergie nucléaire sans déchet grâce à la fusion²⁹. Autres caractéristiques du régolithe, c'est une poussière collante qui s'infiltrerait facilement. Certains de ses composants sont toxiques pour l'homme, tel que le mercure, et l'action des rayons cosmiques rend le sol lunaire radioactif.

Enfin, la période synodique³⁰ de la Lune est de 29,5 jours ce qui signifie que le jour et la nuit lunaires durent 14,75 jours chacun. La Lune est soumise à de fortes variations de température. En effet, en l'absence de rayonnement du Soleil, la température peut descendre à -183°C voire même -238°C³¹ dans les zones qui ne sont jamais exposées au Soleil. Le jour, il peut faire plus de 100°C dans les régions équatoriales et aux latitudes moyennes.

Le sous-système Environnement Lunaire se compose d'une variable frontière qui est la quantité de la ressource en eau lunaire. Cette variable constitue l'une des frontières du système car elle n'est influencée par aucune autre variable. C'est donc une variable d'entrée à notre système. Sur la Lune, l'eau est présente sous différentes formes : solide ou gazeuse. Selon des estimations de la NASA³², des centaines de millions de tonnes d'eau seraient présentes sur la Lune, sous forme de plaques de glace d'une épaisseur pouvant aller jusqu'à plusieurs mètres. Le sous-système se

²⁷ [Sciences Sur la Lune. les pluies de météorites libèrent l'eau du sol](#)

²⁸ [Le sol lunaire dévoile ses richesses](#)

²⁹ [ESA - Helium-3 mining on the lunar surface](#)

³⁰ La période synodique est le temps que prend une planète pour revenir à la même configuration Terre-planète-Soleil

³¹ [Froids records sur la Lune](#)

³² [SciencesActualité La Lune possède plus d'eau que prévu à sa surface](#)

constitue ensuite de 5 variables qui ne dépendent que du contexte s'imposant au CNES : la quantité de ressources autres que l'eau, la composition de la glace lunaire, la température de la glace, les paramètres d'accessibilité incluant : la localisation et la profondeur du cratère. Enfin, la variable résultante de ce sous-système est la **quantité de la réserve en eau lunaire**, soit la quantité d'eau lunaire techniquement et économiquement exploitable.

La quantité de la ressource en eau lunaire va avoir une influence sur le lieu d'exploitation, puisqu'on va chercher à maximiser le résultat de l'effort, et donc sur les caractéristique du cratère considéré, telle que sa profondeur. Ces critères d'accessibilité plus ou moins favorables vont influencer la quantité de la réserve. La réserve influe directement la variable coeur, soit la quantité d'eau potable, et elle peut également avoir une influence sur les usages.

Par ailleurs, la quantité de la ressource peut avoir une influence sur la gouvernance des acteurs vis-à-vis de l'enjeu d'exploitation de l'eau lunaire. On peut imaginer qu'une ressource abondante peut être davantage soumise à la concurrence tandis qu'une ressource limitée peut amener les acteurs à collaborer avec bon sens.

La température et la composition de la glace représentent un défis pour les scientifiques puisqu'elles sont à l'origine des problématiques d'extraction et de filtration. En effet, la formation de molécule d'eau à la surface de la Lune provient de la réaction entre le régolithe et le vent solaire qui sont ensuite piégées dans les cratères des zones d'ombre permanente où la température peut tomber à -250°C . La glace est donc très difficile à casser et elle est mélangée à la poussière lunaire. En cela, les attributs de la glace lunaire influent sur les verrous technologique.

La présence d'autres ressources, avec notamment l'hélium 3, représente de nouvelles opportunités pour l'homme de répondre à ses besoins de manière extra-terrestre ou encore de développer de nouvelle activité économique. Comme évoqué précédemment, l'hélium 3 attire l'attention pour son potentiel de production énergétique propre. Selon le professeur Ouyang Ziyuan³³, chef scientifique du programme chinois d'exploration lunaire (CLEP), la Lune est si riche en He-3, que cela pourrait résoudre la demande énergétique de l'humanité pour environ 10 000 ans au moins. La Chine n'a jamais caché son intérêt pour la ressource et elle a lancé ces dernières années un plan remarquable, non seulement pour se poser sur la Lune dans un avenir proche, mais aussi pour l'industrialiser. Au centre de ce programme se trouve l'intention d'extraire He-3 et de le ramener sur Terre. Cependant, l'exploitation de cette ressource lunaire fait face à des contraintes significatives comme son rendement pour lequel il faudrait extraire 50 000 tonnes de régolithe afin d'obtenir 1 kg d'He-3, ou le verrou scientifique que l'on ne sait pas encore lever quant à la

³³ [China's Helium-3 Program: A Global Game-Changer –](#)

maîtrise de la fusion nucléaire³⁴. Les ressources lunaire font donc l'objet de spéculations économiques fortes pour des utilisations terrestres ou spatiales.

Les risques propres à l'environnement lunaire concernent :

- La disparition des couches de glace sur la Lune : à chaque impact d'une météorite sur la surface de la Lune, des fragments de glace sont projetés et sublimés à la lumière du soleil.
- L'hostilité de l'environnement lunaire : comme évoqué précédemment, la Lune ne semble pas faite pour accueillir la vie humaine. De nombreux défis sont à relever au niveau sanitaire.
- Une guerre des ressources : les ressources lunaires font l'objet d'un grand potentiel économique. Le risque est alors d'assister à une courses aux ressources lunaires dans un climat de tensions internationales.

❖ Le sous-système Technologie

Dans toute étude prospectiviste il est question d'une technologie. Dans le cas de cette étude, nous étudierons non pas une technologie mais un groupement de technologies permettant de répondre à un seul et même besoin : **approvisionner une future base lunaire en eau.**

Pour tenter de comprendre plus précisément le contexte, nous pouvons décomposer cet ensemble technologique en quatre pôles majeurs. Nous avons alimenté cette structure à l'aide d'exemple et de suggestions issus d'entretiens avec des experts (cf chapitre 1).

1) **Pôle Extraction** : il est au contact direct avec la ressource, au fond des cratères. Son rôle est d'extraire une eau sous forme de glace d'une température pouvant aller jusqu'à -200°C. Plusieurs technologies sont envisageables pour l'instant dont :

- Extraction par l'énergie thermique : le but est de fondre la glace, afin qu'elle se sublimer pour la récupérer sous forme gazeuse ou liquide. (exemple en [Annexe 6 : schémas des technologies](#) Figure 1)
- Extraction solide : le but ici est d'extraire la glace sous forme solide puis de la transporter dans un environnement moins hostile pour pouvoir la transformer plus facilement et de manière moins coûteuse. Il peut être envisagé d'extraire cette glace par exemple par des forages ou par détonation.

2) **Pôle Acheminement** : Selon la technologie l'acheminement peut se présenter sous plusieurs formes dont :

³⁴ [Should you invest in Moon Mining?](#)

- Transport par véhicule : envisageable pour l'eau sous toutes ses formes. L'exemple du camion minier de type Caterpillar pour l'eau solide ou d'un rover citerne pour l'eau sous forme de gaz ou liquide.
- Acheminement par réseau de gazoducs/oléoducs : pour l'eau liquide et gazeuse. Ce mode d'acheminement présente des limites en terme d'énergie pour maintenir l'eau dans son état sur tout le circuit.
- Transport-mixte : mode de transport qui combine véhicules et réseau tubulaire. On peut imaginer un transport par véhicule d'une eau solide afin de la dégager des cratères où la température est très basse, afin de faciliter sa transformation dans des endroits moins hostiles.

3) **Pôle Stockage** : Différentes solutions envisageables seront fonction de la bonne gestion de la base mais aussi des variables de ressources en eau, de consommation d'eau de la base, et du coût d'accès à l'énergie. Nous pouvons imaginer dans l'idéal deux stockages pour deux usages différents :

- Stockage sous forme liquide pour l'usage quotidien
- Stockage sous forme solide pour constituer des réserves de sécurité (la question d'une préfiltration pour optimiser l'usage en situation d'urgence est à étudier)

4) **Pôle Circuit fermé** : Ce dernier pôle est le plus avancé sur l'échelle TRL. Pour autant, elle comprend aussi un grand nombre de limites. Nous devons tout d'abord différencier deux usages qui nécessitent un type d'eau différente.

- Usage physiologique premier (boire) : nécessite une eau potable
- Usage d'hygiène : nécessite une eau claire, pas forcément potable "eau d'hygiène"

L'avantage de différencier ces deux usages est la préservation des composants technologiques comme les micro-filtres ³⁵et autres consommables permettant de passer d'une eau claire à une eau potable qui peuvent s'avérer très coûteux. En étant soumis à un débit moins élevé, leur durée de vie sera plus importante. Ainsi le fait de créer plusieurs circuits pour des usages différents permettra d'optimiser le coût et la durée de vie des équipements.

Il est donc envisageable d'avoir un circuit de filtration en plusieurs étapes ([Annexe 6 : schémas des technologies Figure 2](#)) :

- Une première filtration de l'eau après extraction pour la débarrasser de ses impuretés et la rendre claire. Elle devient alors utilisable pour l'usage de

³⁵ [Les innovations pour le traitement et la gestion de l'eau](#)

maintenance, pour l'hygiène corporel et pour les autres besoins physiologiques que l'hydratation.

- Une seconde filtration permettant de rendre l'eau propre à la consommation, durant cette étape il peut être envisagé une minéralisation de l'eau qui dépendra de la composition de l'eau présente sur place.

Etant donné la maturité plutôt faible de cet ensemble technologique (entre les degrés 2 et 3 de TRL pour la plupart et 6 pour la partie circuit fermé), de nombreux verrous technologiques restent à surmonter, il sont détaillés en [Annexe 3 : Fiches variables](#) dans la fiche variable "Verrous technologiques", de même que la maturité de la technologie dans la fiche portant le même nom.

Risques inhérents à la technologie :

- Une technologie énergivore : la technologie doit intégrer une consommation d'énergie soutenable par les installations lunaires
- Perte ou épuisement des ressources : les ressources lunaires sont présentes en quantité bien plus faible que sur Terre. Ce qui implique qu'une exploitation intensive et/ou non contrôlée pourrait épuiser les ressources lunaires.
- Le manque d'efficacité du circuit fermé : si les pertes en eau ne sont pas supportables par l'exploitation des ressources autochtones, il sera envisagé d'importer de l'eau depuis la Terre ce qui peut représenter un coût important.
- Risque sanitaire : il est important de maîtriser le processus de filtration pour maîtriser ce risque

Risque majeur du sous système :

La maturité technologique est au coeur du sous-système. Un trop faible indice de maturité pourrait entraîner une augmentation drastique des coûts de production d'eau potable et donc un frein au développement lunaire.

Le sous-système permet de mettre en évidence les leviers à activer pour lever les verrous technologiques. Nous marquons un lien direct entre la variable « **nombre de publications scientifiques** » très influencée par le sous-système « **ECONOMIE** » et la variable « **verrous technologiques** ».

Il est aussi explicité l'influence de la variable frontière du système « **Maturité technologique** » sur « **puissance énergétique nécessaire** » et les sous variables du groupe « **opérationnel** ».

La variable « **Maturité technologique** » est la plus importante du sous système car elle influence directement la « **quantité d'eau filtrée** »

❖ Le sous système **Économique**

Ce sous-système est, avec le système technologique, l'un des plus conséquents de notre mapping. En effet, lorsqu'on parle de spatial, on parle forcément d'économie, que ce soit par rapport aux retombées économiques incluant les retours sur investissement, l'émergence d'un marché de la "SpaceTech" mais aussi les coûts et les risques économiques. Nous avons donc, dans ce sous-système, plusieurs catégories de variables et d'éléments qui entrent en jeu.

Nous avons tout d'abord identifié des éléments qui portent sur le **coût de production de la ressource**. Le coût d'accès à la technologie est l'une des variables frontières de notre mapping et elle influence directement le coût d'installation et le coût d'exploitation. Toutes deux influencent directement le **coût de production** de l'eau lunaire. Pour produire de l'eau, il faut prendre en compte plusieurs coûts :

- Le **coût d'exploitation** de l'eau, comprenant : Le **coût d'extraction** (extraire la glace du fond des cratères), le **coût de filtration** (rendre l'eau pure et potable), le **coût d'acheminement** (des cratères jusqu'au village lunaire), le **coût de stockage** (au sein de la base pour avoir des réserves de sécurité), le **coût de maintenance et le coût du recyclage de l'eau** (puisque'il s'agirait d'un circuit fermé et que les ressources seraient limitées).
- Le **coût d'installation** de l'infrastructure comprenant le **coût de l'acheminement et du démantèlement** de la structure et de la technologie. En effet, il faudra forcément acheminer certains outils sur la Lune, pour permettre l'installation de structures destinées à l'exploitation de l'eau (même si l'idée est d'en emporter le moins possible et de pouvoir être autonome, grâce à des machines 3D et de régolithe par exemple pour créer des machines directement sur la Lune). Mais il y aura aussi un coût à l'installation, tant au niveau de la main d'oeuvre que des matières premières et technologies utilisées pour mettre en place les dispositifs nécessaires. Enfin le coût de démantèlement, est à prendre en compte dans tout travail prospectif, puisqu'on doit "pré-voir" tous les risques, et donc introduire un possible coût de démantèlement si il fallait démonter l'une des technologies, ou la faire changer d'endroit par exemple, selon les localisations des bases lunaires.
- Le **coût énergétique** lié à l'exploitation : en effet, toute exploitation de l'eau lunaire nécessitera de l'énergie. Il est aujourd'hui difficile de quantifier le coût énergétique de cette exploitation, puisque plusieurs technologies peuvent être mises en place, avec des ressources d'énergie différentes. Cependant, la

différence significative de ce coût repose sur la possibilité de produire de l'énergie in situ. Plusieurs moyens sont évoqués notamment le photovoltaïque qui présente des limites durant la nuit lunaire, ou encore les mini- réacteurs nucléaires ("SMR" cf. partie sur les FPA) qui permettrait une énergie nucléaire à bas coût. Enfin, l'hélium 3 est l'une des sources d'énergie les plus convoitées quand on parle de colonisation lunaire car elle permet de produire de l'énergie nucléaire propre.

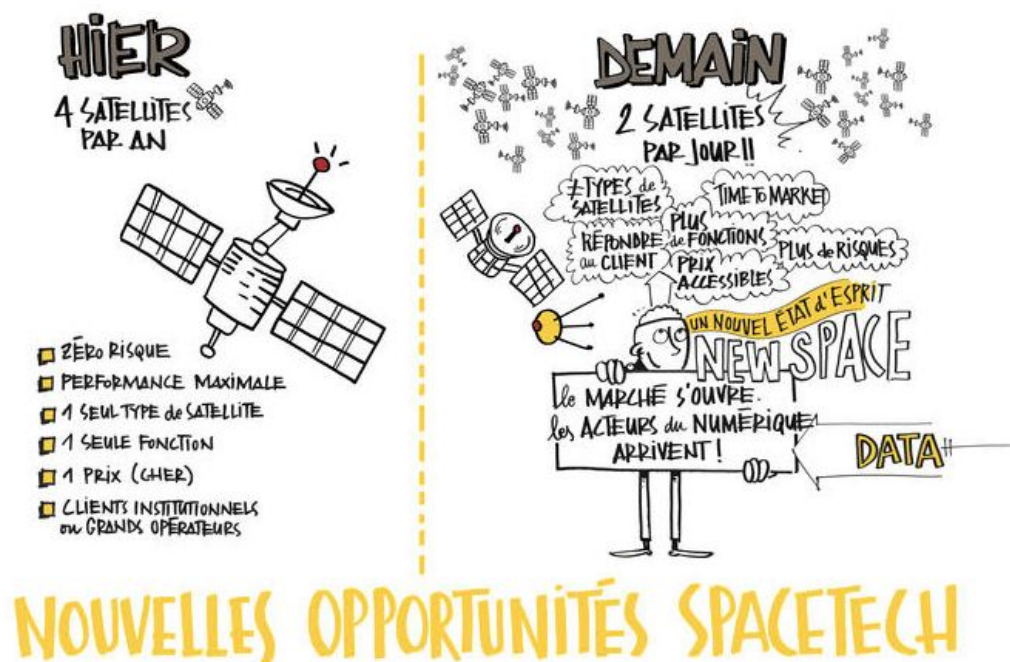
L'aspect financier est également un élément important de la colonisation lunaire. Il comprend les variables d'**investissements publics**, de **financements privés** directement destinés au spatial mais aussi **l'importance du secteur aéronautique et de la défense dans l'économie**. En effet, les données du secteur spatial sont rarement isolées du secteur aéronautique ou de la défense et les études consacrées au secteur sont relativement peu nombreuses. C'est pour cela que nous avons choisi d'intégrer dans ce système **le poids du secteur aéronautique et de la défense** dans l'économie (en %) puisque cette donnée influencera le budget alloué au spatial.

Ce sous-système considère également la tendance et fait porteur d'avenir du New space, c'est à dire cet **engouement pour une nouvelle « économie lunaire »**, un business lunaire qui influe sur la **présence d'entrepreneurs spatiaux**. Le New Space désigne une ouverture du secteur spatial à de nouveaux acteurs ainsi qu'une "extension du champ d'application des technologies spatiales".³⁶ Cette tendance a notamment démarré aux Etats-Unis, avec l'inclusion dans le cadre juridique et législatif, d'activités spatiales de nature commerciales. Ainsi, l'accès à l'espace, auparavant réservé aux Etats et aux agences spatiales des grandes puissances mondiales est devenu plus aisé et donc très attractif. Les GAFA et de nombreuses entreprises de la Silicon Valley se sont emparés du sujet faisant bénéficier au secteur traditionnel du spatial d'innovations et technologies nouvelles, issues de domaines pionniers comme celui de la Big Data, par exemple.³⁷

On observe alors un développement de ce qu'on pourrait également appeler la « SpaceTech » ou même la " Moon Tech", c'est à dire le développement de startups, de business, de technologies autour respectivement de l'espace et de la Lune. On voit, en effet, l'apparition d'une certaine **concurrence** sur ces marchés. Une concurrence intégré comme variable dans le mapping, puisque cette concurrence peut avoir une influence sur les aspects technologiques. En effet, nous pouvons observer une hausse du **dépôt des brevets**, dans cette filière du spatial qui devient un terrain fertile d'innovations. On constate par exemple, que Bpifrance finance beaucoup d'acteurs du spatial et investit dans les entreprises clés du marché, montrant un réel potentiel d'innovation et un investissement d'avenir.

³⁶ [Définition | New Space](#)

³⁷ <https://cnes.fr/fr/media/new-space-les-nouveaux-acteurs-du-spatial>



Source image : Bpifrance.fr , "Demain: Les promesses du New Space"

Enfin, une attention est portée aux **retombées terrestres** potentielles du secteur spatial qui peuvent être directes ou indirectes. Elles désignent les avantages économiques, sociaux, technologiques et même environnementaux que la conquête spatiale, la colonisation lunaire et l'exploitation de l'eau sur la Lune peuvent apporter à la vie sur Terre. Les retombées sont généralement d'ordre **économique**. Récemment, la commissaire européenne à l'Industrie Elzbieta Bienkowska estimait qu'1 euro investi dans l'espace rapportait 7 euros à l'économie. La Commission européenne estime d'ores et déjà que 6% du PIB de l'Union européenne dépend directement des technologies utilisées dans l'industrie spatiale.

Mais les retombées sont également **technologiques**. En effet, le soutien public à l'industrie spatiale est un investissement pour l'avenir. Par exemple, la prouesse technologique qu'est le système Galileo³⁸ fournira demain la précieuse data qui donnera un avantage comparatif aux entreprises européennes face à la concurrence internationale, c'est-à-dire la croissance économique et la création d'emplois. De plus, selon les scientifiques, l'objectif des expériences réalisées par Thomas Pesquet dans la Station Internationale Spatiale réside dans les retombées terrestres. Ainsi, le dispositif Aquapad³⁹, intéressant pour notre étude puisqu'il s'agit d'un outil de diagnostic de l'eau, a été conçu pour une utilisation en cas de catastrophe afin de vérifier qu'une source d'eau est potable. Les nouvelles surfaces intelligentes face aux bactéries Matiss, quant à elles devraient permettre à terme de concevoir des

³⁸ [Les retombées terrestres de l'Europe spatiale](#)

³⁹ [Les retombées bien terrestres du travail de Pesquet dans l'espace](#)

matériaux moins sensibles aux contaminations bactériologiques à utiliser dans les lieux publics, ce qui serait fortement appréciable et pertinent pour lutter contre la propagation d'une épidémie comme le coronavirus.

Enfin, les retombées terrestres sont une variable très influente, puisqu'elles peuvent également comprendre des **retombées écologiques**. En effet, la colonisation lunaire est vue comme une bonne opportunité d'innover sous contrainte et de créer des technologies « low tech » ou de pointe qui pourraient être réutilisables sur Terre. Ces dernières s'inscrivent plutôt comme des dispositifs en faveur de l'écologie, puisqu'elle peuvent permettre de trouver des solutions pour pallier à la crise climatique et environnementale.

Les risques propres au sous-système économique sont :

- Le fait que l'intérêt et le budget dédié à l'aéronautique ou à la défense soient réévalués et réduits (avec la crise du coronavirus par exemple) dans le budget public.
- Que l'engouement pour le business lunaire de la part des entrepreneurs et des structures privées s'amointrisse avec le temps, par faute de faible demande ou de faible faisabilité technologique.
- Que des coupes budgétaires soient réalisées dans le budget consacré à la recherche.
- Que le coût de production et d'exploitation de l'eau sur la Lune soit supérieur au coût d'acheminement de l'eau depuis la Terre, et donc que l'engagement ne soit plus favorable ni souhaitable par les acteurs privés mais aussi publics.
- Que le coût énergétique lié à l'exploitation soit trop conséquent, représentant alors un obstacle à la production d'eau potable sur la Lune

❖ Le sous système **social**

Le sous-système social permet de rendre compte des éléments sociodémographiques et psychologiques qui peuvent freiner ou soutenir le développement de la colonisation lunaire et donc de l'exploitation de la ressource en eau sur la Lune.

L'engagement politique en faveur de la colonisation lunaire peut amener à une réduction de la **proportion de personnes hostiles** aux projets spatiaux. Cette proportion en est donc résultante et elle correspond au pourcentage de la population n'adhérant pas aux valeurs de la colonisation lunaire et refusant sa réalisation, de manière passive ou activiste.

Plusieurs **facteurs d'hostilité** existent déjà ou peuvent survenir dans le futur. On entend par là les différents éléments qui peuvent pousser les individus à se

positionner contre la colonisation lunaire. L'hostilité envers la colonisation spatiale porte principalement sur des raisons économiques, écologiques et sociales. On peut citer par exemple des dépenses considérées comme colossales en comparaison à une utilité perçue comme faible ou encore l'absurdité de coloniser la Lune alors que l'humanité est d'ores et déjà à l'origine de problèmes environnementaux terrestres. Il existe en effet une **distance psychologique** forte entre les futurs colons lunaires et les citoyens actuels, pour qui il est difficile de comprendre les enjeux des programmes spatiaux. De plus, certains défenseurs de la colonisation spatiale tel que Mars Society pensent que coloniser la Lune serait plus difficile que coloniser Mars, et que concentrer les ressources sur une colonisation lunaire serait retarder le programme de colonisation tout entier. D'autres groupes comme la National Space Society et la Moon Society voient au contraire la Lune comme un premier pas logique, avec par exemple la possibilité d'utiliser la fusion nucléaire comme source d'énergie propre à partir de l'hélium 3 extrait sur la Lune, qui serait une justification économique de l'implantation d'une base lunaire. En effet, coloniser la Lune est souvent présenté comme le moyen de perfectionner un système de support vie de longue durée et autonome, indispensable pour la colonisation ou l'exploration spatiale au long terme. Ce laboratoire serait situé près de la Terre pour permettre l'envoi de ravitaillement ou d'assistance dans un délai raisonnable.

Pour l'instant, l'ESA a recueilli 150 signatures favorables à la construction de la base lunaire, le but étant de résoudre la question des moyens et des partenaires scientifiques. Il leur a également été demandé de participer à une étude dont le but était d'évaluer leur degré d'implication dans le cas où un tel projet serait mené.

En outre, l'un des éléments principaux qui ressort lorsqu'on étudie les risques, les ruptures potentielles et les faits porteurs d'avenir au niveau sociétal est l'**écologie**. En effet, elle peut constituer à la fois un frein pour la colonisation lunaire mais aussi un accélérateur à l'engouement et au taux d'adhésion à ces projets. On pourrait penser que les activistes et militants écologiques sont, de fait, contre et hostiles. Cependant deux courants écologistes semble se dessiner:

- Les écologistes accordant la priorité à notre Planète Terre sont hostiles à la colonisation lunaire, qui serait "un gâchis inutile" et l'occasion de "polluer et refaire les mêmes erreurs que sur la Terre" car cela impliquerait une exploitation des ressources lunaires.
- Un courant écologiste voyant plutôt les avantages que pourrait lui apporter la tentative de colonisation lunaire. Le développement de la vie dans un environnement "sous contraintes" développerait des technologies, des innovations et des infrastructures qui pourraient être répliquées sur Terre. Cela permettrait de trouver des solutions pour pallier à notre crise écologique. La

Lune serait alors un laboratoire d'innovations durables au service de notre propre transition écologique.

Il semblerait finalement que le débat social et sociétal soit fracturé entre :

1. Ceux qui pensent que coloniser la Lune est un progrès, en repoussant les limites de la connaissance, de la science et de la technologie (les partisans de la colonisation lunaire)
2. Ceux qui ne voient pas l'utilité de coloniser la Lune car il y a des préoccupations écologiques plus importantes sur Terre, ce qui devrait être la priorité (les individus hostiles)
3. Ceux qui considèrent la colonisation de Mars plus importante, et la Lune comme une étape ou un frein à cette conquête de Mars (les individus mitigés)

Ainsi, l'adhésion ou l'hostilité au projet évoluera en fonction des travaux et projets concrets et réalisables autour de cette colonisation lunaire. La distance psychologique des citoyens face à ce projet ambitieux doit être réduite et les avantages économiques d'une économie lunaire doivent être prouvés pour espérer accroître le **taux d'adhésion** à la colonisation spatiale et la diminution du taux de personnes hostiles. L'engagement politique est donc primordial.

Par ailleurs, les **externalités négatives** (par exemple l'accaparement des ressources lunaires, coût énergétique, pollution lunaire) et les **externalités positives** (par exemple les recherches scientifiques et avancées technologiques au service de la transition écologique terrestre) de l'exploitation de l'eau sur la Lune et de la colonisation lunaire en général, vont avoir des effets respectivement sur le **boycott** et **le lobbying**. Ainsi l'engagement politique sera soit très fort et expansif, permettant d'avoir des financements, de réduire la **distance psychologique** des citoyens vis à vis de la colonisation lunaire. Ils y adhéreront alors plus facilement. Soit, l'engagement politique sera beaucoup plus faible, voire inexistant, et cela mettrait alors en échec la conquête lunaire (manque de soutien institutionnel et financier) et soutiendrait les facteurs d'hostilité pouvant être déjà présents dans les esprits.

Enfin, une dernière variable importante, et frontière, est également la **démographie**. En effet, croissance de la démographie peut avoir une influence sur la volonté de coloniser la Lune pour y faire vivre des habitants, ou pour exploiter de nouvelles ressources. La population mondiale, actuellement estimée par les Nations Unies à 7,7 milliards de personnes, devrait atteindre 8,5 milliards d'habitants en 2030 et 10 milliards en 2050. De quoi peut-être se poser la question d'envoyer au moins une cinquantaine d'hommes sur la Lune en 2050 pour faire face aux différents défis de notre siècle.

Les risques propres au sous-système social et politique sont :

- Le manque d'engouement politique et institutionnel pour des projets lunaires développés par la communauté scientifique.
- Le risque "collapsologue" , d'une menace planétaire ou d'un désastre humanitaire provenant d'une catastrophe écologique ou d'un virus, comme nous le montre la crise actuelle du coronavirus, qui freinerait ou anéantirait les ambitions politiques en ce sens.

❖ Le sous système **légal institutionnel**

Le domaine du légal est d'autant plus important dans une étude de prospective, qu'il est question du secteur spatial. En effet le projet de colonisation lunaire soulève plusieurs questions dont les enjeux de réglementations d'une économie spatiale encadrant notamment les statuts d'entreprise, les partenariats, ou encore la responsabilité. Le droit spatial comme il doit être envisagé à horizon 2050 n'en est encore qu'à ses balbutiements, et la participation des entreprises et autres organismes de recherche sont importantes pour faire avancer la doctrine. Certains leviers comme les initiatives en faveur du spatial (hackathon, challenge) ou des groupes de réflexions mêlant acteurs publics et privés sont à mettre en place dans cette perspective.

La question de gouvernance est centrale à ce sous-système. La construction de partenariats publics-privés et de partenariats entre États permettent de contrôler différents aspects de l'exploitation dont l'aspect **technologique** et l'aspect **économique** qui sont liés en certains points. Ces partenariats représentent le plus gros risque de ce sous-système.

Si les ressources présentes sur la lune peuvent influencer la direction que vont prendre les politiques, le cadre initial de gouvernance sera un levier majeur dans la conquête lunaire. Une entente entre gouvernement sur le modèle ISS permettra la mutualisation des efforts de recherche et donc un partage des coûts d'accès et une plus grande chance de succès de développement des technologies. En revanche, un contrôle non maîtrisé des acteurs privés entraînera systématiquement une instabilité des coûts de fourniture énergétique, et d'accès aux technologies impactant directement le coût d'accès à l'eau, les différents ROI et donc notre variable coeur : **la quantité d'eau potable extraite.**

3. Ruptures envisageables et Faits Porteurs d'Avenir (FPA)

Il convient également d'identifier, en plus des risques pesant sur chaque variable et chaque sous système, des risques généraux, des ruptures envisageables ou des

tendances lourdes ainsi que des Faits Porteurs d'Avenir (nommés FPA, dans la méthode de Nathalie Popiolek).

a. Repérage des tendances lourdes

Il s'agit également d'identifier les tendances lourdes qui, si elles continuent de se développer seraient susceptibles de démocratiser la colonisation lunaire, et de favoriser l'exploitation de l'eau lunaire .

Les tendances lourdes que nous avons identifiées sont :

- **La perception de la Lune comme un hub de l'exploration spatiale** : Effectivement, la Lune devient dans les esprits la nouvelle station spatiale, pour découvrir, expérimenter, tester, prouver. Jean Yves Le Gall le confirme dans une interview à France Culture, en déclarant que *"L'Agence spatiale européenne (ESA) est l'un des principaux partenaires de la Station spatiale internationale et, dans la mesure où l'exploration lunaire a vocation à succéder à la station, ce sera un peu le même principe"*.⁴⁰
- De cette vision, découle une autre tendance. En effet, la **l'exploration lunaire est perçue comme une étape transitoire pour aller sur Mars**, la Lune comme une sorte de sas, d'aéroport de transit entre le Terre et Mars : *"On s'est rendu compte que finalement, le meilleur moyen de se préparer à aller sur la planète rouge, c'était de s'entraîner sur la Lune. C'est pour cela que les États-Unis ont lancé le fameux programme Artemis. À terme, Artemis a pour vocation de prendre le relais de la Station spatiale internationale (ISS), dont la "retraite" devrait arriver vers 2030.. Artemis prévoit d'ailleurs le lancement d'une nouvelle station : Gateway, mais qui serait cette fois en orbite autour de la Lune et plus autour de la Terre. Gateway serait aussi une station pérenne, avec présence humaine régulière voire permanente, comme la base lunaire au sol, qui doit aussi voir le jour"* déclare ainsi le Président du CNES.⁴¹
- Enfin, la tendance majeure est **celle de l'ouverture d'un nouveau marché par l'accès à de nouvelles ressources** (astéroïdes, minéraux lunaires et autres) comme on le voit avec la notion de **"New Space" et l'émergence d'une économie lunaire**. La Lune est perçue comme un trésor rempli de ressources naturelles garantissant de fait des sources de revenus économiques. Par ailleurs, l'économie du New Space fait de la donnée spatiale, comme on l'a vu plus haut avec l'introduction de la Big Data par exemple, un produit à forte valeur ajoutée. Cette donnée spatiale permet de développer de nombreuses applications et services commerciaux intensifiant l'économie spatiale. Réciproquement, l'économie New Space bénéficie énormément des progrès technologiques (miniaturisation des composants, impression 3D et robotique

⁴⁰ <https://www.franceculture.fr/sciences/2020-la-decennie-du-retour-sur-la-lune>

⁴¹ <https://www.franceculture.fr/sciences/2020-la-decennie-du-retour-sur-la-lune>

que nous allons étudier ci-dessous dans les faits porteurs d'avenir) et “des transferts de technologies insufflées par les agences spatiales et les partenariats public-privé.”⁴²

b. Les Faits Porteurs d'Avenir

Les Faits Porteur d'Avenir correspondent à des « *faits infimes par leurs dimensions présentes mais immenses par leurs conséquences virtuelles* » (P. Massé).

Nous avons identifié les suivants :

- **La Miniaturisation des technologies de l'espace**

Les coûts de lancement des satellites ont toujours été, et restent aujourd'hui, très élevés. C'est pour cela, qu'aujourd'hui, seuls les organismes nationaux, les agences spatiales, ou les grandes entreprises ont accès à l'espace. (le coût de la mise en [orbite basse](#) d'un kilogramme est en 2014 généralement compris entre 8 000 et 12 000 € (10 000 et 15 000 US\$⁴³) Mais la réduction de la masse des satellites pourrait faire changer les choses et se présente comme une véritable rupture dans le domaine spatial. En effet, diminuer la taille des satellites apporte plusieurs avantages. Les “nano-satellites” permettent une certaine praticité, puisqu'ils facilitent la réalisation de mission ponctuelles et ciblées qui ne nécessitent pas obligatoirement le lancement d'un “gros satellite”. Cela permet donc de faire des économies financières comme énergétiques (la production peut mobiliser jusqu'à 30 % de la masse d'un engin spatial.) L'objectif de la miniaturisation est donc de réduire le coût d'accès à l'espace pour des applications à des fins scientifiques ou de grand public. Réussir à envoyer de tels objets dans l'espace et à les utiliser comme des satellites est une révolution qui permettrait d'avoir une flotte de satellites moins encombrante et moins coûteuse. C'est alors la voie d'une démocratisation de l'accès à l'espace. Différents projets sont déjà développés et nous font penser qu'il s'agit d'un réel fait porteur d'avenir. Le CNES a, par exemple, lancé en 2017, la plateforme modulaire ANGELS pour nano-satellites de format Cube Sat.⁴⁴ Cube Sat désigne un format de nano-satellites utilisant un standard de taille appelé 1Unité ou 1U pesant entre 1 et 10 kg développé en 1999. Leur faible coût de production permet d'industrialiser leur fabrication afin de lancer des constellations de nanosatellites et de répondre ainsi à différents besoins : l'application de veille météorologique, l'optimisation de méthodes agricoles, la transmission d'informations pour les transports connectés et les smart cities,etc.. Plus de 3 000 CubeSats devraient être lancés dans les 6 prochaines

⁴² [Définition | New Space](#)

⁴³ [Miniaturisation des satellites](#)

⁴⁴ <https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/content/-/article/angels>

années alors que [2 400 ont été lancés depuis 1998](#).⁴⁵ Un véritable marché émerge des Cube Sat, mêlant universitaires, startups et grands groupes privés et publics. Ainsi, avec l'émergence de nouveaux acteurs comme [OneWeb](#) et SpaceX, « la production des satellites est passé d'un processus horlogeries fines à un processus de production haute cadence » explique Abdelkader Berkane-Kracha.⁴⁶

- Dans la même logique, **le développement des “petits réacteurs modulaires”**, ou SMR pour Small Modular Reactors, une catégorie de [réacteurs nucléaires à fission](#), de taille et puissance plus faibles que celles des réacteurs conventionnels, permet également de diminuer le coût de l'énergie nucléaire et pourraient être une solution envisageable sur la base lunaire. L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) a recensé une cinquantaine de projets de “SMR” à travers le monde dont seulement trois sont opérationnels. L'un d'eux est le SMR dénommé "NUWARD", projet porté par un consortium réunissant EDF, le CEA, TechnicAtome et Naval Group, qui a été présenté le 17 septembre 2019 à la conférence générale annuelle de l'AIEA. On note également, l'exemple de Kilopower⁴⁷, un mini-réacteur à fission très simple qui a passé avec succès toute une série de tests (au sol) entre novembre 2017 et mars 2018 au Glenn Research Center de Cleveland. Jim Reuter de la NASA déclarait au sujet de cette technologie : “La clé des explorations humaines et robotiques du futur, c'est de l'énergie abondante, efficace et sûre. Et je m'attends à ce que le Kilopower soit un élément essentiel de l'architecture énergétique lunaire et martienne.” Ce réacteur permet également de limiter les déchets nucléaires grâce à son design intégré.
- **Centrales solaires orbitales** : La Chine a également pour ambition de construire une centrale solaire orbitale, afin de capter des rayons du soleil qui n'atteignent jamais la Terre. Ces rayons seraient ensuite renvoyés par micro-ondes vers la Terre. On peut s'imaginer que cette station spatiale pourrait être répliquable sur la Lune, même si le soleil y est évidemment absent pendant toute la nuit lunaire.⁴⁸

- **Baisse des coûts de lancement & recyclage des lanceurs**

Le 30 mars 2017, Space X, montrait qu'il était possible de réutiliser et donc de “recycler” un lanceur en mettant en orbite un satellite au moyen d'un lanceur Falcon 9, dont le premier étage avait déjà servi. « En théorie, la réutilisation doit contribuer à réduire le coût de l'accès à l'Espace, où les fusées seraient entretenues comme le

⁴⁵ [Les CubeSats, un exemple d'innovation low cost dans l'industrie spatiale](#)

⁴⁶ [Demain: les promesses du New Space](#)

⁴⁷ https://www.youtube.com/watch?time_continue=36&v=DcdfMciUy_U&feature=emb_logo

⁴⁸ [Énergie : bientôt des centrales solaires dans l'espace ?](#)

sont les avions entre chaque vol. expliquait alors Maxime Puteaux, analyste d'Euroconsult, cabinet spécialisé sur l'industrie spatiale.⁴⁹ En 2019, Space X continuait le développement du recyclage des lanceurs spatiaux en envoyant 60 nouveaux satellites en orbite grâce à un lanceur Falcon 9 déjà utilisée pour 3 missions de mise en orbite de satellites commerciaux. Enfin, Elon Musk a déclaré en 2019 que Space X développait une fusée réutilisable, qui sera opérationnelle en 2022 : la fusée Starship.

Cette émergence de technologies permettant le recyclage des lanceurs permet de réduire les coûts de lancement, et donc des missions et expéditions spatiales en général. La compétition dans le secteur spatial a donc pris une ampleur commerciale : on parle aujourd'hui du New Space.

- **La Recherche de matières premières et de ressources spatiales et lunaires**

La recherche de matières premières dans l'Espace se concrétise depuis plusieurs années, notamment depuis 2009, avec la création de la société "*Planetary Resources*", qui a pour objectif d'exploiter les ressources du système solaire et l'Obama Space Act en 2015, qui autorise l'exploitation des ressources spatiales par des acteurs privés. Le Luxembourg a également autorisé cette exploitation dans une loi promulguée en 2017.⁵⁰

La Lune n'échappe pas à cette logique puisqu'elle détient de nombreuses ressources intéressantes. C'est le cas notamment de son potentiel énergétique . En effet l'environnement lunaire est très riche, on note notamment la présence d'hélium 3 mais aussi la présence de régolithe lunaire qui servirait de matière première aux imprimantes 3D chargées de produire les éléments de construction de la base, ou qui permettrait également de produire de l'oxygène.⁵¹ La face cachée de la Lune est également une "ressource" en elle même, puisque c'est un espace protégé de la pollution électromagnétique dépourvue d'atmosphère, qui bloque les plus grandes longueurs d'onde. Il s'agit donc d'un endroit idéal pour capter les ondes radio de basse fréquence. *D'après le cosmologue anglais Joseph Silk « C'est la seule manière de détecter certaines empreintes faibles laissées par le Big Bang sur le cosmos. Nous avons besoin de ces signaux pour savoir si et comment l'Univers s'est gonflé rapidement au premier milliardième de milliardième de milliardième de seconde après le Big Bang. ».*⁵²

Cette recherche de matière première dans l'Espace mais aussi sur la Lune est donc un fait porteur d'avenir, cependant il ne faut pas oublier que ces initiatives posent la

⁴⁹ [SpaceX ouvre la voie au recyclage des lanceurs spatiaux](#)

⁵⁰ [Y'a t'il des ressources exploitable sur la Lune](#)

⁵¹ [On sait enfin comment extraire l'oxygène du sol lunaire \(et ce sera utile pour les futures missions\)](#)

⁵² <https://www.nature.com/articles/d41586-017-08941-8>

question du droit spatial et international. En effet, dans le texte de référence en droit spatial, le *Traité de l'espace de 1967*, il est clairement inscrit que l'on ne peut ni s'approprier ni exploiter à des fins privées un corps céleste, considéré comme bien commun de l'humanité. ". Pourtant le Traité sur la Lune de 1979 prône quant à lui la nécessité d'un régime international pour l'exploitation de la Lune et autres corps célestes, cependant ce Traité n'a pas été ratifié par les grandes nations spatiales.

- **Tourisme et transport spatiaux**

Le tourisme spatial, c'est " l'activité touristique qui regroupe l'ensemble des expériences, entraînements, vols à sensations, qui permettent à des personnes d'aller dans l'espace pour des motifs non professionnels."⁵³En effet, depuis les premiers vols habités, il existe une fascination autour du "voyage dans l'espace", réservé jusqu'alors à une certaine élite scientifique : les astronautes.

Pourtant c'est l'Agence spatiale Russe, qui dans une optique de recherches de revenus et de ressources a lancé pour la première fois la possibilité pour des clients extrêmement fortunés de pouvoir "faire un tour dans l'espace". Effectivement, il existe deux types de vols : "le séjour en orbite dans la Station spatiale internationale qui nécessite un très long entraînement et le vol suborbital qui consiste à passer quelques minutes à une altitude supérieure à 100 km, relativement moins coûteux et contraignant." C'est sur ces derniers que le tourisme spatial se base notamment. En 2005, l'idée d'une relative "popularisation" de l'accès à l'espace émerge, lorsque Virgin Galactic propose au grand public d'effectuer des vols jusqu'à une altitude de 100 km. Aux Etats-Unis, un aéroport est même dédié à cette activité dans le désert du Nouveau-Mexique. On notera, cependant, qu'en 2014, le crash du vaisseau spatial SpaceShipTwo de Virgin Galactic, faisant un mort et un blessé grave, a quelque peu éclaboussé le tourisme spatial. Mais, ce dernier reste un fait porteur d'avenir de grande ampleur lorsque l'on observe que depuis, d'autres sociétés se sont spécialisées dans ce secteur. C'est notamment le cas de Blue Origin de Jeff Bezos par exemple ou encore Space X d'Elon Musk qui a annoncé cette année vouloir emmener des touristes dans l'espace, en orbite d'ici 2022, et à bord de l'ISS pour le premier voyage prévu pour 2021.

Le coût facturé sera d'environ 35 000 dollars par nuit et par astronaute, selon Jeff DeWit. ⁵⁴Enfin, Boeing et SpaceX commercialiseront eux-mêmes leur service de transport spatial dont chaque vol sera facturé environ 58 millions d'euros, hors promotion.

- **"Space as a service"**

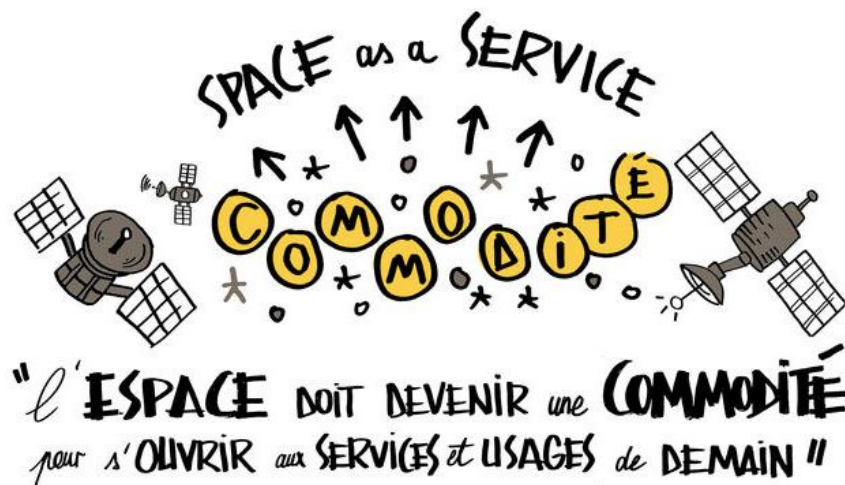
Ainsi, avec cet essor du tourisme spatial et du New Space qui traite de façon

⁵³ [Tourisme spatial](#)

⁵⁴ [La NASA va louer l'ISS à des touristes](#)

commerciale la donnée spatiale via des applications numériques par exemple, on observe un renversement du secteur spatial. Auparavant basé sur un modèle industriel, celui se tourne de plus en plus sur un modèle tourné vers une économie des services. On identifie alors un fait porteur d'avenir conséquent : le développement de l'espace en tant que service, ce qu'on appelle également la conception du « *Space as a Service* ».

La Banque Publique d'Investissement (BPI) a même consacré un article à cette tendance, dans lequel elle conclut que « l'espace doit devenir une commodité pour s'ouvrir aux services et usages de demain ».⁵⁵



Source image : Bpifrance.fr, "Demain : Les promesses du New Space"

- **Imprimantes 3D dans l'espace**

L'impression 3D, déjà fortement adoptée par les industriels, suscite depuis plusieurs années un fort engouement de la part des agences spatiales, qui ont multiplié les appels à projets à destination des acteurs privés.

L'ESA a, par exemple, imprimé en 3D une série d'objets à partir d'un simulant de régolithe lunaire, principalement des petits engrenages, des vis, etc.⁵⁶ Mais la fabrication additive, autre appellation de l'impression 3D, n'est pas limitée aux objets de petites dimensions.

⁵⁵ [Demain: les promesses du New Space](#)

⁵⁶ [L'impression 3D de régolithe lunaire, un moyen de conquérir la Lune?](#)

En effet, l'ESA s'intéresse de près à l'impression 3D afin d'utiliser et de transformer les matières lunaires disponibles sur place pour la construction des habitats lunaires⁵⁷, plutôt que d'apporter des matériaux depuis la Terre afin d'alléger au maximum les embarcations à destination de la Lune.

On note par exemple, l'existence du projet RegoLight, dont le but est de confectionner des briques de régolithe de 20 cm de long, 10 cm de large et 3 cm d'épaisseur en seulement cinq heures grâce à l'énergie de la lumière du soleil qui chauffe le régolithe. « *Nous avons pris de la matière lunaire simulée [en l'occurrence, de la roche volcanique traitée de façon à imiter la composition et la granularité du régolithe, NDLR] et nous l'avons cuite dans un four solaire. Cela a été fait sur une table d'impression 3D pour cuire des couches successives de 0,1 mm de poussière lunaire à 1.000 °C* ». explique Advenit Makaya qui supervise le projet pour l'ESA. ⁵⁸ L'impression 3D intéresse également la Station Spatiale Internationale qui a élaboré avec Made in Space, la première imprimante 3D capable de fonctionner en apesanteur.⁵⁹

⁵⁷[Bientôt un abri lunaire construit avec une imprimante 3D ?](#)

⁵⁸[Bientôt un abri lunaire construit avec une imprimante 3D ?](#)

⁵⁹[Une nouvelle imprimante 3D à bord de la Station Spatiale Internationale?](#)

CHAPITRE 3 : TABLEAU DES ACTEURS ET OBJECTIFS DU DÉCIDEUR

1. Panorama des acteurs du système

L'objet de cette partie est d'étudier les acteurs qui influencent ou vont influencer la plupart des variables identifiées.

Nous avons donc mis en évidence quatre grandes catégories d'acteurs. A noter que ces acteurs peuvent tenir différents rôles mais dans un soucis de pertinence nous ne retiendrons que leur rôle principal. Il subsiste tout de même une poignée d'entre eux qu'il est nécessaire de classer dans différentes catégories, leurs activités dans chacune d'entre elles pouvant être prise de manière distincte. Nous avons donc classés ces acteurs dans les catégories scientifique, marché, politique et communication. Nous avons réalisé en [Annexe 4 : Fiches acteurs](#) une fiche détaillée pour chacune de ces catégories.

Acteurs scientifiques	Acteurs de marché	Acteurs politiques	Acteurs de communication
Communauté scientifique <ul style="list-style-type: none"> ● Université ● instituts de recherche 	Industriels (fabricants, sous traitants, techniciens, complémentaires, exploitants) Acteurs financiers (investisseurs privés, fonds d'investissements...) Habitants de la base lunaire Utilisateurs potentiels Concurrents	Organismes régulateurs <ul style="list-style-type: none"> ● ONU Gouvernements et Etats <ul style="list-style-type: none"> ● Etats membres de l'UE organisations supranationales <ul style="list-style-type: none"> ● Union européenne ● ESA 	Leaders d'opinion pro-spatial Leaders d'opinion anti-spatial

◆ Acteurs scientifiques

Ces acteurs sont essentiels au projet de colonisation lunaire. Le spatial étant un secteur à la pointe de l'innovation, il est indispensable de souligner le rôle influent des laboratoires et des universités. Par leurs recherches et publications, ils irriguent de multiples domaines et donnent les clés de l'innovation aux entreprises et des opportunités croissantes aux agences spatiales.

Il faut souligner le travail de certains organismes comme l'Agence Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT), qui à l'aide de politiques visant à promouvoir l'enseignement et la recherche sur des domaines dont le spatial, permet de stimuler l'innovation. Les acteurs comme le Commissariat à l'Energie Atomique (CEA), l'IAS, l'ESRIN ou le CNRS mènent des politiques de front sur le spatial avec des programmes de recherche en partenariat avec des industriels. C'est le cas par exemple du CEA qui contribue à l'innovation dans l'aérospatial en collaborant avec des acteurs industriels tels que Safran ou Airbus sur des problématiques de capteurs embarqués⁶⁰.

Le rôle des agences spatiales est à spécifier car elles sont chargées de définir et de proposer une politique spatiale aux Etats, mais aussi de l'appliquer. On retrouvera donc ces acteurs dans les catégories Scientifique et Politique. C'est le cas par exemple du CNES qui collabore avec l'ESA, les autres agences spatiales nationales comme la NASA et les industriels sur des problématiques d'astronomie, de physique fondamentale ou encore de technologie. En Europe, le CNES et la DLR (agence spatiale allemande) apparaissent comme les acteurs scientifiques les plus influents sur la politique en raison de leur participation au budget de l'ESA ⁶¹et de l'impact des missions menées notamment le succès récent de Rosetta⁶²

Ces différents acteurs ont vis-à-vis de notre variable coeur pour rôle de garantir un substrat technique et une avancée scientifique continue visant à développer les technologies d'extraction, d'acheminement, et de gestion de l'eau en circuit fermé ainsi que de l'amélioration des conditions de vie sur la lune.

◆ Acteurs de marché

Ces acteurs sont plus nombreux que les acteurs scientifiques. Ils ont pour objectif principal de créer et de faire perdurer une activité rentable dans le domaine du spatial. Dans cette perspective, nous avons déjà mentionné leur étroite collaboration

⁶⁰ [Aéronautique et spatial](#)

⁶¹ [Les Européens augmentent fortement leur budget spatial](#)

⁶² [ESA - Rosetta](#)

avec les acteurs scientifiques. Ils sont par ailleurs très liés aux acteurs politiques et sont sensibles aux politiques spatiales menées par les pays européens et l'ESA avec lesquels ils entretiennent des partenariats de recherche et développement⁶³.

Dans ces acteurs de marché sont compris les industriels qui participent à la recherche et développement, qui conçoivent et produisent les technologies qui feront la conquête spatiale (exploration, exploitation et survie). Ils seront chargés dans notre sujet de produire les installations techniques et les technologies visant à l'exploitation des réserves en eau lunaire ainsi que de leur maintenance.

Nous comprenons aussi les utilisateurs qui seront chargés de faire améliorer la technologie de manière incrémentale grâce à un retour d'utilisation.

Le rôle des utilisateurs potentiels terrestres est indispensable à l'identification des retombées terrestres potentielles. Ces dernières sont corrélées à l'investissement des privés et des gouvernements dans le secteur et plus généralement à l'engouement du marché sur le spatial.

❖ **Acteurs politiques**

Cette catégorie est composée des organisations nationales et supranationales ainsi que des gouvernements qui ont pour mission de créer des politiques spatiales, de les appliquer et de réguler l'activité.

On y retrouve les agences spatiales comme le CNES que nous avons détaillé dans la partie 2 : analyse du décideur.

Les acteurs gouvernementaux sont chargés d'appuyer les agences spatiales, le reste de la communauté scientifique et les industriels, en mettant en place une politique favorisant les synergies entre eux et une dynamique du secteur.

Nous retrouvons dans les acteurs supranationaux les Nations-Unies à l'origine du célèbre Traité de l'espace et de différents autres traités concernant la responsabilité des dommages causés dans l'espace ou le rapatriement des astronautes.

❖ **Acteurs de communication**

Ils sont de natures différentes, nous pouvons les classer synthétiquement en deux catégories : les leaders d'opinion pro-spatial et les leaders d'opinion anti-spatial.

⁶³ [Le Cnes met 4 start-up françaises innovantes à l'honneur](#)

Ils ont pour but d'influencer l'opinion sur les enjeux du spatial pour stimuler l'engouement ou au contraire pour créer des oppositions. Les spationautes peuvent jouer le rôle de prescripteurs pour les décideurs et de vulgarisateurs pour le grand public afin de promouvoir le spatial.

Il faut souligner que ces acteurs peuvent tous jouer un rôle dans l'éducation des français et plus globalement des européens, car la vulgarisation permet de toucher un public plus large pour une meilleure compréhension des enjeux du spatial et favoriser un taux d'adhésion des citoyens aux politiques spatiales européennes. On peut d'ailleurs remarquer une stratégie de communication plus globale du CNES depuis le succès de la mission Proxima, avec des porte-paroles comme Thomas Pesquet, ainsi que des programmes comme "C'est pour quand ? " ou "en vacances dans le système solaire" proposé sur Youtube.

La culture du spatial est aussi importante, les producteurs de contenu entretiennent de manière indirecte cet imaginaire. A travers des films, des récits, et autres formes d'expression ils participent à la diffusion d'idée pro ou anti-spatial. Il est possible d'observer les retombées importantes en terme d'engouement de films comme Interstellar ou Seul sur Mars qui ont permis d'élargir le débat autour de problématiques comme les trous noirs. Des scientifiques comme l'astrophysicien du CEA Roland Lehoucq qui aborde des sujets scientifiques à travers des exemples de fiction⁶⁴, font de la vulgarisation scientifique leur fer de lance.

Ces différents acteurs ont la mission d'influencer les organismes et les industriels dans le choix des technologies et dans l'axe de leurs politiques. Ils ont aussi la tâche de communiquer au grand public pour favoriser l'engouement au spatial.

2. Analyse du décideur

A. Présentation des objectifs et des moyens du décideur

I. Positionnement du CNES au niveau national et européen

Afin d'analyser les stratégies possibles pour le décideur, il est primordial de replacer le CNES dans l'écosystème spatial, en regardant comment se positionne la stratégie spatiale française au niveau européen et mondial.

Selon le rapport⁶⁵ du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche sur la stratégie spatiale française, la France est la première puissance spatiale européenne et l'Europe compte parmi les trois grandes puissances spatiales mondiales. La

⁶⁴ [Conférence de Roland Lehoucq : Parlons de sciences grâce à la fiction](#)

⁶⁵ <https://www.vie-publique.fr/sites/default/files/rapport/pdf/124000161.pdf>

politique spatiale française est guidée par le CNES et la France oeuvre au sein de l'Europe spatiale, pour laquelle elle est moteur et détient la responsabilité de conserver sa force d'entraînement dans les initiatives européennes. Cela s'est notamment concrétisé à travers le souhait de fédérer davantage la gestion des affaires spatiales, auparavant intergouvernementale, avec l'Union Européenne en tant que pilote stratégique de la politique spatiale européenne. Le traité de Lisbonne marque une étape importante de l'Europe spatiale en confiant à l'UE une compétence spatiale partagée afin d'avoir des ambitions à la hauteur des enjeux. L'ESA incarne la maîtrise d'ouvrage des programmes décidés par ses états membres, ainsi que des composantes spatiales des programmes de l'UE (accord cadre ESA-UE de mai 2004).

66

Ainsi, en respect du principe de subsidiarité, l'UE doit utiliser les compétences au sein de l'ESA (European Space Agency) et des Etats-membres. La France met donc, à travers le CNES, son savoir-faire spatial et ses infrastructures à disposition des initiatives européennes spatiales. Cela a été le cas par exemple pour la famille Ariane et la base spatiale de Guyane ou pour les systèmes spatiaux de navigation EGNOS et Galileo dont les premiers travaux ont été menés par le CNES.

II. Politique spatiale française et européenne

Le CNES s'inscrit dans un **écosystème** riche et collabore avec des nombreux acteurs telles que les instituts de recherche nationaux (INRA, CNRS, CEA...), les institutions académiques (ISU, CSU, Universités...), les agences spatiales étatiques (ESA, NASA, CNSA (SVOM)...), ou les industriels (AIRBUS, Thales, Safran...). Cet écosystème représente un atout pour la politique spatiale française qui souhaite valoriser son effort spatial en mettant à disposition les données qui en découle. L'objectif de cette démarche d'ouverture des données est de provoquer un effet de réseau afin d'accélérer le **développement d'applications à haute valeur ajoutée** et permettre un retour sur investissement. La stratégie consiste ici à construire un tissu dynamique étendu de services localisés en France, disponibles sur l'ensemble du territoire français et prêts à l'export. Cependant, l'émergence de ces services et applications nécessite l'appui des pouvoirs publics pour faciliter l'expression des besoins utilisateurs et mener une action directe en matière de R&D ou de réglementation. L'effort spatial pourrait ainsi être optimisé.

Par ailleurs, la politique spatiale française souhaite également **renforcer le tissu industriel national** en confiant les chantiers spatiaux aux acteurs français et européen. Un consensus doit être trouvé entre acteurs européens pour soutenir l'effort collectif et **privilégier la production locale européenne**.

⁶⁶ [Politique spatiale européenne - Ministère de](#)

Les systèmes spatiaux font l'objet d'un enjeu sensible lorsqu'ils concernent la défense et cela se répercute sur les technologies correspondantes. Ces technologies sont soumises à des contrôles d'exportation et des jeux de pouvoirs pouvant ainsi compromettre leur disponibilité auprès des pays producteurs. Pour faire face à cette problématique de manière viable, **l'indépendance sur les technologies critiques** est placée au coeur des objectifs stratégiques de la politique spatiale française et européenne. Cette logique a amené l'Europe à se doter de ses propres lanceurs, avec le programme Ariane lancé en 1973 par l'ESA, car l'accès souverain à l'espace est un enjeu stratégique majeur qui conditionne les capacités spatiales. Aujourd'hui, cet enjeu est d'autant plus critique avec la révolution "New Space" du secteur spatial : la France et l'Europe doivent conserver une capacité de lancement de satellites compétitive et sans restriction d'usage.

Un équilibre est cependant à trouver entre l'autonomie et la collaboration internationale. L'espace est par nature un champ qui dépasse les frontières nationales et qu'aucun Etat ne peut maîtriser seul. La politique spatiale européenne doit donc être ouverte à la **coopération internationale extra-européenne** pour des raisons budgétaires, justifiées par le coût des programmes spatiaux, et parce qu'elle représente de grandes opportunités d'enrichissement mutuel par le partage de compétences. La France et l'Europe réalisent de nombreuses coopérations avec les autres puissances spatiales comme les Etats-Unis, la Russie, l'Inde, la Chine ou le Japon, en réalisant des missions spatiales conjointes avec ces pays ou en échangeant des données avec eux.

III. Limites qui s'imposent au décideur

La coopération internationale ne supprime cependant pas les **enjeux de souveraineté** que sous-tend l'activité spatiale. Même si de nombreux projets sont internationaux, cela n'empêche pas les puissances étatiques de développer leur propre capacité d'accès souverain à l'espace. L'arrivée de la Russie, du Japon, de la Chine et de l'Inde provoquent donc une intensification de la compétition sur le marché des lancements satellites, à laquelle s'ajoute l'arrivée d'acteurs privés tels que les américains Space X ou Blue Origins. Cette accélération du développement du secteur spatial constitue une menace pour l'activité européenne, qui semble perdre de la vitesse face à ces nouveaux acteurs⁶⁷ (cf [annexe 9 : tableau des lanceurs au niveau mondial](#)). Les Etats-Unis sont ainsi re-devenus leader mondial sur le marché des lanceurs, notamment grâce à un effort budgétaire massif en faveur du secteur spatial et l'initiative du privé.

⁶⁷ [Rapport public annuel 2019 : la politique des lanceurs spatiaux](#)

Tableau n° 5 : les lanceurs au niveau mondial

	Europe	États-Unis			Russie	Japon	Inde	Chine
Orbite géostationnaire 36 000 km	Ariane 5 10,5 t Lancement double	Atlas V 6,8 t	Delta IV 11,2 t	Falcon 9 5,5 t	Proton 6,3 t	H-II 5,6 t	GSLV 2,2t	Longue Marche-3 2,2 t
Orbite médiane 22 000 km	Soyouz	Antares		Delta II	Soyouz			Longue Marche-4 et 7
Orbite basse 300 à 1 500 km	Véga	Pégase		Minotaure	Rockot Dniepr Soyouz 2.1.V	Epsilon	PSLV	Longue Marche-2, 6 et 11
Nombre de tirs entre 2006 et 2016	93	196			304	29	33	143
Taux d'échec	1 %	4,5 %			7 %	0 %	12 %	2 %

Source : Rapport de Mme Geneviève Fioraso au Premier ministre de juillet 2016, « Open space : l'ouverture comme réponse aux défis de la filière spatiale »

2. Identification des leviers d'action

Parmi les variables relevées dans le mapping, certaines d'entre elles constituent des leviers d'action pour le décideur. Il est ici question de préciser ces variables leviers.

Le premier levier identifié pour l'action du décideur est celui de **l'engagement politique en faveur du secteur spatial**. Cela concerne aussi bien la politique nationale que la politique européenne. Renforcer l'engagement du gouvernement français sur les projets spatiaux signifie un plus grand budget alloué au secteur et de plus fortes initiatives des pouvoirs publics pour stimuler les retombées terrestres. Au niveau européen, il est également question de convaincre les Etats membres de s'investir davantage dans l'effort spatial européen. La France est historiquement le premier contributeur de l'Europe spatiale (excepté pour l'année 2020 où elle est deuxième derrière l'Allemagne qui propose un budget de 3,3 milliards d'euros contre 2,7 pour la France) , ce qui crédibilise et rend légitime sa volonté de convaincre ses partenaires européens à s'engager davantage. Cette participation européenne est financière mais également stratégique. En effet, la France attend de l'UE qu'elle s'implique dans certaines activités spatiales stratégiques comme l'exploration, l'accès à l'espace ou la surveillance de l'espace⁶⁸.

Le décideur peut également agir sur les **Partenariats & alliances économiques**. Le CNES et l'Europe spatiale travaillent d'ores et déjà avec de grands industriels tels que

⁶⁸ [Rapport public annuel 2019 : la politique des lanceurs spatiaux](#)

Airbus et Safran, qui ont rassemblé leurs actifs pour créer Ariane Group en 2016. C'est notamment le cas pour le projet du nouveau lanceur Ariane 6 qui est le fruit d'un compromis entre les Etats membres de l'Agence Spatiale Européenne (et particulièrement la France, l'Allemagne et l'Italie), les industriels et les agences spatiales. Ce consensus vise à concilier trois grands objectifs qui sont de disposer d'un accès souverain à l'espace pour les lancements institutionnels, d'assurer la compétitivité du lanceur européen sur le marché commercial et de pérenniser le succès de la politique spatiale européenne en matière de lanceurs, prévoyant un partage industriel qui permette à chaque État contributeur de bénéficier d'un juste retour industriel sur son territoire. Ariane Group est devenu le maître d'oeuvre du développement du nouveau lanceur Ariane 6 et il est désormais l'actionnaire majoritaire d'ArianeSpace, assurant la commercialisation des lanceurs. Ce modèle synergique entre acteurs publics et privés semble porter ses fruits et il pourrait être répliquable sur d'autres projets spatiaux. Au niveau mondial, la France et l'Europe possèdent une réputation dans le secteur spatial, ce qui attire les autres grandes puissances à établir des collaborations avec elles. Selon Jean-Pascal Le Franc⁶⁹, Directeur de la programmation et de l'international du CNES, les américains ont proposé à la France de travailler avec eux pour aller sur Mars, notamment pour les sismomètres français qui sont les plus précis au monde. L'agence spatiale française dispose donc d'une capacité à établir des coopérations industrielles et internationales.

Ensuite, à l'instar du dynamisme américain, un moyen d'augmenter le financement du secteur spatial est d'avoir recours au **financement privé**. Ainsi, pour faire face au changement de paradigme dont fait l'objet le secteur spatial et pour rattraper le retard européen par rapport aux Etats-Unis, le CNES a lancé en 2018 un fonds d'innovation dans le secteur spatial⁷⁰.

CosmiCapital⁷¹ est le premier fonds d'investissement européen qui se concentre exclusivement sur les compagnies privées impliquées sur des enjeux spatiaux et toutes les applications qui y sont liées. Il cible notamment les projets en phase d'amorçage dans le but d'investir autant dans les infrastructures du spatial (satellites, lanceurs, réception) que dans les services proposés à partir des données transmises par satellite. En France, il existe également Global Space Venture, un fonds d'investissement lancé par Hélène Huby, ancienne chargée de l'innovation chez Airbus Defense and Space. Ce dernier a pour objectif à terme d'investir 250 millions de dollars⁷² et ainsi aider les pépites européennes à fleurir. Le Royaume Uni a été le premier pays européen à monter son fonds d'investissement dédié à l'espace avec Seraphim Space Fund pour investir dans des constellations de minisatellites et des

⁶⁹ [Europe & Espace : les atouts #5](#)

⁷⁰ [Le CNES lance un fonds d'innovation dans le secteur spatial](#)

⁷¹ [CosmiCapital | The New Digital Frontier](#)

⁷² [L'espace, le nouveau terrain de jeu du capital-risque](#)

applications dérivées. Le Luxembourg envisage également de monter un fonds d'investissement mi-public, mi-privé ce qui pousse l'Agence Spatiale Européenne à y songer. La présence de plusieurs fonds d'investissement dans le spatial en Europe ne semble pas constituer une menace mais plutôt une opportunité, pour le secteur, de se développer.

Selon le projet de loi de finances pour les programmes de Recherche et enseignement supérieur de l'année 2020 proposé par le Sénat, le gouvernement accorde une priorité au secteur spatial. En effet, le programme 193 « Recherche spatiale » enregistre la plus forte augmentation parmi les programmes de la Mires avec 213,6 millions d'euros supplémentaires en crédits de paiement (+ 11,7 %) en 2020, sa dotation atteignant 2 milliards d'euros⁷³. Jean-Yves Le Gall, Président du CNES, déclare que le budget alloué aux études spatiales s'élève à 2,780 Milliard d'euros en 2020 avec une hausse de 14% par rapport au budget de l'année précédente. La recherche spatiale s'articule autour de différents axes stratégiques comme les sciences de l'environnement et du climat, les sciences de la vie dans l'espace ou l'exploration du système solaire. Outre l'aspect financier, pouvant être un frein à sa vitesse de progression, **la recherche spatiale** fait face à plusieurs challenges tels que la dispersion de l'expertise scientifique, le vieillissement de la population de chercheurs à laquelle il faut assurer la relève ou la gestion des consortium (souvent internationaux) en charge des instruments d'observation et d'analyse des données⁷⁴. Ces éléments représentent tout autant des leviers d'action pour le CNES. Des efforts ont été réalisés pour rassembler l'expertise en pôles de compétitivité comme celui d'Aerospace Valley, et faire intervenir différents acteurs, aux côtés du CNES et du CNRS, tels que les organismes de recherches, les laboratoires et les universités. La recherche a un poids important dans l'opinion publique, c'est pourquoi il est important de valoriser les ressources et les équipements spatiaux.

Enfin, pour réduire la distance psychologique et le scepticisme de la population française et européenne vis-à-vis des enjeux du secteur spatial, il est nécessaire de **communiquer**, avec transparence, sur l'activité des agences spatiales. Pour cela, les médias digitaux tels que les sites internet du CNES ou de l'ESA permettent de rendre accessible du contenu aux citoyens-internautes, tandis que les réseaux sociaux tels que Twitter sont utilisés pour communiquer les actualités. L'enjeu est également d'impliquer les étudiants sur ces sujets. Le Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation est ainsi à l'origine de nombreuses **initiatives en faveur du spatial**. A travers le projet Janus⁷⁵ (Jeunes en apprentissage pour la

⁷³ [Projet de loi de finances pour 2020 : Recherche et enseignement supérieur](#)

⁷⁴ [La recherche spatiale française](#)

⁷⁵ [Les Centres spatiaux universitaires \(CSU\)](#)

réalisation de nanosatellites au sein des universités et des écoles de l'enseignement supérieur), le CNES travaille aux côtés des Centres Spatiaux Universitaires (CSU) pour développer des nanosatellites de forme cubique, les cubesats. Cette initiative a pour objectif de promouvoir le spatial auprès des étudiants des écoles et universités françaises. Pour les plus jeunes, le CNES propose une version adaptée de son site internet⁷⁶, donnant accès à des contenus ludiques et éducatifs. Pour impliquer le plus grand nombre, le CNES lance en 2014 ActInspace⁷⁷, un hackathon spatial appuyé par l'ESA et Aerospace valley, permettant d'innover à travers l'intelligence collective. Initialement français, le concours s'est européenisé en 2016 pour devenir mondial en 2018.

3. Stratégies d'action pour le décideur

	Valeur de ref actuelle	Croissance forte	Croissance faible	Evolution constante	Décroissance faible	Décroissance forte
Influence sur la Politique spatiale	degré 3 sur une échelle de 1 à 5	Le CNES appuie une coalition internationale forte degré 5	Le CNES convainc les Etats membres de l'ESA d'une coalition européenne degré 4			Projet piloté par le CNES mais porté par des acteurs privés degré 1
Partenariats & alliances stratégiques	degré d'intensité 3 sur une échelle de 1 à 5	Le CNES fait partie d'une collaboration au niveau mondial degré 5	Le CNES collabore avec les agences européennes mais chacune travaille sur 1 brique du projet degré 3		Le CNES conclut des contrats auprès d'acteurs privés degré 2	
Investissement privé (en Europe)	15 000 k€ ⁷⁸ (investissement depuis 2015 pour une vingtaine de start-ups)	Le projet et l'effort R&D repose sur les financements privés 13 Milliards €	Le CNES ouvre le financement aux acteurs privés 3,9 Milliards €	Le CNES s'appuie sur les fonds d'investissement spatiaux existants 1 Milliard €		

⁷⁶ [CNES Jeunes](#)

⁷⁷ <https://actinspace.org/>

⁷⁸ [Le CNES lance un fonds d'innovation dans le secteur spatial](#)

Effort de recherche : Publications scientifiques	2,5 Milliards €	Le CNES stimule et coordonne les efforts de R&D entre les agences plusieurs dizaines de milliards d'€	Répartition des ≠ thématiques entre les Etats membres dizaine de milliards d'€		Le CNES sous-traite une partie de la recherche aux acteurs privés 4 Milliards €	
Initiatives en faveur du domaine spatial	degré d'intensité 4 sur une échelle de 1 à 5	Le CNES augmente les initiatives > L'Espace devient une priorité pour l'humanité degré 5		Le CNES maintient ses initiatives de promotion de l'espace aux citoyens degré 4	Le CNES mène des initiatives qu'auprès des entreprises > L'Espace est un terrain de jeux pour les acteurs privés degré 2	
Stratégie		1. Coopération internationale forte pour une exploitation mondiale		2. Une coalition européenne	3. Sous traitance de l'exploitation à un acteur privé	

La projection de l'investissement privé pour 2050 repose sur

- La valeur de l'économie mondiale spatiale, estimé aujourd'hui à 339 milliards de dollars et qui pourrait atteindre 2 700 milliards de dollars en 2045 selon Bank of America Merrill Lynch. "Le secteur spatial ouvre des perspectives considérables. S'il était besoin de démontrer que l'on a affaire à un marché particulièrement porteur, depuis l'an 2000, 400 sociétés ont été créées sur ce segment et plus de 35% d'entre elles ont levé des capitaux auprès de capitaux risqués" affirme Lucien Rapp⁷⁹, professeur à l'Université Toulouse Capitole, directeur scientifique de la Chaire Sirius
- Le poids de l'Europe sur le marché spatial mondial
- Le poids de l'investissement privé dans l'Europe spatiale

La projection des efforts de recherche pour 2050 repose sur

- l'évolution du taux d'investissement public dans la recherche spatiale
- la part de la dépense du spatial dans la Recherche française

⁷⁹ [2 700 milliards - Spatial](#)

Les stratégies possibles identifiées pour le décideur sont donc les suivantes :

1. **Coopération internationale forte** avec une base humaine et une exploitation de la glace lunaire reposant sur un modèle de coopération internationale similaire à celui de l'ISS et caractérisé par :
 - Une politique française très ouverte à la coopération internationale, sacrifiant une part d'autonomie pour un projet d'une telle envergure
 - Une grande collaboration avec les agences spatiales étatiques, leurs industries et leur communauté scientifique
 - L'ouverture aux capitaux privés pour le progrès de l'humanité
 - La mobilisation de la communauté scientifique internationale sur le sujet
 - Un grand enthousiasme de la population mondiale

A noter que le programme Artemis et la construction de la base orbital lunaire Gateway renvoient des signaux fort pour ce type de stratégie.

2. **Coalition européenne** où le CNES est à la tête de l'initiative pour engager tous les Etats membre de l'ESA sur le projet d'exploitation des ressources en eau lunaire. Chacun travail sur une brique du projet de la même façon que sur les lanceurs Ariane. Cette stratégie se caractérise par :
 - Une politique spatiale européenne forte, avec la volonté de conserver une autonomie à l'échelle européenne
 - Une collaboration étroite avec les Etats membres de l'ESA, leurs industries et leurs scientifiques
 - La croissance des fonds d'investissement spatiaux européens qui apportent une source de financement supplémentaire
 - La mobilisation de la communauté scientifique européenne sur le sujet
 - Le soutien de la population européenne
3. **Partenariat Public Privé (PPP) de l'exploitation** dans laquelle le CNES établirait des contrats de sous traitance de l'exploitation et de partenariat avec un consortium d'acteurs privés français, la facture d'eau est supportée par les agences spatiales. Même si le programme spatial français est inscrit dans la stratégie de l'ESA depuis les années 1970, nul ne sait si le régime sera le même à horizon 2050. Cette stratégie est caractérisée par :
 - Un désengagement de la politique française et européenne
 - Contractualisation du programme spatial avec des acteurs industriels privés français qui ont gagné du poids sur l'activité spatiale
 - Le programme est rendu possible grâce aux investissements privés et il n'est donc pas la propriété du gouvernement français. Le CNES joue seulement le rôle de chef d'orchestre et éclaire le déroulement du projet avec son expertise du domaine spatial

- Le rythme de développement s'accélère grâce à l'effort de recherche des acteurs privés
- La population ne se sent pas concerné par le projet qui est soumis à de nombreuses critique de l'opinion publique

Analyse SWOTTR (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats, Tendances, Ruptures) pour le département Prospectif Space'ibles du CNES

Forces	Faiblesses
<ul style="list-style-type: none"> ❖ Compétences/ Expertise/ Savoir-faire scientifique et technologique du domaine spatial ❖ Chercheurs et ingénieurs CNES ❖ Positionnement du CNES parmi les agences spatiales mondiales ❖ Programme spatiaux du CNES (Copernicus, Galileo) ❖ Influence: Propose et conduit la politique spatiale de la France ❖ Coalition européenne Lanceurs européens pour un autonomie d'accès à l'espace ❖ Écosystème riche: collaboration avec des nombreux acteurs (Instituts de Recherche INRA, CNRS / agences spatiale NASA, ESA, CNSA (SVOM) / Institutions académiques ISU etc. / industriels AIRBUS) MEDES-IMPS, CLS 	<ul style="list-style-type: none"> → Dépendance financière au gouvernement français qui décide l'enveloppe budgétaire consacré au spatial (partagée entre le CNES et l'ESA) → Dépendance opérationnelle à l'UE (ESA, gouvernement français/ recherche) et industriels → Dépendance internationale sur les grands projets d'exploration spatiale
Opportunités	Menaces
<ul style="list-style-type: none"> ❖ Le positionnement de l'industrie européenne en matière de deep tech (nucléaire, industrie lourde, IA) ❖ Le domaine spatial est l'un des secteurs de haute technologie avec de nombreuses retombées terrestres (directes ou indirectes) ❖ Secteur en croissance + spéculation sur l'explosion du marché estimé aujourd'hui à 339 milliards de dollars et qui pourrait atteindre 2 700 milliards de dollars en 2045 (Bank of America Merrill Lynch) ⇒ Opportunité de croissance: l'exploration et l'exploitation des minerais spatiaux le potentiel des services pouvant être déployés à partir de l'imagerie spatiale la surveillance des infrastructures terrestres l'exploitation des drones dans l'espace & tout ce qui touche aux services de communication et de télécommunication ❖ New Space : accélération du développement technologiques ❖ Épuisement des ressources terrestres 	<ul style="list-style-type: none"> → Enjeux de souveraineté multiples de l'espace: maîtrise d'un domaine « colonisable » susceptible de fournir énergie et ressources minières / fierté nationale (Chine et autres grandes puissances) → New Space : privatisation partielle du secteur spatial → Concurrence du secteur spatial hors europe & secteur spatial privé → Coût énergétiques des projets spatiaux & coût d'acheminement dans l'espace (matériaux/ fuel) → Verrous technologiques → Lobbying anti spatial

Tendances	Ruptures
<ul style="list-style-type: none"> ❖ Intérêts croissant pour l'exploration spatiale (notamment la Lune et Mars), et l'exploitation des ressources spatiales (L'exploitation minière des astéroïdes) ❖ Progrès technologiques <ul style="list-style-type: none"> - Miniaturisation des technologies de l'espace & le phénomène associé à ca est la réduction des coût de transport - Imprimantes 3D dans l'espace ❖ Baisse du coût d'accès à l'espace → démocratisation de l'espace ❖ Accroissement des activités commerciales grâce à la montée en puissance des acteurs privés (SpaceX, Blue Origin...): Tourisme et transport spatiaux ❖ Les liaisons terrestres en vols spatiaux 	<ul style="list-style-type: none"> → Vitesse de développement des projets New Space, rendue possible grâce à l'utilisation de moyens déjà validés ne nécessitant pas d'efforts de R&D → Apparition de nombreux nouveaux services basés sur l'utilisation de l'infrastructure spatiale

Sources:

« Idées & faits porteurs d'avenir », *Futuribles*, vol. 420, no. 5, 2017, pp. 109-123.

« Idées & faits porteurs d'avenir », *Futuribles*, vol. 432, no. 5, 2019, pp. 87-102.

[2 700 milliards - Spatial](#)

[Un nouveau souffle pour l'industrie spatiale](#)

CHAPITRE 4 : PROJECTION DU SYSTÈME PAR SCÉNARIO

Les scénarios de contexte

Dans cette partie, nous avons construit un tableau à double entrée à l'aide de nos variables motrices (qui ne sont pas influencées par le reste du système) et de leur évolution quantifiée soit par une croissance faible ou forte, une évolution constante ou alors une décroissance faible ou forte. En posant ces hypothèses sur l'évolution de nos variables, basées sur les résultats de notre questionnaire reprenant la méthode Delphi que nous avons adressé à 21 experts, nous avons pu élaborer les scénarios de contexte suivant.

Scénario 1 : Optimisation et avancée commune

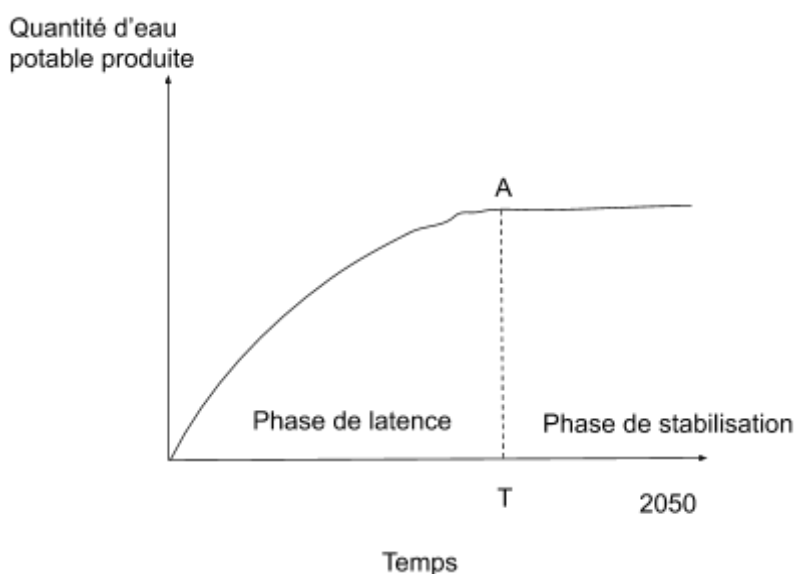
	Principaux acteurs influençant la variable	Valeur de référence	Croissance forte	Croissance faible	Constante	Décroissance faible	Décroissance forte
Ressources en eau lunaire	Industriels Décideur habitants de la base	100 millions de tonnes			100 millions de tonnes		
Retombées terrestres anticipées	Leaders d'opinion utilisateurs terrestres communauté scientifique	rentabilité innovation spatiale : 20 euros pour 1 euro investi	30 euros pour 1 euro investi				
Coût énergétique	Industriels	120 €/ MW à l'énergie solaire sur Terre				100€ / MW	
Maturité technologique	Industriels communauté scientifiques habitants de la base	2	9				
Coopération entre gouvernements	Les gouvernements	Coopération internationale importante degré 7 sur une échelle de 1 à 10		8			

Degré de contrôle du secteur privé	Les gouvernements et organismes régulateurs	Partenariats fréquents public-privé. Degré 6 sur une échelle de 1 à 10			6		
Scénarios de contexte quantité de la variable coeur projetée = 1150 L					Scénario idéal : Optimisation et avancée commune		

- **Scénario 1 : Optimisation et avancée commune**

Nous pouvons traiter la colonie lunaire comme un système qui, dans ce scénario, serait un système technologique unique et fermé avec une entente entre les différents acteurs internationaux et des partenariats entre eux.

Sur le graphique suivant, nous voyons l'évolution de notre variable coeur dans le temps. Durant une première phase, la production d'eau potable est croissante en raison d'une mise au point de la technologie avec des tests en conditions réelles menant à des ajustements incrémentaux, ainsi qu'une adaptation des habitants aux conditions de vie sur la base. Nous appellerons cette première phase, la **phase d'ajustement**. (Ici, une illustration graphique l'évolution de la quantité d'eau potable



produite dans ce scénario.)

La deuxième phase commence à **l'instant T qui est l'atteinte du seuil d'équilibre d'eau potable**. C'est le seuil d'eau à partir duquel les réserves sont parfaitement évaluées et constituées, et où la maturité technologique permet un quasi-équilibre entre usage et recyclage de l'eau. Notre système peut ainsi fonctionner de manière optimale. Nous appellerons cette deuxième phase, **phase de stabilisation des usages**.

A noter que l'évènement T peut être influencé par plusieurs variables.

- Diminuer le nombre d'habitants de la base permettrait "artificiellement" de rapprocher l'évènement T dans le temps.
- Injecter de nouveaux financements permettrait d'accélérer la R&D et ainsi de lever plus rapidement certains verrous technologiques pour parvenir à la phase de décroissance.

La forte évolution de notre variable cœur n'est pas forcément un signe de réussite du projet spatial. Cela peut résulter d'une mauvaise gestion humaine de la ressource ou de lacunes technologiques provoquant des pertes plutôt que d'une activité fructueuse.

Dans ce scénario optimal, la quantité d'eau potable extraite et filtrée suit une décroissance faible.

Les rapports entre acteurs privés et publics sont basés sur une relation "donnant-donnant". La concurrence et l'activité économique est régulée mais laisse un degré de liberté suffisant pour attirer des entrepreneurs et des partenaires.

Les retombées terrestres sont suffisamment conséquentes pour attirer les investissements qui vont vers la recherche et l'industrie, ainsi que de nouveaux acteurs, ce qui permet des avancées technologiques nombreuses.

Il y a, de plus, un aspect sanitaire non négligeable. L'état de santé physique ainsi que mental des habitants est une variable importante. Plus l'état de santé sera maîtrisé, plus la durée des séjours sur la lune sera importante pour limiter les phases d'adaptation, plus il sera possible de rapprocher l'évènement T dans le temps. Cet élément est indispensable à maîtriser pour obtenir une base pérenne.

Scénario 2 : Mauvaise perception des enjeux et bridage de l'activité

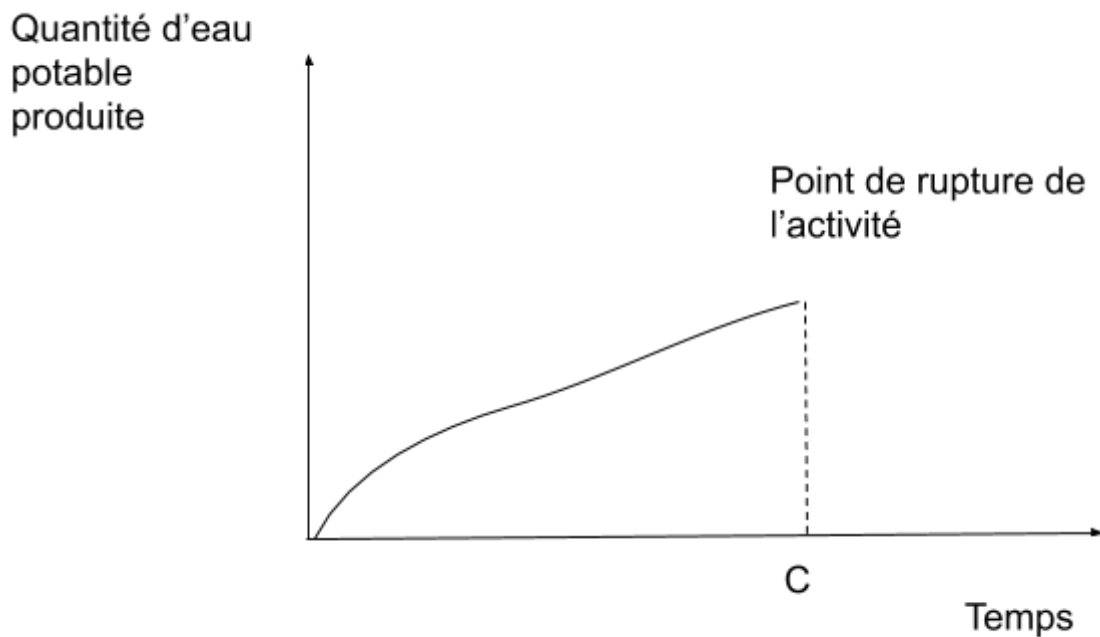
	Principaux acteurs influençant la variable	Valeur de référence	Croissance forte	Croissance faible	Constante	Décroissance faible	Décroissance forte
Ressources en eau lunaire	Industriels Décideur habitants de la base	100 millions de tonnes			100 millions de tonnes		
Retombées terrestres anticipées	Leaders d'opinion utilisateurs terrestres communauté scientifique	rentabilité innovation spatiale : 20 euros pour 1 euro investit					<5 euros pour 1 euro investi
Coût énergétique	Industriels	120 €/ MW à l'énergie solaire sur Terre	>200 € / MW				
Maturité technologique	Industriels communauté scientifiques habitants de la base	2		3			
Coopération entre gouvernements	Les gouvernements	Coopération internationale importante degré 7 sur une échelle de 1 à 10			7		
Degré de contrôle du secteur privé	Les gouvernements et organismes régulateurs	Partenariats fréquents public-privé. Degré 6 sur une échelle de 1 à 10	>9				
Scénarios de contexte quantité de la variable coeur projetée = très faible				Scénario non enviable : mauvaise perception des enjeux et bridage de l'activité			

Scénario 2 : Mauvaise perception des enjeux et bridage de l'activité.

Dans ce scénario, nous posons l'hypothèse d'une décroissance forte de la production d'eau potable. À la différence du scénario précédent, cette décroissance n'est pas causée par des améliorations technologiques ou une bonne gestion de l'eau qui permettrait d'en réduire sa production, mais d'une dégradation sévère de l'activité.

On peut anticiper une telle dégradation avec la conjonction de trois facteurs : des retombées terrestres anticipées trop faibles, un coût énergétique élevé et un trop fort contrôle des gouvernements sur les industriels privés.

Comme le montre le graphique suivant, l'exploitation est en croissance jusqu'au point C qui marque l'égalisation entre le coût de production de l'eau sur la Lune et le coût d'import de l'eau depuis la terre. L'activité d'extraction est alors mis en suspens.



Scénario 3 : Course aux ressources

	Principaux acteurs influençant la variable	Valeur de référence	Croissance forte	Croissance faible	Constante	Décroissance faible	Décroissance forte
Ressources en eau lunaire	Industriels Décideur habitants de la base	100 millions de tonnes	>200 millions de tonnes				
Retombées terrestres anticipées	Leaders d'opinion utilisateurs terrestres communauté scientifique	rentabilité innovation spatiale : 20 euros pour 1 euro investit		25 euros pour 1 euro investi			
Coût énergétique	Industriels	120 €/ MW à l'énergie solaire sur Terre			120 € / MW		
Maturité technologique	Industriels communauté scientifiques habitants de la base	2		4			
Coopération entre gouvernements	Les gouvernements	Coopération internationale importante degré 7 sur une échelle de 1 à 10				5	
Degré de contrôle du secteur privé	Les gouvernements et organismes régulateurs	Partenariats fréquents public-privé. Degré 6 sur une échelle de 1 à 10					<2
Scénarios de contexte quantité de la variable coeur projetée =3500 L			Scénario non enviable : course aux ressources				

Scénario 3 : Course aux ressources

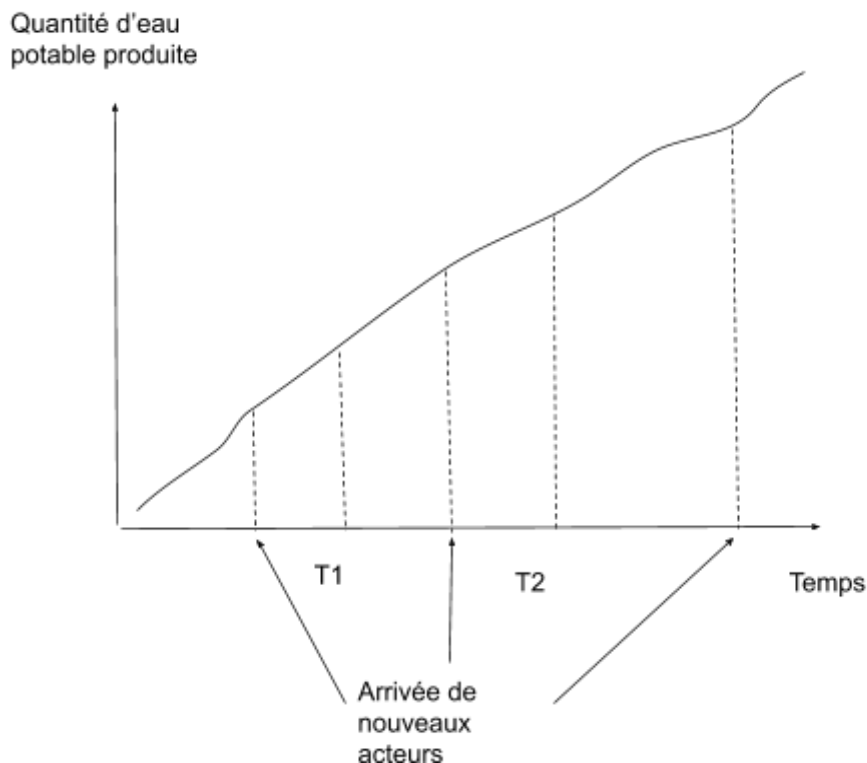
Dans ce scénario non enviable mais tout de même profitable sur certains points pour le décideur, nous posons l'hypothèse d'une forte croissance de la production d'eau potable qui peut mettre en danger les ressources.

Cette croissance peut s'expliquer de plusieurs manières.

Premièrement, les ressources en eau présentes sur la Lune sont importantes ce qui lève partiellement la contrainte liée à l'épuisement de celles-ci. La distance psychologique vis à vis de ce risque est alors augmentée, ce qui, conjointement avec un contrôle inexistant des entreprises privées, provoque une exploitation intensive des ressources lunaires dont l'eau.

Dans ce scénario les différentes puissances ne collaborent pas, ou pas toutes, il y a différentes bases sur la lune et il n'y a pas forcément de mutualisation des technologies. Ceci signifie que les avancées technologiques sont peu contrôlées et qu'il y a une sur-exploitation avec plusieurs bases lunaires non efficientes (en terme de coût, de quantité extraite, de nombre d'habitants).

La consommation d'eau est alors croissante étant donnée la multiplicité des événements T qui se rapportent aux différentes bases comme représenté sur le schéma suivant.



Une multitude d'acteurs exploitent différents cratères, ce qui multiplie alors les événements T et rend permanent la croissance de notre variable coeur et ce, malgré les avancées technologiques qui peuvent avoir lieux.

Compléments à la partie scénario :

La question de la création d'un système économique propre à la lune est présent au long de notre étude. Nous concluons qu'il n'y a pas de certitude quant à la création d'un tel système et des modalités qui le constitueront. En effet, il n'y aujourd'hui non seulement pas de consensus des experts sur la question, et dans l'éventualité d'une création effective d'une économie lunaire, il est aujourd'hui impossible de décrire la forme qu'elle pourrait prendre.


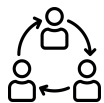
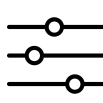


Hormis pour le scénario 3, dans lequel il est clairement exposé l'éventualité d'un système économique libéral, nous laissons ouvert le champs des possibles sur ces questions pour les scénarios 1 et 2.

CHAPITRE 5 : AIDE A LA DEFINITION DE LA STRATÉGIE DU DÉCIDEUR

La matrice ci-dessous a pour objectif de croiser les scénarios de contexte avec les stratégies possibles du décideur abordés précédemment afin de dégager tous les scénarios possibles d'évolution de la variable coeur.

Scénarios de contexte Stratégie	Optimisation et avancée commune (1)	Mauvaise perception des enjeux et bridage de l'activité (2)	Course aux ressources (3)
Coopération internationale pour une exploitation mondiale	Quantité d'eau potable qui se stabilise avec le temps car l'optimisation du système technologique est au maximum.	quantité = arrêt de l'exploitation	Quantité augmente progressivement dans le temps → diversification des usages : production O2 et H2
Coalition européenne pour proposer un service européen aux autres grandes puissances spatiales	Quantité augmente en croissance faible → l'exploitation européenne a attiré les autres puissances spatiales en tant que clients > avantage financier qui dissuade la concurrence	quantité = arrêt de l'exploitation Puis relancée par les agences spatiales mondiales qui vont exploiter les infrastructures déjà présentes sur la Lune avec éventuellement de l'eau provenant de la Terre	Quantité augmente de façon croissante → l'exploitation européenne a attiré les autres puissances spatiales en tant que concurrents de l'exploitation.
Sous traitance de l'exploitation par le CNES à un ou un consortium d'acteurs privés français	Quantité augmente en croissance modérée → l'exploitation française a attiré les autres puissances spatiales européennes et mondiales en tant que clients > avantage financier qui dissuade la concurrence	quantité = arrêt de l'exploitation Puis relancée par les agences spatiales européennes qui vont exploiter les infrastructures déjà présentes sur la Lune avec éventuellement de l'eau provenant de la Terre	Quantité augmente de façon exponentielle → plusieurs acteurs assure l'exploitation indépendamment, les même usages sont adressés mais pour une quantité d'eau beaucoup plus importante car chacun cherche à préserver l'autonomie d'accès à la ressource.

Croisement des stratégies avec le scénario 1

Caractéristiques du scénario 1				
				
<p>Un système d'exploitation unique et fermé permis par l'entente des différentes puissances spatiales.</p> <p>Absence de concurrence</p>	<p>Des retombées terrestres nombreuses partagées.</p>	<p>Une phase d'ajustement avec une croissance forte de la quantité d'eau potable produite quotidiennement avant d'atteindre le fonctionnement optimal du système.</p>	<p>L'utilisation et le recyclage de l'eau sont à l'optimum : on entre dans la phase de stabilisation de la variable coeur.</p>	<p>Les ressources sont exploitées raisonnablement.</p>

Stratégie A : Coopération internationale forte pour une exploitation mondiale

En adoptant une stratégie de coopération internationale, le CNES limite les risques en priorisant le progrès de l'humanité. L'effort international est partagé entre les différentes puissances spatiales pour oeuvrer à un objectif commun : faire un pas de plus dans l'exploration du système solaire. Il existe également un consensus entre les acteurs pour placer au coeur de cette exploitation une priorité éthique, à savoir l'exploitation raisonnable des ressources lunaires.

Ce scénario fait donc part de la situation la plus optimale en terme d'exploitation de la ressource en eau lunaire. Il n'existe qu'une seule et unique exploitation de l'eau lunaire qui est internationale et inclusive. Si de nouvelles puissances spatiales émergentes souhaitent en bénéficier, ils devront contribuer à l'exploitation.

L'évolution de la quantité d'eau potable produite quotidiennement affiche donc une croissance pendant la phase d'ajustement, avant que le système atteigne un fonctionnement optimal et que l'utilisation de la ressource et son recyclage soit à l'optimum. La quantité d'eau potable produite quotidiennement se stabilise.

→ Pour le décideur, cette stratégie représente la moins risquée en terme de faisabilité technique et financière. Elle favorise un climat pacifique et une exploitation

raisonnable de la ressource. La coopération internationale est donc à privilégier si la priorité est de limiter les risques.

Stratégie B : Coalition européenne pour un service européen facturé aux autres grandes puissances spatiales

En adoptant cette stratégie, le CNES souhaite conserver son rayonnement et soutenir une souveraineté européenne. L'Europe spatiale serait ainsi pionnière dans l'exploitation des ressources en eau lunaire. Dans ce sous scénario, on imagine que le CNES conserve son rôle d'acteur moteur au sein de la dynamique européenne spatiale en fédérant ses collègues et collaborateurs européens. Ici, la compétition entre Etats membres est saine et positive : elle contribue à la pérennité du projet.

Dans ce sous scénario, la concurrence est limitée par les barrières à l'entrée du marché, qui sont essentiellement technologiques et financières. De plus, il existe un avantage financier significatif pour les autres puissances mondiales à avoir recours au service européen par rapport à l'établissement de leur propre exploitation. L'entente internationale repose ici sur les partenariats conclus entre l'Europe spatiale et le reste du monde quant à l'exploitation de l'eau lunaire.

La quantité d'eau potable produite quotidiennement est en croissance durant la phase d'ajustement pour répondre aux besoins des divers acteurs qui souhaitent bénéficier du service européen. A la date T, le nombre d'acteurs se stabilise, ainsi que la quantité d'eau potable consommée quotidiennement. La quantité d'eau potable utilisée et recyclée sont à l'optimum, la quantité produite de la ressource se stabilise.

→ Pour le décideur, cette stratégie représente l'opportunité d'une souveraineté européenne tout en limitant les risques d'entreprendre un tel projet spatial. De plus, l'opportunité est aussi économique puisque l'Europe pourrait dégager des revenus de son activité auprès des autres acteurs. Cette stratégie est à privilégier si la priorité est de regagner une suprématie dans le secteur spatial mondial.

Stratégie C : Sous traitance de l'exploitation à un consortium d'acteurs privés français

Cette initiative s'inscrit dans une entente internationale pour le progrès de l'humanité au vue de l'objectif commun d'exploration du système solaire. Ainsi, différents programmes spatiaux ont été répartis entre les puissances spatiales pour accélérer l'avancée commune. C'est ainsi que l'exploitation des ressources en eau lunaire a été confiée à la France qui propose aux autres pays son service.

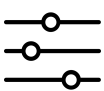




Cela permet à la France d'être pionnière sur l'exploitation des ressources en eau lunaire afin de réaffirmer son expertise et sa position dans le domaine spatial, au niveau mondial. Pour y parvenir, le CNES s'adresse aux industriels français. Comme

pour les lanceurs Ariane, un consortium d'acteurs privés est à la maîtrise d'oeuvre pour réaliser l'exploitation des ressources en eau lunaire commandité par l'agence spatiale française.

Comme pour la stratégie précédente, la quantité d'eau potable produite quotidiennement est en croissance durant la phase d'ajustement pour répondre aux besoins des divers acteurs qui souhaitent bénéficier de la ressource. A la date T, le nombre d'acteurs se stabilise, ainsi que la quantité d'eau potable consommée quotidiennement. La quantité d'eau potable utilisée et recyclée sont à l'optimum, la quantité produite de la ressource se stabilise.

→ Pour le décideur, cette stratégie est celle qui rapporte le plus mais qui est la plus risquée. Mettre en oeuvre une exploitation française permettrait à la nation d'assurer son autonomie complète en terme d'accès à la ressource en eau lunaire. En revanche, même si celle ci serait légitimement mis en oeuvre, cette stratégie très coûteuse n'est pas à l'abri de se retourner contre son commanditaire avec l'arrivée de nouveaux acteurs sur le marché.

Croisement des stratégies avec le scénario 2

Caractéristiques du scénario 2				
				
<p>Croissance de l'exploitation de la ressource jusqu'au point d'égalisation entre le coût de production de l'eau et la lune et le coût d'import depuis la Terre.</p> <p>Puis décroissance de la production et activité mise en suspens.</p>	<p>Mauvaises anticipations et projections.</p> <p>Retombées terrestres anticipées trop faibles.</p>	<p>Investissements conséquents et non rentables.</p> <p>Coût énergétique élevé.</p>	<p>Fort contrôle des gouvernements sur les industriels privés.</p>	<p>Mauvaise adaptation aux ressources.</p> <p>Éventualité d'importer de l'eau de puis la Terre.</p>

Si l'on croise le scénario 2 aux différentes stratégies du décideur, la situation de base sera toujours la même : un arrêt de l'exploitation de l'eau lunaire. En effet, une fois le

point C atteint (marquant l'égalisation entre le coût de production de l'eau localement et le coût d'import de l'eau depuis la terre), l'activité d'extraction est mise en suspens. L'idée de s'approvisionner depuis la Terre devient alors envisageable (pas forcément souhaitable, ni nécessaire mais envisageable).

Stratégie A : Coopération internationale forte pour une exploitation mondiale

Si l'exploitation était mondiale, ce scénario se retrouve tout simplement à l'arrêt, puisque l'on considère qu'aucune puissance ne pourrait reprendre le relais, puisqu'elles ont toutes "échoué". Les puissances n'ont pas réellement d'autres moyens technologiques ou financiers pour poursuivre l'exploitation. Dans ce cas là, l'idée d'un approvisionnement en eau terrestre pourrait être une ultime option à la poursuite d'une vie humaine sur la Lune.

Cette stratégie n'est donc pas souhaitable puisque si les risques sont pris par tous, et que le scénario se retrouve effectif et que tout s'arrête, l'exploitation en eau lunaire sera complètement abandonnée.

Stratégie B : Coalition européenne pour un service européen facturé aux autres grandes puissances spatiales






En revanche, dans le cas où la stratégie était une coalition européenne, nous pouvons imaginer que si l'exploitation s'arrête car elle devient ingérable ou difficilement rentable, elle pourrait être relancée par les agences spatiales mondiales (ex: NASA) ou d'autres puissances spatiales que l'Europe. En effet, ces nouveaux "exploitants" de la technologie, pourraient profiter des infrastructures déjà présentes sur la Lune et réalisées par la coalition européenne. Cela leur aura évité des investissements en R/D conséquents ainsi que les coûts d'installation. Le coût d'accès à la technologie serait alors rentabilisé et amorti. En outre, une reprise des infrastructures et de l'exploitation par d'autres puissances ou institutions mondiales, éviterait des coûts de démantèlement pour la coalition européenne. Enfin, et surtout, cela permettrait de continuer l'exploitation de l'eau lunaire et les progrès scientifiques déjà commencés. Le CNES, par le biais de l'ESA, pourrait alors poursuivre certaines actions, mais dans un rôle qui serait celui de collaborateur ici et non pas de leader. L'approvisionnement en eau depuis la Terre pourrait être envisagé pour compléter, si l'exploitation nouvellement créée n'est pas optimisée, mais ne serait pas obligatoirement nécessaire.

Stratégie C : Sous traitance de l'exploitation à un consortium d'acteurs privés français

Enfin, si l'exploitation lunaire était stratégiquement gérée par un consortium d'acteurs privés français sous la direction du CNES, et que l'exploitation était mise en suspens, les options seraient diverses. La reprise pourrait être à réalisée à un niveau supranational, par les puissances européennes, notamment regroupées dans l'ESA . Ainsi le CNES pourrait toujours être inclus dans la coalition, il s'agirait alors d'une solidarité européenne et non d'une exclusion du CNES. La coalition pourrait renforcer et enrichir l'exploitation déjà implantée par le CNES, et donc profiter de ces installations, tout en aidant le CNES à poursuivre l'exploitation de l'eau lunaire et les initiatives scientifiques et technologiques déjà débutées. Une relancée par d'autres puissances, ou des institutions mondiales, de manière similaire à notre scénario 2 pourrait aussi être envisagée si l'ESA n'est pas en capacité de reprendre cette exploitation de manière autonome ou si ces acteurs veulent stratégiquement participer à l'exploration lunaire. Dans ce cas là, au vu de des possibilités diverses d'acteurs qui seraient potentiellement repreneurs de cette exploitation, l'approvisionnement en eau terrestre n'est pas forcément une option nécessaire. Cependant, elle reste envisageable vu que le coût d'approvisionnement depuis la Terre est devenu égal au coût de l'exploitation lunaire.

C'est pour cela, que dans le cas où le scénario 2 s'avère probable, nous considérons que la meilleure stratégie est celle de l'exploitation nationale, avec le CNES comme principal acteur propriétaire de la technologie et exploitant de cette eau lunaire grâce à un consortium de scientifiques et d'acteurs privés français. Ainsi, si l'exploitation tend à rencontrer des difficultés, une reprise européenne dans une logique de solidarité ou alors une reprise par d'autres puissances mondiales, dans une logique plutôt stratégique pourrait être envisagée. Un approvisionnement en eau depuis la Terre n'étant pas à exclure non plus, il s'agit de la stratégie qui offre le plus d'opportunités de reprise et donc qui restreint la prise de risque. Cependant, elle implique des investissements très importants pour le CNES et la nécessité de s'ériger comme pionnier et donc pour cela d'avoir des avantages concurrentiels technologiques très importants.

Croisement des stratégies avec le scénario 3

Caractéristiques du scénario 3				
				
Forte concurrence possible Peu de coopération entre les acteurs et peu de partenariats public-privé Acteurs privés trop peu régulés	Retombées fortes exploitées de manière individuelle par les agences ou acteurs privés.	Croissance permanente de la variable coeur	Pas d'optimisation de la variable coeur qui croit plus que proportionnellement aux usages.	Les ressources sont surexploitées par manque de coopération.

Dans un scénario de courses aux ressources, la stratégie d'une exploitation mondiale est souhaitable.

Stratégie A : Coopération internationale pour une exploitation mondiale

Dans ce scénario de course aux ressources, le CNES peut décider d'une stratégie de coopération internationale. C'est la stratégie la plus optimale dans ce scénario, elle permet d'optimiser les chances de succès des missions lunaires en mutualisant les ressources des différentes agences, du moins jusqu'à une date fixée.

Cette stratégie présente l'avantage pour les agences spatiales de dépendre au minimum des acteurs privés dans l'hypothèse d'une économie lunaire libérale, sujette aux lois du marché et donc aux variations de prix, ce qui provoquerait une trop forte incertitude.

Elle présente néanmoins l'inconvénient d'une perte de souveraineté des agences dans un système qui à l'instar de celui de l'ISS, limite le pouvoir de décision et d'action à un prorata de la participation aux frais. Il est donc à noter que cette stratégie est la plus optimale si le CNES se positionne comme un acteur prépondérant du projet, auquel cas il sera très limité dans son action.

Stratégie B : Coalition européenne pour proposer un service européen aux autres grandes puissances spatiales

Cette stratégie de coopération promeut l'avancée commune dans la recherche et dans le progrès spatial par la mutualisation des ressources entre Etats membres de l'Union Européenne. En se basant sur la participation du CNES au budget de l'ESA, elle présente l'avantage de placer directement le CNES en acteur prépondérant de la stratégie. C'est une stratégie avantageuse par rapport à la première en termes de souveraineté. Elle permet aussi de se couvrir des risques de marché avec un partage de coûts entre membres.

Le principal risque de cette stratégie dans un contexte de course aux ressources, est la mise en concurrence avec les autres agences spatiales telles que la NASA, JAXA ou CNSA. Cette concurrence s'additionne à la concurrence des acteurs du privé et vient créer une incertitude supplémentaire.

Cette stratégie est donc plus optimale que la première si le CNES arrive à s'imposer en tant qu'acteur prépondérant dans l'exploitation de l'eau. C'est pour cette raison que cette stratégie est également plus risquée que la première. Nous la conseillons donc au CNES, si il est avéré que la technologie européenne en termes d'exploitation de l'eau est au moins aussi performante (productivement et financièrement) que les autres. Sinon, nous conseillons de suivre la stratégie de coopération avec les autres agences dont les principales citées précédemment.

Stratégie C : Sous traitance de l'exploitation par le CNES à un consortium d'acteurs privés français

Cette dernière stratégie promouvoit la sous traitance d'un acteur privé ou des acteurs privés pour remplir les missions d'exploitation de l'eau au profit d'une base lunaire. Elle présente l'avantage de se passer du coût d'accès à la technologie contre le paiement du sous-traitant, ce qui peut permettre d'allouer davantage de ressources dans d'autres secteurs. Dans un système libre de course aux ressources, les coûts du sous-traitant sont sensibles aux changements comme l'augmentation du coût d'accès à l'énergie ou l'arrivée de concurrents. Ainsi, en employant cette stratégie, le CNES s'expose à une fluctuation du prix de la sous-traitance.

A l'égard des risques encourus, nous ne recommandons cette stratégie au CNES que dans une situation ne lui permettant pas d'exploiter les ressources en eau de manière "autonome".

Il est bon de noter, que cette situation n'est que peu probable, en effet, le cas où le CNES serait le seul exploitant et propriétaire d'une base lunaire est quasiment impossible étant donné les coûts astronomiques.

Recommandations sur la stratégie la plus adaptée pour le décideur au vu des différents scénarios

Pour tenter d'avoir des indices sur le scénario le plus probable concernant l'exploitation des ressources lunaires à horizon 2050, nous avons recueilli les avis de plus d'une vingtaine d'experts du domaine spatial. Les résultats du questionnaire DELPHI, réalisé pour cette étude et que vous trouverez en [Annexe 10](#), indiquent que le scénario le plus probable pour l'exploitation des ressources lunaires se caractérise par :

- Une autonomie vis-à-vis de la Terre avec la création d'un espace autarcique
- Une économie circulaire
- Une utilisation des ressources in situ
- La mise en place de moyens et infrastructures issus d'un co-développement, d'une gouvernance partagée et d'une mise en oeuvre coordonnée

Vis-à-vis de la variable coeur de notre système, cela correspond au scénario n°1 d'optimisation et d'avancée commune. La quantité d'eau potable produite quotidiennement serait croissante pendant la phase d'ajustement jusqu'à parvenir un instant T ou le système atteindrait un fonctionnement optimal.

Cependant, beaucoup d'experts⁸⁰ s'accordent pour penser que le futur de l'exploitation des ressources lunaire est soumis à un grand risque d'anarchie. Dans ce scénario, une multitude d'acteurs se livreront à une compétition intense pour l'exploitation des ressources, multipliant ainsi les infrastructures et à l'origine de tensions internationales. Cette situation correspond au scénario n°3 où l'on assistait à une course aux ressources. La quantité d'eau potable produite quotidiennement serait en croissance forte en raison de la présence de plusieurs exploitations.

Il est aujourd'hui impossible de savoir quel scénario fera le futur de l'exploitation des ressources lunaires. Comme évoqués précédemment, de nombreux faits portent à penser que ces deux futurs sont probables. Ils seront donc tous deux considérés pour émettre des recommandations sur la stratégie la plus adaptée pour le décideur.

Comme abordé dans l'analyse des stratégies du décideur, la coopération internationale tout comme la souveraineté des enjeux stratégiques sont des éléments clés dans la politique menée par le CNES. Ainsi, notre recommandation se porte sur le renforcement de la coalition européenne dans laquelle le CNES est déjà bien engagé à travers l'ESA.

⁸⁰ Questionnaire DELPHI : [Annexe 10](#)

- Une exploitation européenne permettrait au décideur de limiter les risques encourus par ce type de projet, notamment en bénéficiant d'une contribution financière partagée, une mise en commun de l'expertise scientifique et industrielle européenne, ainsi qu'un poids plus significatif de l'initiative en travaillant avec d'autres grandes agences spatiales. Dans le cas où la compétition serait forte, le CNES disposerait ainsi d'une plus grande marge de manoeuvre et d'une force de frappe plus importante.
- Cette stratégie participe également au rayonnement de la France et de l'Europe dans le secteur spatial et au niveau mondial. L'objectif serait de développer un ensemble de technologies avec une performance excellente, très attractives auprès des autres puissances spatiales qui souhaiteraient établir des partenariats avec l'Europe spatiale.

Voici quelques pistes pour actionner les leviers d'action :

Influence sur la politique spatiale

- Sensibiliser le gouvernement français et l'Union Européenne aux enjeux d'une exploitation pionnière des ressources en eau lunaire
- Renforcer le soutien financier à la politique spatiale
- Inciter plus d'initiatives des pouvoirs publics en faveur du spatial

Partenariats & alliances économiques

- Convaincre les autres principaux contributeurs de l'ESA (Allemagne, Italie, R-U, Espagne) puis le reste des Etats membres
- Identifier les industriels pour le projet, commencer à penser un consortium avec qui développer le programme

Investissement privé

- Participer à la croissance de l'activité spatiale privée en Europe en attirant de nouveaux capitaux d'investissement
- Promouvoir le secteur spatial en passant par l'opinion publique, faire davantage parler des programmes spatiaux
- Communiquer sur les retombées terrestres et la dynamique du marché

spatial

Efforts de recherche : Publications scientifiques

- Prendre en compte les faits porteur d'avenir
- Rassembler les chercheurs pour obtenir un effort européen
- Créer des programmes de recherches inter-écoles et universités européennes autour des sujets spatiaux

Initiatives en faveur du domaine spatial

- Poursuivre les efforts en lien avec la jeunesse et diffuser le modèle au reste des pays européens
- Collaborer avec des acteurs non traditionnels du secteur

Par ailleurs, l'agence spatiale chinoise (CNSA) est déjà avancée sur un programme d'exploration lunaire connu sous le nom de Chang'e. Avec ses sondes orbitales, ses robots explorateurs réalisant des expériences in situ et le retour d'échantillons lunaires, la CNSA incarne un acteur important des programmes spatiaux lunaires. Il serait alors stratégique que la France et l'Europe envisagent un partenariat avec l'agence spatiale chinoise pour collaborer ensemble sur le projet d'exploitation des ressources en eau lunaire.

Recommandations générales

Cette partie vise à donner des recommandations générales, qui pourront être déployées dans tous les scénarios et mises en place dès aujourd'hui. Ces recommandations viennent en complément des stratégies identifiées précédemment.

Nous recommandons notamment au CNES de :

- ❖ **Promouvoir la fertilisation croisée pour créer des synergies favorables et pertinentes quant à l'“Objectif Lune”**

En effet, nous avons pu remarquer pendant nos recherches et la réalisation de notre étude, que l'écosystème spatial était riche et complexe, au point que de nombreuses initiatives peuvent sembler similaires, sans n'avoir pourtant aucun lien, sans

communiquer, et sans même parfois connaître leur existence réciproque. Il serait alors utile d'adopter une réelle stratégie de communication, de collaboration et de fertilisation croisée de la part des agences et institutions spatiales. 3 axes stratégiques nous semblent pertinents :

- **Intensifier les collaborations et partenariats entre les différents acteurs du spatial et les différentes entités de l'écosystème "Objectif Lune"** comme il l'a été fait, par exemple, avec la journée du 13 décembre au CNES. En effet, ce colloque a permis de réunir de nombreux acteurs (industriels, urbanistes, architectes, étudiants, astronautes, chercheurs, etc.) et a ainsi laissé place à des échanges transversaux, des réflexions pluridisciplinaires et à de potentiels partenariats.
- **"Désiloter" les actions entre l'ESA, le CNES, et d'autres agences.** Il serait intéressant de développer des complémentarités lorsque l'on observe certains manques dans l'une ou l'autre des institutions (manque de compétences, manque de ressources etc.) et activer des synergies et des dispositifs collaboratifs lorsque des doublons sont présents. Par exemple, si deux groupes de réflexion travaillent sur le même sujet au CNES, et à l'ESA, ils pourraient s'enrichir en travaillant ensemble.
- **Poursuivre les dynamiques de fertilisation croisée en intégrant véritablement les universités et les startups.** Nous avons, dans les leviers du décideur, soulevé cette nécessité d'échanger et de poursuivre les initiatives mêlant des partenariats universitaires et des travaux collaboratifs avec les étudiants. Il s'agit d'intégrer, comme les étudiants commencent à l'être, les startups dans les processus de réflexion et dans la prise de décision. En effet, nous avons observé que de nombreuses startups de la "Space Tech" se développent, notamment en France, et pourtant elles restent isolées et non connues de la majorité des institutions spatiales. Il est donc nécessaire de développer ces liens qui permettraient des transferts de technologies et des mécanismes de diffusion de la connaissance pertinents, enrichissants et rentables pour les deux parties (pour les agences spatiales comme pour les startups et petites entreprises). Il est nécessaire pour les institutions spatiales de considérer, en outre de la Recherche et Développement des industriels traditionnels, les innovations pionnières et les réflexions alternatives de petites structures ou d'étudiants.

❖ **Véritablement intégrer l'aspect écologique que peut apporter la colonisation lunaire afin de rassembler le plus de personnes possibles autour de ce projet**

Comme nous l'avons vu, de nombreuses personnes sont contre l'exploration spatiale et lunaire, notamment pour une question d'urgence écologique. Pourquoi vouloir s'accaparer les ressources d'une seconde planète au moment même où nous réalisons l'impact néfaste de l'appropriation des ressources naturelles par l'Homme sur notre propre planète ? Pourquoi s'intéresser aux problématiques de la vie sur la Lune, alors que nous avons tant de défis sociétaux et environnementaux à relever sur Terre ? Tant de questions que se posent légitimement certains citoyens et qui peuvent constituer des freins à un engouement potentiel pour l'exploration lunaire.

Il serait pertinent pour le CNES et les autres agences spatiales d'avoir un rôle clé de communicant et de vulgarisateur afin d'éduquer et de communiquer autour des aspects et atouts écologistes de la colonisation lunaire. Ceci pourrait améliorer la vision des personnes réfractaires et leur compréhension des enjeux de l'exploration lunaire.

En effet, l'installation de la vie humaine sur la Lune dans "Objectif Lune", fait de la durabilité l'un de ses fers de lance. Les technologies pensées et développées intègrent, pour la plupart, à l'instar de notre exploitation de l'eau lunaire, des notions de recyclage et de "circuit fermé". La base permettra également de tester des technologies, d'expérimenter dans un milieu sous contrainte et ainsi de développer des innovations "low-tech" ou de pointe qui pourront être applicables sur Terre. Celles-ci seraient utiles au sein de la transition écologique et solidaire, puisqu'elles pourraient par exemple s'établir à destination de zones soumises à des conditions critiques ou extrêmes du point de vue de la disponibilité des ressources en eau.

Communiquer sur les avantages et retombées positives de l'exploration lunaire pour la protection de notre Planète Terre permettrait de restreindre les facteurs d'hostilité reposant sur des arguments écologiques et d'augmenter le nombre de personnes favorables à ce projet. Ainsi, l'engouement politique aura plus de chances de se réaliser concrètement.

Finalement, plus de communication autour des enjeux de la colonisation lunaire, démocratiserait ces initiatives spatiales et réduirait la distance psychologique des individus vis à vis de ces initiatives, afin qu'ils deviennent "space friendly".

CONCLUSION

Cette étude a permis, nous l'espérons, de créer un système prospectif permettant au décideur de se projeter à travers différents scénarios. Ces scénarios ont été construits à l'aide des jeux d'interactions entre variables et acteurs mis en évidence tout au long de cette étude. Nous rappelons aussi que cette prospective traite le sujet en se plaçant à l'horizon 2050 sur une base de 50 personnes.

Un des principaux résultats de notre étude est la nécessité d'une coopération internationale entre gouvernements et acteurs du privé. Nous avons vu à travers un premier scénario "Optimisation et avancée commune", l'intérêt d'une coopération au niveau européen. Dans un autre scénario "Course aux ressources", nous avons cette fois-ci recommandé une coopération mondiale.

Au sujet de cette coopération, nous avons aussi mis en évidence la nécessité d'une réglementation de l'activité spatiale et principalement des gouvernements entre eux pour inciter à une mise en commun et éviter l'appropriation des ressources. Une régulation des acteurs privés est aussi indispensable, étant donné la difficulté et l'incertitude à faire respecter des lois terrestres à une telle distance (psychologique comme physique). Elle doit tenir ses fondements dans l'incitation à la coopération à travers, notamment, des partenariats. C'est donc une régulation s'apparentant à une régulation commerciale spécifique à l'exploitation des ressources lunaires et favorisant le développement d'une économie lunaire qui doit être privilégié à une régulation répressive. Nous pensons que le CNES peut jouer un rôle important dans la doctrine et faire évoluer ce qui est encore aujourd'hui un bac à sable juridique.

Enfin, un second résultat souligne le rôle important du grand public dans la conquête spatiale. Le contexte socio-sanitaire actuel ainsi que le contexte socio-environnemental de la fin d'année 2019 nous ont montré la capacité des populations à se mobiliser. La construction d'un imaginaire collectif autour du spatial permettrait de faire saisir les enjeux spatiaux au plus grand nombre, favorisant ainsi les synergies entre d'autres problématiques telles que l'amélioration des conditions de vie sur Terre, les avancées scientifiques, ou la lutte pour l'environnement.

BIBLIOGRAPHIE

Rapports institutionnels

Rapport du Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche : Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. (s. d.). *Stratégie spatiale française*. Consulté à l'adresse

<https://www.vie-publique.fr/sites/default/files/rapport/pdf/124000161.pdf>

Rapport Public Annuel 2019 de la Cour des Comptes : Cour des Comptes. (2019a). *La politique des lanceurs spatiaux : d'importants défis à relever - Rapport Public Annuel 2019*. Consulté à l'adresse

https://www.ccomptes.fr/system/files/2019-02/03-politique-lanceurs-spatiaux-Tome-1_0.pdf

Académie des Sciences . (2006). *La recherche spatiale française* . Consulté à l'adresse <https://www.edp-open.org/images/stories/books/fulldl/rapport2.pdf>

Sustainable Moon. (2019). ISU disponible sur le lien suivant :

https://isulibrary.isunet.edu/doc_num.php?explnum_id=1628

Articles de recherche

Spudis, Paul & Bussey, Ben & Plescia, Jeffrey & Josset, Jean-Luc & Beauvivre, Stéphane. (2008). Geology of Shackleton Crater and the south pole of the Moon. *Geophys. Res. Lett.* 35. 10.1029/2008GL034468.

Articles de presse en ligne

2020 : la décennie du retour sur la Lune. (2020, janvier 6). Consulté à l'adresse

<https://www.franceculture.fr/sciences/2020-la-decennie-du-retour-sur-la-lune>

Angel, M. (2019, mars 11). Le Cnes met 4 start-up françaises innovantes à l'honneur. Consulté à l'adresse

<https://www.industrie-techno.com/article/le-cnes-met-a-l-honneur-4-start-up-francaises-a-sa-journee-de-l-innovation.54945>

ANGELS - Satellite Missions - eoPortal Directory. (s. d.). Consulté le 21 avril 2020, à

l'adresse <https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/content/-/article/angels>

Bauer, A. dans Les Echos Executives. (2018, mai 16). Le CNES lance un fonds d'innovation dans le secteur spatial. Consulté à l'adresse <https://business.lesechos.fr/entrepreneurs/financer-sa-creation/0301676252144-le-cn-es-lance-un-fonds-d-innovation-dans-le-secteur-spatial-320956.php>

Bauer, A. (2017, novembre 30). L'espace, le nouveau terrain de jeu du capital-risque. Consulté à l'adresse <https://business.lesechos.fr/entrepreneurs/financer-sa-creation/030956301311-l-espace-le-nouveau-terrain-de-jeu-du-capital-risque-316470.php>

Beck, J. (2016, mars 19). China's Helium-3 Program: A Global Game-Changer. Consulté à l'adresse <https://www.spacesafetymagazine.com/space-on-earth/everyday-life/china-helium-3-program/>

BPI France . (2019a, juin 5). Demain: les promesses du New Space. Consulté à l'adresse <https://www.bpifrance.fr/A-la-une/Actualites/Demain-les-promesses-du-New-Space-46641>

C.D. (2009, septembre 18). Froids records sur la Lune. Consulté à l'adresse https://www.sciencesetavenir.fr/espace/froids-records-sur-la-lune_33037

Daninos, F. (2017, septembre 27). Un millier de colons sur la Lune en 2050 ? Consulté à l'adresse https://www.sciencesetavenir.fr/espace/exploration/un-millier-de-colons-sur-la-lune-en-2050_116767

Decourt, R. (s. d.). New Space. Consulté à l'adresse <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/new-space-new-space-16591/>

Demeersman, X. (2017, mai 5). Bientôt un abri lunaire construit avec une imprimante 3D ? Consulté à l'adresse <https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/astronautique-bientot-abri-lunaire-construit-imprimante-3d-44480/>

Dupont-Besnard, M. (2019, octobre 10). On sait enfin comment extraire l'oxygène du sol lunaire (et ce sera utile pour les futures missions). Consulté à l'adresse <https://www.numerama.com/sciences/560016-on-sait-enfin-comment-extraire-loxygene-du-sol-lunaire-et-ce-sera-utile-pour-les-futures-missions.html>

Ferro, S. (2015, septembre 8). How Do Astronauts Get Drinking Water on the ISS?

Consulté à l'adresse

<https://www.mentalfloss.com/article/67854/how-do-astronauts-get-drinking-water-iss>

Garonne, C. (2020, janvier 8). Les CubeSats, un exemple d'innovation low cost dans

l'industrie spatiale. Consulté à l'adresse

<https://theconversation.com/les-cubesats-un-exemple-dinnovation-low-cost-dans-lindustrie-spatiale-129375>

Guillemoles, A. (2017, mars 31). SpaceX ouvre la voie au recyclage des lanceurs

spatiaux. Consulté à l'adresse

<https://www.la-croix.com/Sciences-et-ethique/Sciences/SpaceX-ouvre-voie-recyclage-lanceurs-spatiaux-2017-03-31-1200836332>

Guillermard, V. (2019, novembre 28). Les Européens augmentent fortement leur

budget spatial. Consulté à l'adresse

<https://www.lefigaro.fr/flash-eco/l-agence-spatiale-europeenne-esa-vote-un-budget-record-de-14-4-milliards-d-euros-20191128>

Insider, T. (2018, avril 9). Here's how much money it actually costs to launch stuff into

space. Consulté à l'adresse

<https://www.businessinsider.fr/us/spacex-rocket-cargo-price-by-weight-2016-6>

Janicot, S. (2019, juillet 19). Claudie Haigneré, objectif lune. Consulté à l'adresse

<https://www.notretemps.com/loisirs/actualites-loisirs/claudie-haignere-objectif-lune.i198376>

Jules, R. (2016, novembre 17). Les retombées terrestres de l'Europe spatiale. Consulté

à l'adresse

<https://www.latribune.fr/opinions/editos/les-retombees-terrestres-de-l-europe-spatiale-617540.html>

Lesage, N. (2019b, février 21). Les astronautes pourront-ils un jour faire de l'eau sur la

Lune à l'aide du vent solaire ? Consulté à l'adresse

<https://www.numerama.com/sciences/465881-les-astronautes-pourront-ils-un-jour-faire-de-leau-sur-la-lune-a-laide-du-vent-solaire.html>

Point.Fr, L. (2019, février 28). Énergie : bientôt des centrales solaires dans l'espace ?

Consulté à l'adresse

https://www.lepoint.fr/sciences-nature/energie-bientot-des-centrales-solaires-dans-l-espace-28-02-2019-2297168_1924.php#

LEXPRESS.fr avec AFP. (2020, avril 21). "Un millier de personnes" sur la Lune d'ici 2050, l'ESA en rêve. Consulté à l'adresse https://www.lexpress.fr/actualite/sciences/un-millier-de-personnes-sur-la-lune-d-ici-2050-l-esa-en-reve_1946010.html

Mayer, N. (2019, juillet 26). La Lune possède plus d'eau que prévu à sa surface. Consulté à l'adresse <https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/astronomie-lune-possede-plus-eau-prevu-surface-16142/>

Meddah, H. (2017, décembre 7). 2 700 milliards. Consulté à l'adresse <https://www.usinenouvelle.com/editorial/2-700-milliards.N622983>

Perrin, E. (2010, octobre 22). Le sol lunaire dévoile ses richesses. Consulté à l'adresse https://www.maxisciences.com/lune/le-sol-lunaire-devoile-ses-richesses_art9916.html

Point.Fr, L. (2017, octobre 3). Les retombées bien terrestres du travail de Pesquet dans l'espace. Consulté à l'adresse https://www.lepoint.fr/sciences-nature/les-retombees-bien-terrestres-du-travail-de-pesquet-dans-l-espace-03-10-2017-2161705_1924.php#

R., M. (2018, novembre 26). L'impression 3D de régolithe lunaire, un moyen de conquérir la Lune? Consulté à l'adresse <https://www.3dnatives.com/limpression-3d-de-regolithe-lunaire-261120183/>

Rouat, S. (2018, décembre 21). Question de la semaine : Y a-t-il des ressources exploitables sur la Lune ? Consulté à l'adresse https://www.sciencesetavenir.fr/espace/y-a-t-il-des-ressources-exploitable-sur-la-lune_130457

Sacco, L. (2013, juin 6). Le mystère des anomalies du champ de gravité de la Lune résolu. Consulté à l'adresse <https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/astronomie-mystere-anomalies-champ-gravite-lune-resolu-46806/>

Sacco, L. (2019a, avril 20). Sur la Lune, les pluies de météorites libèrent l'eau du sol. Consulté à l'adresse <https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/lune-lune-pluies-meteorites-liberent-eau-sol-75759/>

Sacco, L. (2019, juillet 29). Le sol de la Lune peut alimenter une base lunaire en énergie. Consulté à l'adresse

<https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/univers-sol-lune-peut-alimenter-base-lunaire-energie-7843/>

Un nouveau souffle pour l'industrie spatiale | Blog TBS Research Centre. (s. d.).

Consulté le 21 avril 2020, à l'adresse

<https://www.tbsearch.fr/un-nouveau-souffle-pour-lindustrie-spatiale-modele-opportunit-es-et-menaces/>

V. (2019, mars 22). L'agriculture spatiale – 3 – La question de l'eau. Consulté à

l'adresse <http://dans-la-lune.fr/2019/03/22/lagriculture-spatiale-3-la-question-de-leau/>

Water in space. (s. d.). Consulté à l'adresse

https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/International_Space_Station/Water_in_space

Water Recovery System, International Space Station. (2009, février 16). Consulté à

l'adresse https://www.water-technology.net/projects/iss_water_recovery/

Sites internet

CosmiCapital | The New Digital Frontier. (2020, mars 25). Consulté à l'adresse

<https://cosmicapital.com>

Ressources provenant de sites officiels institutionnels

- **ANRT**

Objectif lune. (2020, avril 10). Consulté à l'adresse

<http://www.anrt.asso.fr/fr/objectif-lune-32335>

- **CEA**

C. (s. d.-a). Aéronautique et spatial. Consulté le 21 avril 2020, à l'adresse

<http://www.cea-tech.fr/cea-tech/Pages/secteurs-applicatifs/transport-et-mobilite/x2x-aeronautique-spatial.aspx>

- **FONDATION MELISSA**

MELISSA. (s. d.-b). Melissa Foundation. Consulté le 21 avril 2020, à l'adresse

<https://www.melissafoundation.org/page/melissa-project>

- **CNES**

Jeunes | De l'espace pour la Terre. (s. d.). Consulté le 21 avril 2020, à l'adresse <https://jeunes.cnes.fr/fr/>

Un budget exceptionnel. (s. d.). Consulté à l'adresse <https://cnes.fr/fr/budget-exceptionnel>

L'espace, une ambition pour la France. (s. d.). Consulté à l'adresse <https://cnes.fr/fr/web/CNES-fr/11505-ambition-2020-l-espace-une-ambition-pour-la-france.php>

Contrat d'objectifs et de performance Etat-CNES. (s. d.). Consulté à l'adresse <https://cnes.fr/fr/le-cnes/le-cnes-en-bref/contrat-dobjectifs-et-de-performance-etat-cnes-2016-2020>

Le CNES et bioMérieux prolongent leur collaboration sur Aquapad, outil unique d'évaluation de la qualité de l'eau. (s. d.). Consulté à l'adresse <https://presse.cnes.fr/fr/le-cnes-et-biomerieux-prolongent-leur-collaboration-sur-aquapad-outil-unique-devaluation-de-la>

- **ESA**

Site officiel - Consulté à l'adresse <https://www.esa.int>

L'ESA : faits et chiffres. (s. d.). Consulté à l'adresse http://www.esa.int/Space_in_Member_States/France/L_ESA_faits_et_chiffres

Rosetta. (s. d.). Consulté le 21 avril 2020, à l'adresse https://www.esa.int/Enabling_Support/Operations/Rosetta

Helium-3 mining on the lunar surface. (s. d.). Consulté à l'adresse https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Space_for_Earth/Energy/Helium-3_mining_on_the_lunar_surface

Oxygen and metal from lunar regolith. (s. d.). Consulté à l'adresse https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2019/10/Oxygen_and_metal_from_lunar_regolith

Water in space. (s. d.-b). Consulté le 21 avril 2020, à l'adresse https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/International_Space_Station/Water_in_space

Site du Hackathon Act in Space <https://actinspace.org>

- **NASA**

Water on the Space Station | Science Mission Directorate. (s. d.). Consulté le 21 avril 2020, à l'adresse

https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2000/ast02nov_1

- **Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation**

Les Centres spatiaux universitaires (CSU). (s. d.). Consulté à l'adresse

<https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/cid139219/les-centres-spatiaux-universitaires-csu.html>

Politique spatiale européenne. (s. d.). Consulté le 21 avril 2020, à l'adresse

<https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/pid26044-cid56088/politique-spatiale-europeenne.html>

- **Sénat**

Projet de loi de finances pour 2020 : Recherche et enseignement supérieur. (s. d.) à

l'adresse <https://www.senat.fr/rap/a19-145-5/a19-145-56.html>

Vidéos

ESA. (2019b, juillet 9). *Space for our future* [Fichier vidéo]. Consulté à l'adresse

[http://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2019/07/Space_for_our_future/\(lang\)/fr](http://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2019/07/Space_for_our_future/(lang)/fr)

CNES. (2020, mars 25). *Europe & Espace : les atouts #5* [Fichier vidéo]. Consulté à

l'adresse <https://www.youtube.com/watch?v=kDf0jaYsTcs>

Université de Pau et des Pays de l'Adour. (2018, mars 23). *Conférence de Roland*

Lehoucq : Parlons de sciences grâce à la fiction [Fichier vidéo]. Consulté à l'adresse

https://www.youtube.com/watch?v=KBGQzZh8u_o

NASA Video. (2017, novembre 14). *Kilopower: A Gateway to Abundant Power for Exploration* [Fichier vidéo]. Consulté à l'adresse

https://www.youtube.com/watch?time_continue=36&v=DcdfMcyjUy_U&feature=emb_logo

Zenon Research. (2020, avril 1). *Should you invest in Moon Mining?* [Fichier vidéo].

Consulté à l'adresse https://www.youtube.com/watch?v=Q_MpUPvxT9g

Agence spatiale canadienne. (2013a, septembre 23). *Le recyclage de l'eau à bord de l'ISS* [Fichier vidéo]. Consulté à l'adresse

<https://www.youtube.com/watch?v=OMZJBUmEirQ>

Cnet. (2019b, juillet 22). *Our future on the moon: What will the moon look like in 2069?* [Fichier vidéo]. Consulté à l'adresse

<https://www.cnet.com/videos/our-future-on-the-moon-what-will-the-moon-look-like-in-2069/>

CNES. (2016, avril 1). *New Space : les nouveaux acteurs du spatial* [Fichier vidéo]. Consulté à l'adresse

https://www.youtube.com/watch?time_continue=37&v=jRefxIWAUpw&feature=emb_logo