



UTILISATION DES RESSOURCES IN SITU

Une occasion d'une génération
pour le Canada

Rapport produit par la
Société canadienne des mines spatiales pour
Fabrication de prochaine génération Canada (NGen)

NGen

ngen.ca


CSMC SCMS
CANADIAN SPACE MINING CORPORATION SOCIÉTÉ CANADIENNE DES MINES SPATIALES

csmc-scms.ca

NGen



© Société canadienne des mines spatiales, 2023

Tous droits réservés. Aucune partie de la présente publication ne peut être reproduite, distribuée ou transmise sous quelque forme ou par quelque moyen que ce soit sans l'autorisation écrite préalable des éditeurs, sauf dans le cas d'une brève citation insérée dans une revue critique ou d'une utilisation non commerciale autorisée par la loi sur les droits d'auteur.

Fabrication de prochaine génération Canada (NGen)

175, chemin Longwood Sud, bureau 301
Hamilton, ON L8P 0A1

info@ngen.ca

ngen.ca

Société canadienne des mines

66, rue Wellington Ouest
Tour de la banque TD, bureau 5300
Case postale 48
Toronto, ON M5K 1E6

get.involved@csmc-scms.ca

csmc-scms.ca

Mise en page et graphisme de couverture : Renée Depocas
Photo de couverture : NASA | Unsplash

Table des matières

4	Résumé
10	1 Introduction
17	1.1 URIS : favoriser l'innovation pour les industries stratégiques du Canada
18	1.2 Les bases de l'URIS
24	1.3 L'actuelle stratégie spatiale du Canada ne suffit pas
27	1.4 Une industrie en mouvement
31	2 Retombées pour le Canada
33	2.1 Véhicules autonomes, robotique et intelligence artificielle
34	2.1.1 Fabrication de pointe
37	2.1.2 Industrie minière
39	2.1.3 Transport
40	2.2 Géoscience, traitement des matériaux et technologies quantiques
41	2.2.1 Industrie minière
44	2.3 Production et stockage d'énergie
49	2.4 Fabrication additive
51	2.5 Un secteur d'innovation indirecte : les soins de santé
53	2.6 Un secteur d'innovation indirecte : l'agriculture
56	2.7 Résumé de l'alignement sur les politiques actuelles
56	2.7.1 Leadership mondial dans l'industrie minière
56	2.7.2 Stratégie sur les minéraux critiques
57	2.7.3 Objectifs de carboneutralité
58	2.7.4 Stratégie nationale de développement communautaire autochtone
60	2.7.5 Inspirer la prochaine génération d'innovateurs des disciplines STIM
62	3 Recommandations principales
70	4 Conclusion : Opportunités pour le Canada
72	À propos de la SCMS
74	À propos de NGEN
75	Bibliographie

Résumé

Du programme Apollo au programme Artemis, l'exploration spatiale a toujours inspiré l'innovation et alimenté la croissance économique. Aujourd'hui, après des décennies de progrès modérés, une nouvelle ère d'activités commerciales dans l'espace s'annonce. Les gouvernements et l'industrie du monde entier font valoir d'urgence leurs intérêts scientifique, militaire et commercial relativement à l'orbite terrestre basse, à l'espace cislunaire et à la surface lunaire. Ces efforts, appuyés par la NASA et renforcés par les accords multinationaux Artemis, permettent de nouvelles économies dans les domaines de l'exploration lunaire, de l'extraction de ressources in situ et de la recherche scientifique. Il s'ensuit une occasion sans précédent, la valeur de l'industrie spatiale commerciale devant passer de 390 milliards de dollars en 2022 à 1 400 milliards de dollars d'ici 2040 (Bloomberg, 2022).

Au centre de cette croissance se trouve le développement de l'utilisation des ressources in situ (URIS), c'est-à-dire la fabrication de produits avec des matériaux locaux, plutôt qu'avec des matériaux apportés de la Terre. L'URIS est nécessaire pour soutenir des opérations humaines et robotiques en permanence dans l'espace. Elle exige la collaboration de plusieurs secteurs stratégiques (exploration, traitement et utilisation des ressources; production et stockage d'énergie, aérospatiale, transport et fabrication et construction de pointe) et de l'innovation dans les technologies de prochaine génération (intelligence artificielle, véhicules autonomes, robotique, géoscience, détection quantique, énergies propres et fabrication). Le Canada possède une expertise critique et un intérêt stratégique dans tous ces domaines.

Une stratégie fédérale en matière d'URIS aurait des effets immédiats sur l'innovation, les talents et les emplois dans des secteurs qui représentent col-

lectivement 40 % du PIB du Canada et plus de 2,5 millions d'emplois, mais dans lesquels le Canada a récemment reconnu qu'il prenait du retard par rapport à la concurrence mondiale.

Selon le Plan pour l'innovation et les compétences annoncé dans le budget fédéral de 2017, plusieurs facteurs expliquent le déclin du Canada dans ses industries stratégiques, déclin qui menace la force à long terme du pays et sa compétitivité à l'échelle mondiale. Le plan mentionne la faiblesse de l'investissement dans la R et D, la pénurie de travailleurs qualifiés et le manque de collaboration entre les entreprises, le milieu universitaire et le gouvernement. Le rapport indique que l'intensité de R et D du Canada, mesurée en pourcentage du PIB investi dans la R et D, est constamment en-dessous de la moyenne des autres pays de l'OCDE. En 2015, l'intensité de R et D du Canada était de seulement 1,7 %, comparativement à la moyenne de 2,4 % des pays membres de l'OCDE.

L'industrie aérospatiale et spatiale du Canada est une exception remarquable et continue de faire preuve d'une impressionnante capacité d'innovation face à ces défis.

Une ambitieuse stratégie fédérale d'innovation en matière d'URIS axée sur les missions mobiliserait les talents et la capacité d'innovation du secteur aérospatial du Canada et les arrimerait aux secteurs industriels stratégiques dans lesquels le Canada a pris du retard sur ses concurrents mondiaux. Au bout du compte, une stratégie d'URIS procurerait des avantages à tous les intervenants et à l'égard des mandats gouvernementaux concernant ces secteurs, comme il est résumé dans le tableau à la page suivante.

La Société canadienne des mines spatiales (SCMS) a constaté que ces effets sont déjà à l'œuvre, au bénéfice des universités, des petites et moyennes entreprises, des collectivités autochtones et des mandats gouvernementaux du Canada, dans le cadre de programmes isolés ici et là au pays. L'Université Queen's, par exemple, offre un programme de génie minier dans l'espace qui attire des étudiants hautement qualifiés et qui génère de la propriété intellectuelle perturbatrice, caractéristique du secteur spatial, qui est déployée dans des applications à l'industrie minière terrestre. Il a aussi placé des étudiants

Technologies	Industries	Impact social	Mandats gouvernementaux
<ul style="list-style-type: none"> • Véhicules autonomes • Intelligence artificielle • Robotique • Détection quantique • Géoscience • Traitement des matériaux • Fabrication additive • Production d'énergie • Stockage d'énergie 	<ul style="list-style-type: none"> • Fabrication de pointe • Énergie • Aérospatiale • Transport 	<ul style="list-style-type: none"> • Changements climatiques • Transition énergétique équitable • Intendance des terres nordiques • Progrès des sciences et de l'exploration 	<ul style="list-style-type: none"> • Positionnement du Canada comme premier pays minier • Carboneutralité • Soutien de la R et D • Minéraux critiques • Formation et création d'emplois • Transition industrielle • Stratégie pancanadienne de géoscience • Stratégie quantique nationale du Canada • Stratégie pancanadienne en matière d'intelligence artificielle • Stratégie nationale de développement communautaire autochtone

diplômés hautement qualifiés dans des sociétés minières canadiennes traditionnelles qui avaient auparavant du mal à attirer des talents en génie de prochaine génération. De façon plus ou moins semblable, le responsable scientifique de la société Rio Tinto a indiqué à la SCMS que les nouvelles méthodes d'exploration et d'extraction des ressources dans l'espace s'alignent parfaitement sur les nouvelles activités minières durables et sur celles ayant trait aux minéraux critiques sur Terre et qu'elles offrent une occasion de motiver une nouvelle génération de main-d'œuvre pour l'industrie des ressources. Un autre exemple est l'initiative Nouveaux horizons en santé de l'Agence spatiale canadienne qui a réuni des chefs de file du secteur canadien des soins de santé et des innovateurs du secteur spatial afin de concevoir de nouvelles façons de donner accès aux soins de santé aux populations isolées. Une stratégie fédérale

en matière d'URIS unifierait et étendrait ces effets aux industries critiques et aux intervenants du pays, créant ainsi un formidable effet d'innovation.

Les avantages à court terme des innovations de l'URIS auront aussi un effet transformateur relativement à certains objectifs stratégiques fédéraux, notamment :

- Le Plan de réduction des émissions pour 2030 : Un air pur et une économie forte (Gouvernement du Canada, 2022b)
- La Stratégie canadienne sur les minéraux critiques (Gouvernement du Canada, 2022a)
- La Stratégie pancanadienne de géoscience (Comité national des commissions géologiques, 2022), la Stratégie pancanadienne en matière d'intelligence artificielle (Institut canadien de recherches avancées, 2022), et la Stratégie quantique nationale du Canada (Gouvernement du Canada, 2022c)
- La Stratégie nationale de développement communautaire autochtone (Gouvernement du Canada, 2021b)

Le Canada est réputé depuis longtemps pour fournir des technologies de **soutien** essentielles aux missions d'exploration spatiale. L'URIS constitue plutôt pour le pays une occasion d'une génération de **prendre les devants** à la conjoncture du moment, des lacunes technologiques critiques et des forces du pays. Le présent rapport comprend trois parties :

1. Une introduction aux enjeux, aux concepts et à la dynamique du marché se rattachant à l'URIS;
2. Un exposé des effets de grande portée que peut avoir une stratégie d'innovation en matière d'URIS axée sur les missions sur les industries stratégiques, les objectifs sociaux et les politiques gouvernementales;
3. Un résumé des recommandations stratégiques, à savoir :
 - Une stratégie claire qui signale l'intention du pays et sa revendication d'une position de chef de file de l'industrie de l'URIS;
 - Un cadre réglementaire bien conçu;

- Un soutien financier des supergrappes d'innovation et des projets stratégiques;
- Une mise à profit des forces industrielles du pays, y compris l'élargissement des dispositions fiscales particulières pour l'industrie minière qui ont propulsé le Canada vers sa position de chef de file mondial de l'exploration et du financement des ressources;
- La réévaluation des pratiques de passation des marchés spatiaux afin de pouvoir suivre le rythme de l'innovation des pays concurrents.

En fin de compte, le rapport signale l'opportunité évidente pour le Canada d'adopter une ambitieuse stratégie d'innovation en matière d'URIS axée sur les missions. Une telle stratégie déverrouillerait un nouveau secteur économique et préparerait le pays stratégiquement à la prochaine frontière de l'ingéniosité humaine et de l'exploration. Elle stimulerait aussi l'innovation dans les industries stratégiques du pays, tout en soutenant les mandats fédéraux et en renforçant la compétitivité mondiale du Canada pour des décennies à venir.

1

Introduction



1 Introduction

L'espace a toujours inspiré l'innovation et alimenté la croissance économique. Après des décennies de collaboration et de progrès, une nouvelle ère d'exploration spatiale commence avec une concurrence, une agilité et des possibilités commerciales jamais vues. Alors que l'activité spatiale passée était dominée par de grands donneurs d'ordre, aujourd'hui, des entreprises NewSpace¹, plus petites et plus agiles, définissent et mènent souvent les objectifs spatiaux stratégiques qui non seulement aident les gouvernements à atteindre leurs propres objectifs stratégiques, mais ajoutent aussi une croissance économique sans précédent aux industries terrestres et spatiales. Les résultats sont impressionnants, et l'industrie spatiale commerciale devrait voir son chiffre d'affaires passer de 390 milliards de dollars en 2022 à 1 400 milliards de dollars d'ici 2040 (Bloomberg, 2022) et produire des innovations au potentiel incalculable pour la vie sur Terre.

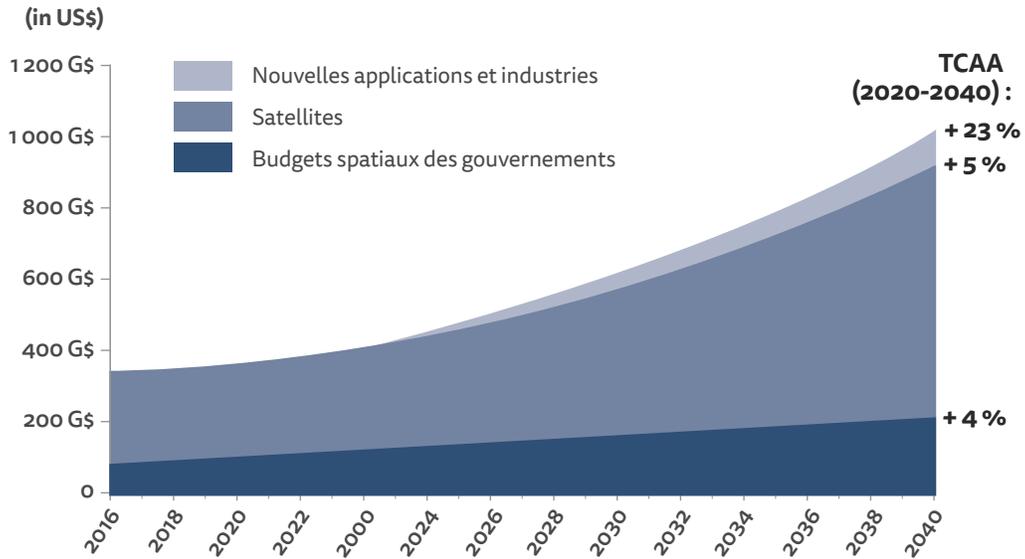
L'innovation pour l'espace a une longue histoire de soutien à la vie sur Terre. L'exemple le plus évident est le GPS, que plus de 23 millions de Canadiens utilisent pour faire toutes sortes de choses, de la navigation dans la circulation au guidage autonome des véhicules miniers et agricoles. La fibre de carbone et

¹ L'idée de NewSpace renvoie à l'émergence d'une industrie privée des vols spatiaux et à une industrie aérospatiale ayant une perspective clairement commerciale, indépendante de la politique gouvernementale, des motivations politiques et des entrepreneurs traditionnels (Santamaria, 2021).

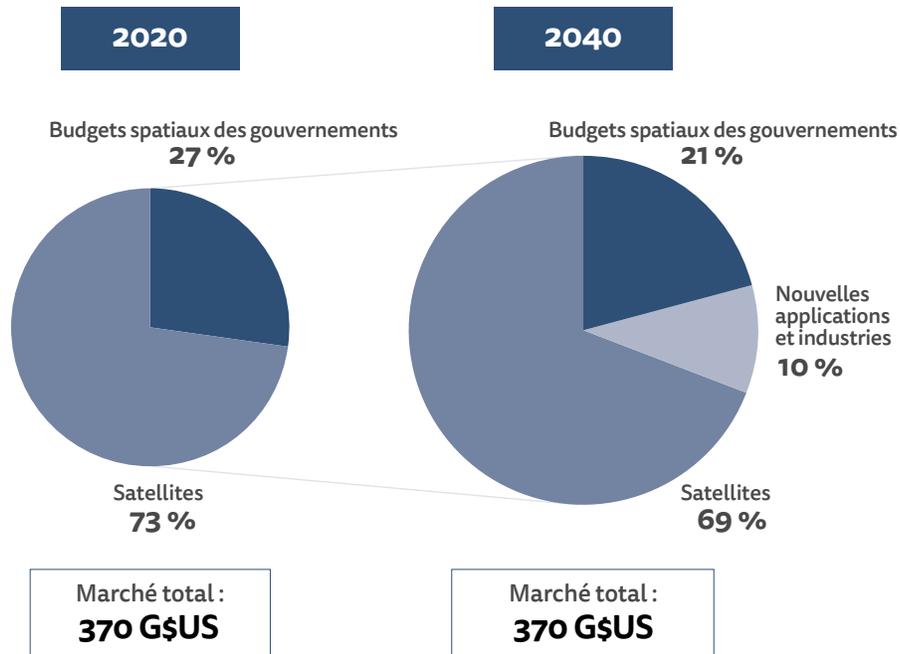
le ruban autoagrippant (Velcro) ont aussi été conçus à l'origine pour l'espace. Les téléphones cellulaires dépendent de la technologie des semi-conducteurs à oxyde de métal complémentaire (CMOS) développée pour prendre des photographies de la Terre à partir de satellites orbitaux. Les détecteurs de fumée, les lentilles résistant aux rayures, les dépoussiéreurs... La liste est sans fin. Le programme de transfert technologique de la NASA a transféré aux secteurs universitaire et commercial des milliers d'innovations développées aux fins d'exploration et de découverte spatiales, afin d'en maximiser les avantages pour nous tous sur Terre. Ces innovations ont non seulement pris la forme d'inventions délibérées, mais aussi d'inventions accidentelles, la nécessité de résoudre des problèmes complexes dans l'espace ayant mené à des technologies dites de rupture pouvant être appliquées à d'autres fins. Un exemple frappant de cela est la création de la technologie d'imagerie par résonance magnétique (IRM), qui doit largement au traitement des images développé dans le cadre des travaux de la NASA sur les satellites et les télescopes (Heraeus, s.d.).

Autant l'exploration spatiale devient plus ambitieuse, autant les technologies connexes et les avantages correspondants prennent de l'ampleur. Dans les vingt années à venir, les astronautes auront besoin de la capacité de transformer les ressources de la Lune en air respirable, en eau propre à boire et à faire pousser des plantes et en ressources pour fabriquer des propergols pour fusées et des matériaux de construction dans l'espace. Par exemple, l'observation, la science et l'imagerie planétaires font sans cesse des progrès. Northern Sky Research, une firme mondiale d'études de marché et de conseil, prévoit que le chiffre d'affaires mondial des données et des services d'observation de la Terre par satellite passera de plus de 3 milliards de dollars aujourd'hui à 7,2 milliards de dollars d'ici 2028. Ces prévisions, toutefois, ne prennent pas correctement en compte les innovations en matière de détection quantique et d'intelligence artificielle et d'autres avancées motivées par l'exploration des ressources et la connaissance situationnelle dans l'espace, qui sont susceptibles de transformer la télédétection, l'exploration et la science. Les services d'accès Internet par satellite sont un autre exemple. Cette industrie a ajouté 2,2 milliards de dollars au

FIGURE 1 : Prédiction de l'économie spatiale (Citi GPS, 2022)



Source : Citi Research, Satellite Industry Association (2016-2020)



Source : Citi Research, Satellite Industry Association (2016-2020)

PIB du Canada au cours la décennie qui a précédé l'année 2017, et elle pourrait ajouter 2,7 milliards de dollars à l'économie canadienne au cours des dix prochaines années seulement en résolvant plusieurs problèmes dans les régions rurales et éloignées concernant la productivité et l'accès aux services gouvernementaux essentiels et aux soins de santé. À mesure que seront développées de nouvelles technologies pour pallier la bande passante non conventionnelle et répondre aux besoins de communication en soutien aux activités industrielles entre la Terre, la Lune et au-delà, les capacités et la valeur terrestre des services d'accès Internet par satellite augmenteront à des taux inimaginables.

Au centre de la nouvelle ère d'activités spatiales se trouve le développement de l'utilisation des ressources in situ (URIS) : la fabrication de produits avec des matières locales.

Au centre de la nouvelle ère d'activités spatiales se trouve le développement de l'utilisation des ressources in situ (URIS) : la fabrication de produits avec des matières locales, plutôt que le transport de produits fabriqués sur Terre. La gravité terrestre est trop forte pour envoyer constamment des ressources dans l'espace. Le rapport entre la consommation de carburant et la capacité d'emport pour quitter l'atmosphère terrestre est de 10 pour 1. Cela signifie qu'il faudrait dix vaisseaux pour en ravitailler un qui aurait été placé en orbite terrestre basse. Même si le coût des lancements devient plus abordable, les estimations actuelles sont encore prohibitives, allant jusqu'à 100 000 dollars US le kilogramme pour atteindre une orbite terrestre basse. L'approvisionnement en ressources terrestres pour soutenir l'exploration spatiale à long terme n'est donc pas viable. L'énergie solaire est l'un des exemples les plus anciens et les plus simples de réponse à ce problème grâce à l'URIS : le captage et la transformation de l'énergie solaire pour produire de l'énergie in situ. La nouvelle ère d'activités spatiales étend l'URIS à la

découverte et à la transformation in situ d'éléments critiques, comme l'oxygène et l'eau pour le maintien de la vie, ou les minéraux et les métaux pour pouvoir utiliser des techniques de fabrication de pointe in situ dans des milieux austères.

L'URIS est intrinsèquement poussée par les technologies propres et durables de gestion des ressources naturelles et de production et de stockage d'énergie. En retour, elle donne lieu à des technologies transformatrices susceptibles d'aider à atteindre les objectifs climatiques mondiaux et à passer aux énergies propres dans les dix prochaines années. Ces technologies ont des conséquences d'une grande portée, qui pourraient être plus prononcées dans l'Arctique canadien, où les technologies de l'URIS peuvent influencer directement sur les capacités du Canada d'assurer une intendance efficace des terres et d'afficher une forte présence permettant d'équilibrer ses responsabilités à l'égard des collectivités autochtones du Nord et celles d'assurer le contrôle du passage du Nord-Ouest et l'intendance de la région dans son ensemble. Les technologies correspondantes constituent une occasion de moderniser l'infrastructure, d'accroître l'accès équitable au chauffage et à l'énergie dans le Nord et d'améliorer les capacités défensives du Canada, tout en réduisant considérablement les émissions.

La stratégie d'innovation spatiale du Canada a considérablement évolué depuis que le Canada est devenu le troisième pays à mener des activités spatiales en plaçant en orbite un satellite, Alouette 1, en 1962. Le Canada est aujourd'hui reconnu pour avoir fourni des technologies de soutien essentielles aux missions d'exploration spatiale – plus particulièrement les emblématiques Canadarm pour le programme de la navette spatiale des États-Unis et la Station spatiale internationale (SSI) – et poursuivra cette tradition en fournissant le Canadarm3 pour la nouvelle station spatiale lunaire Lunar Gateway avant la fin de la décennie.

L'URIS représente pour le Canada l'occasion d'une génération pour **prendre les devants**, étant à la croisée du bon moment, de lacunes technologiques critiques et de ses forces collectives.

La fabrication de pointe est un exemple où les aptitudes, le talent, la capacité et les secteurs diversifiés du Canada offrent un tremplin pour l'innovation

et le leadership en matière d'URIS. La fabrication de pointe permet de doter les pratiques de fabrication traditionnelles d'une nouvelle technologie et de mener à des modèles de production novateurs qui ont la capacité de modifier considérablement les activités commerciales. Bien que le secteur manufacturier du Canada soit de plus petite taille que celui des États-Unis (avec 270 fabricants employant au moins 500 personnes, comparativement à 33 000), les fabricants canadiens sont en moyenne plus rentables que les fabricants américains et sont plus flexibles et hautement spécialisés que les plus gros d'entre eux (TheFutureEconomy.ca, 2019). Il s'ensuit que les fabricants canadiens sont mieux placés pour tirer parti des technologies transformatrices et agiles. L'évolution des pratiques de la fabrication de pointe lui donne la capacité de créer des emplois de grande qualité liés au développement, à la gestion et au maintien d'un éventail varié de technologies connexes. Le gouvernement du Canada estime que le secteur ajoutera 13,5 milliards de dollars au PIB et créera 13 500 emplois au cours des dix prochaines années (Gouvernement du Canada, 2023b).

L'URIS représente pour le Canada l'occasion d'une génération **pour prendre les devants**, étant à la croisée du bon moment, de lacunes technologiques critiques et de ses forces collectives.

Le Canada est aussi reconnu comme un chef de file mondial de l'exploration des ressources naturelles, de leur mise en valeur et des finances, et a, par le biais de sa Stratégie sur les minéraux critiques, un mandat clair pour poursuivre dans cette voie (Gouvernement du Canada, 2022a). Fort de sa compétence et de sa réputation en ce qui a trait à la mise en valeur responsable des ressources, sa technologie de robotique spatiale inégalée et de son expertise dans chacun des domaines et des technologies sollicités, le Canada est le mieux placé pour

s'affirmer comme le chef de file mondial de confiance en matière de ressources spatiales. Cela représente un potentiel inégalé de développement économique, qui ouvre des possibilités pour la prochaine génération de travailleurs dans les secteurs comptant sur les disciplines STIM (sciences, technologie, ingénierie et mathématiques) et qui place le Canada dans une position stratégique pour réussir économiquement au cours du XXI^e siècle et au-delà.

Le moment est venu d'investir. Selon l'Agence spatiale européenne, pas moins de 250 missions lunaires seront lancées d'ici 2031, ce qui alimente la demande du marché pour des ressources, de la fabrication de pointe et des solutions de données et d'infrastructures. Des estimations économiques indiquent que des dépenses de centaines de milliards de dollars sont à l'horizon pour les entreprises, les industries et les gouvernements qui ont l'audace de s'engager dans l'économie spatiale à court et à moyen terme. Des entreprises et des industries entières dont les liens avec l'espace sont encore tout récents peuvent s'attendre à tirer des bénéfices considérables. La firme Citi GPS estime que ces industries peuvent devenir un élément moteur financier de l'économie, car elles profitent des retombées des innovations liées à l'espace (Citi GPS, 2022). La firme PWC renchérit en soulignant que les solutions à certains des plus gros défis liés à l'établissement d'une base extraterrestre habitée (de l'énergie, de l'exploitation minière et du traitement jusqu'à la robotique et aux véhicules autonomes) serviront aussi à résoudre certains de ceux auxquels font face les industries sur Terre (PWC, 2021). L'industrie automobile développe déjà des rovers lunaires et des véhicules lunaires autonomes, tandis que l'industrie de la construction étudie la fabrication additive en vue d'implanter des infrastructures et des installations durables sur la surface lunaire.

Le Canada a la force collective nécessaire pour prendre les devants de l'ISRU, mais il faut un leadership et des investissements audacieux pour saisir cette occasion d'une génération pour nos industries stratégiques et nos citoyens.

1.1 L'ISRU : favoriser l'innovation pour les industries stratégiques du Canada

Les innovations qui sont développées aux fins de l'URIS se rattachent à certains des plus importants secteurs industriels du Canada : la prospection, l'extraction et le traitement des ressources naturelles, la fabrication et la construction, l'aérospatiale et la production d'énergie. L'ensemble de ces secteurs représente plus de 40 % du PIB du Canada et emploie 2 626 000 Canadiens.

Toutefois, selon le Plan pour l'innovation et les compétences du Canada (Gouvernement du Canada, 2017), plusieurs menaces à notre force collective et à notre compétitivité mondiale à long terme nécessitent une intervention. Le Plan mentionne un manque d'investissement dans la recherche et le développement, une pénurie de travailleurs qualifiés et un manque de collaboration entre les entreprises, les universités et le gouvernement. Le ratio d'intensité de la R et D de 1,8 du Canada est bien inférieur à la moyenne de 2,7 de l'OCDE et se classe au 17^e rang seulement dans ce groupe d'économies avancées (Statistique Canada, 2023). Un encouragement à l'innovation dans l'un ou l'autre de ces secteurs ouvrirait d'importantes possibilités de croissance économique et de création d'emplois. Une stratégie d'innovation orientée vers des objectifs dans tous ces secteurs pourrait renforcer la compétitivité mondiale du Canada pour des décennies.

Le secteur aérospatial du Canada, qui comprend l'industrie spatiale, est une exception remarquable et continue de faire preuve d'une impressionnante capacité d'innovation face de ces défis. Comme il est indiqué dans le site Web d'ISDE :

« Le secteur de l'aérospatiale est le principal intervenant en R et D parmi les secteurs canadiens de la fabrication, ses investissements se chiffrent à 710 millions de dollars en 2021, trois fois plus élevés que la moyenne nationale de l'industrie de fabrication. La part de l'industrie aérospatiale canadienne dans l'emploi lié aux disciplines STIM était également plus de deux fois supérieure à la moyenne manufacturière nationale (ISDE, 2022). »

TABLEAU 1: Principaux secteurs canadiens

Industrie	PIB canadien		Emplois directs
	%	\$	
Ressources naturelles (Statistique Canada, 2022)	14,4 %	350 G\$	> 650 000
Fabrication (Gouvernement du Canada, 2021a)	10 %	174 G\$	> 1 700 000
Énergie (Gouvernement du Canada, 2023d)	9,2 %	175 G\$	> 276 000
Aérospatiale (Gouvernement du Canada, 2022d)	10 %	24 G\$	> 200 000

Un engagement collectif ambitieux envers l'URIS permettrait de regrouper les meilleurs éléments des talents et de l'innovation du Canada et les arrimerait aux secteurs industriels critiques dans lesquels le pays a pris du retard. Cet effet – qui sera examiné plus loin dans le présent rapport – a déjà été observé isolément au sein des universités et de l'industrie, et il est clair qu'une stratégie unifiée peut l'amplifier de façon exponentielle. En fin de compte, une stratégie pour l'URIS procurerait des avantages aux industries stratégiques canadiennes, tout en encourageant les collaborations interdisciplinaires, en concourant aux objectifs sociaux et en aidant à accomplir les mandats gouvernementaux.

1.2 Les bases de l'URIS

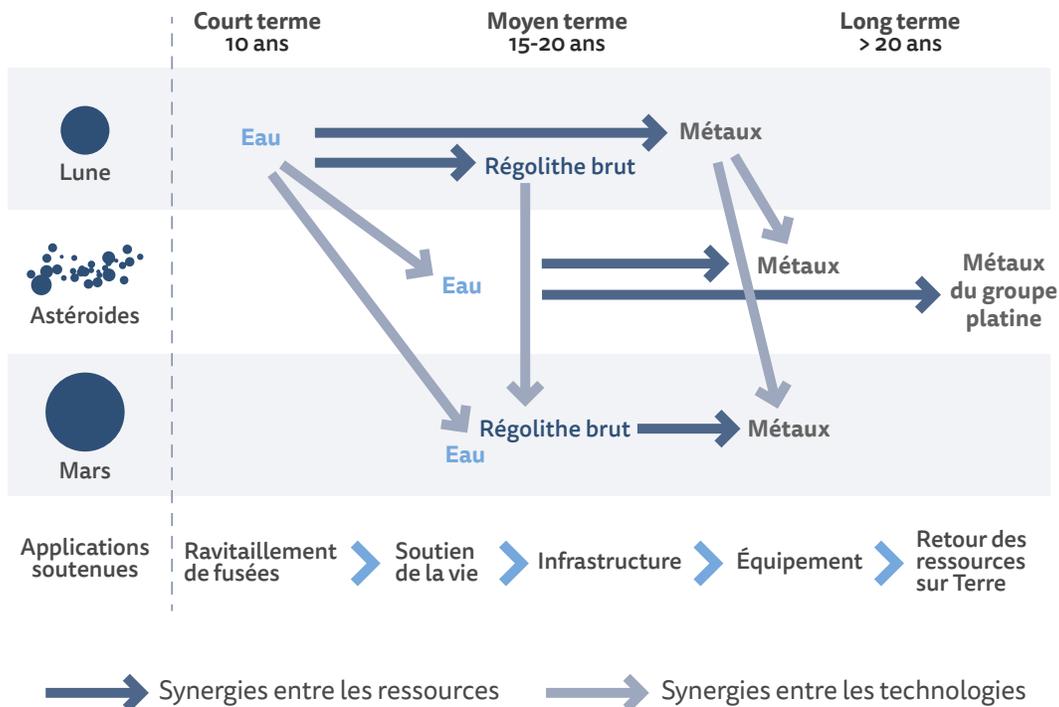
Le programme Artemis de la NASA enverra des astronautes à la surface lunaire pour la première fois depuis plus d'un demi-siècle. Au fil du temps, ceux-ci établiront une base lunaire et une présence humaine permanente sur la Lune. Des ressources seront d'abord envoyées pour construire la base et la station spatiale Lunar Gateway en orbite autour de la Lune, mais il sera finalement essentiel de fabriquer des produits avec des matières locales.

L'Agence spatiale européenne affirme que la maîtrise de l'utilisation des ressources spatiales transcende les secteurs et fait progresser les technologies et le transfert d'expertise entre eux. Des technologies sont requises tout au long de la chaîne de valeur, et certaines sont en développement aujourd'hui. L'Agence spatiale luxembourgeoise (2018) répartit les technologies requises dans les groupes suivants :

- les technologies de prospection, permettant l'exploration et la détermination des ressources;
- les technologies minières, permettant l'extraction, le transport local, le traitement et la manutention;
- les technologies de transport et d'approvisionnement, permettant le transport des ressources dans l'espace jusqu'au point de stockage ou d'utilisation, comme une station de rassemblement en orbite lunaire ou terrestre ou une station de ravitaillement en carburant pour aller vers Mars;
- les technologies de raffinage, permettant le traitement de matières pour obtenir des produits finaux, comme des matériaux structuraux dans une forme intermédiaire ou finale;
- les technologies de fabrication, permettant la création in situ d'éléments structuraux et la fabrication d'outils, éventuellement en recourant à l'impression 3D;
- les technologies de soutien connexes tout au long de la chaîne de valeur, notamment le logiciel, la robotique, les communications et les technologies énergétiques.

L'URIS est considérée comme un facteur déterminant de l'activité spatiale future. Elle permettra l'extraction de substances volatiles, comme l'oxygène, l'azote et l'hydrogène, en plus de minéraux et de métaux critiques, dont bon nombre sont abondants à la surface lunaire. Après leur traitement in situ, ces ressources essentielles pourraient être utilisées pour soutenir les systèmes indispensables à la vie, produire de l'eau pour les colonies lunaires et spatiales et mener à une chaîne d'approvisionnement pour la fabrication et la construction

FIGURE 2 : Chaîne de valeur de l'utilisation des ressources spatiales au fil du temps

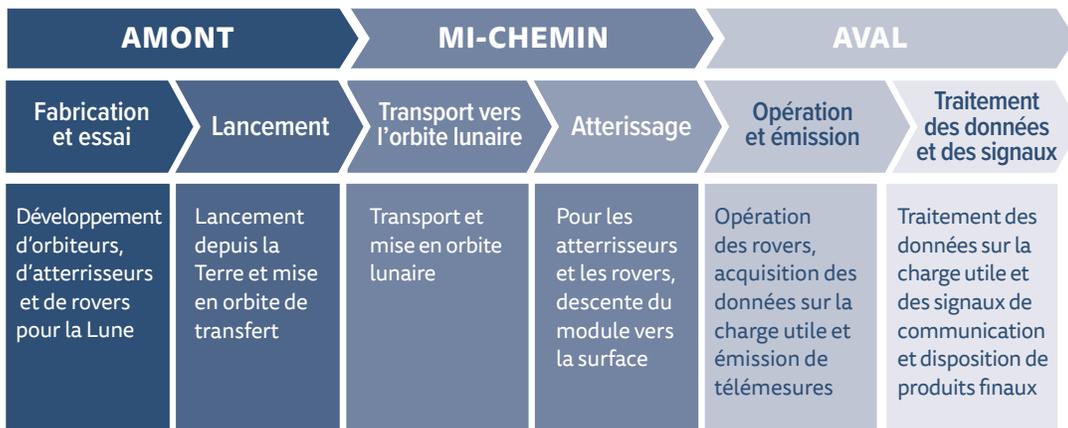


Source : Agence spatiale luxembourgeoise, 2018.

in situ. La production de propergol pour fusées à partir des ressources lunaires est aussi essentielle pour lancer des missions habitées dans l'espace lointain ou pour ramener les équipages en toute sécurité sur Terre.

Un exemple immédiat du potentiel de l'URIS d'aider une présence humaine soutenue dans l'espace est la Station spatiale internationale (SSI). La majorité des ressources nécessaires pour soutenir la SSI provient encore largement de la Terre et est transportée à partir de celle-ci, ce qui rend la SSI très coûteuse à maintenir. Or, tout n'est pas transporté vers la SSI, et l'on pense qu'il sera beaucoup moins coûteux d'utiliser des ressources locales que d'apporter des ressources de la Terre. L'énergie solaire est encore l'exemple le plus courant du recours de la SSI à l'URIS.

FIGURE 3 : Ventilation de la chaîne de valeur de l'utilisation des ressources spatiales



Source: PWC, 2021.

Depuis plus de vingt ans, les panneaux solaires de la SSI captent la lumière du Soleil pour produire l'énergie nécessaire à une présence humaine continue. Un autre exemple est la capacité de la SSI de recycler l'eau, faisant en sorte que cette ressource vitale et lourde est traitée de manière efficace et durable in situ pour éviter le besoin de s'en réapprovisionner à partir de la Terre.

Les grands traits d'une feuille de route pour étendre l'URIS existent déjà dans la Feuille de route mondiale de l'exploration (en anglais : Global Exploration Roadmap), publiée par le Groupe international de coordination de l'exploration spatiale (en anglais : International Space Exploration Coordination Group ou ISECG) en 2018 et mise à jour en 2022. La Feuille de route établit une vision internationale commune de l'exploration spatiale qui s'appuie sur les programmes, les initiatives et les objectifs des 27 agences spatiales participantes et se fonde sur des objectifs communs, portant d'abord sur la SSI, puis s'étendant à la Lune, aux astéroïdes et à Mars. La Feuille de route comprend actuellement douze objectifs d'exploration lunaire regroupés en trois phases :

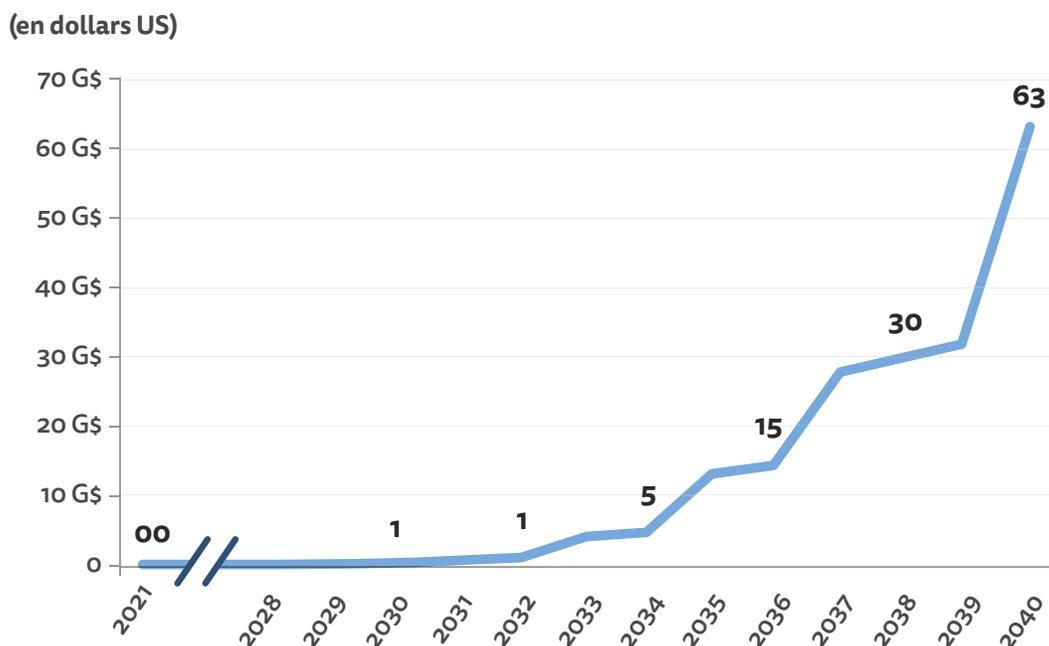
- **Phase 1 – Des bottes sur la Lune :** Cette phase correspond à la période durant laquelle les agences spatiales concentrent leurs efforts sur l’envoi d’équipages et de missions d’exploration robotique vers la Lune. Elle vise aussi à atteindre les objectifs liés à l’exploration de la surface lunaire, y compris le débarquement et la remontée d’équipages et d’atterrisseurs logistiques.
- **Phase 2 – Expansion et construction :** Cette phase met l’accent sur la réalisation des objectifs se rapportant à la surface lunaire, principalement en explorant celle-ci et en déterminant le site optimal pour des séjours de longue durée.
- **Phase 3 – Possibilités lunaires soutenues :** Des séjours de longue durée, la santé et le rendement des équipages ainsi que l’utilisation de ressources in situ sont les principales composantes de cette phase.

La Feuille de route mondiale de l’exploration indique les nouvelles technologies qui commenceraient leur stade de validation autour de 2027, ce qui signifie que la validation technique et la commercialisation sur Terre de ces technologies arriveraient des années auparavant.

L’URIS englobe un vaste écosystème de technologies, de processus et d’avancées de prochaine génération dont les avantages terrestres sont encore inexploités. Alors que les applications courantes des technologies spatiales sur Terre reposent sur les satellites et les applications connexes (imagerie ou observation de la Terre et communications et navigation par satellite) l’URIS s’engage dans des applications de détection quantique et d’intelligence artificielle, dans des systèmes autonomes et dans des solutions énergétiques transformatrices, pour n’en nommer que quelques-unes.

Il est difficile de prévoir le développement des nouvelles technologies et leurs applications aux industries actuelles et imprévues. On n’a qu’à imaginer le mal qu’on aurait eu à dresser une feuille de route pour les industries liées à Internet alors que la technologie en était encore à ses balbutiements et que les téléphones intelligents, la large bande passante ou les ordinateurs portables n’existaient pas encore. Ce qui diffère dans le cas de l’industrie spatiale est le

FIGURE 4 : Estimation du marché de l'utilisation des ressources lunaires au fil du temps



Source: PWC, 2021.

fait que certains objectifs finaux orienteront la recherche et le développement le long de certains axes quelque peu prévisibles.

Les synergies de l'URIS et des industries terrestres seront étroitement liées aux feuilles de route des technologies spatiales suivies par les organisations publiques et privées, notamment les missions décrites dans la Feuille de route mondiale de l'exploration. L'analyse des retombées économiques potentielles de l'utilisation des ressources spatiales faite par le gouvernement du Luxembourg a révélé que les recettes de ce marché pourraient se situer entre 73 milliards et 170 milliards d'euros d'ici 2045, et le nombre d'employés à temps plein, entre 845 000 et 1,8 million. L'URIS permettrait aussi d'importantes économies de coûts pour l'exploration spatiale, que le gouvernement du Luxembourg estime entre 54 milliards et 135 milliards d'euros au cours de la même période.

« De même, l'Agence spatiale européenne (ASE) affirme que la technologie de l'URIS a une valeur commerciale multisectorielle à court terme pour les industries terrestres actuelles. L'ASE prévoit aussi que la diffusion de la technologie et des connaissances aura des retombées de 2,5 milliards d'euros sur 50 ans (Agence spatiale européenne, 2019). Nous savons que les processus miniers sur Terre devraient être améliorés, ne serait-ce que pour répondre aux objectifs de développement durable des Nations Unies. Il importe de souligner que certains des défis et des possibilités de l'industrie minière terrestre sont semblables à ceux auxquels nous ferons face dans l'espace. »

– Rita Rinaldo, Solutions spatiales de l'ASE

1.3 L'actuelle stratégie spatiale du Canada ne suffit pas

L'Agence spatiale canadienne (ASC), qui fait partie de l'ISECG, mène la participation du Canada aux programmes spatiaux internationaux et, par conséquent, la stratégie d'innovation spatiale du Canada. Or, l'ASC est trop sous-financée pour assurer la présence que le Canada peut avoir dans l'URIS. Le Programme d'accélération de l'exploration lunaire (PAEL) de l'ASC vise à soutenir le développement de la technologie lunaire et des missions de démonstration et des missions scientifiques dans l'espace. Il vise l'envoi de charges utiles sur la surface lunaire d'ici 2026, dont un rover lunaire et d'autres démonstrations scientifiques ou technologiques importantes pour soutenir un habitat sur la Lune. L'ASC a accordé quelque 3 millions de dollars pour le développement d'instruments scientifiques lunaires qu'elle a déployés dans une douzaine de missions, notamment dans le cadre de contrats de la NASA visant des livraisons à la surface et la robotique lunaire qui ont débuté en 2022. Le Canada développe aussi un manipulateur robotique intelligent, appelé Canadarm3, pour Gateway, une station spatiale menée par la NASA qui orbitera autour de la Lune.

Plus récemment, dans le budget de 2023, le Canada a pris de nouveaux engagements à l'égard de ses activités d'exploration spatiale (Gouvernement du Canada, 2023a). En plus du 1,1 milliard de dollars sur 14 ans à l'ASC pour poursuivre la participation du Canada à la SSI et des 76,5 millions de dollars sur huit ans à l'appui de la science canadienne sur la station Lunar Gateway, le budget de 2023 prévoit 1,2 milliard de dollars sur 13 ans à compter de 2024-2025 pour développer et produire un véhicule utilitaire lunaire devant aider les astronautes sur la Lune. Le rover lunaire est en quelque sorte le prochain Canadarm, une pièce d'équipement de premier plan nécessaire à l'exploration spatiale.

Deux places sont aussi réservées à des Canadiens à bord des missions Artemis – les premières missions habitées vers la Lune en 50 ans – et on a annoncé que l'astronaute canadien Jeremy Hansen fera partie de la mission Artemis II vers la Lune en 2024.

Tout cela découle des objectifs énoncés dans *Une nouvelle stratégie spatiale pour le Canada*, publiée par le gouvernement fédéral en 2019. Le document exposait une vision pour le Canada dans l'espace et définissait cinq domaines d'activité pour aider à la réaliser.

L'URIS touche directement chacune des priorités énoncées, et plus particulièrement les suivantes : adopter une approche pangouvernementale;

Énoncé de vision

Stratégie spatiale pour le Canada, 2019

Le Canada reconnaît que le secteur spatial est un actif stratégique national et cherche à s'assurer que le pays demeure une puissance spatiale. Dans l'avenir, le Canada veut créer un secteur spatial dynamique et durable ancré dans un effort de l'ensemble du gouvernement fédéral qui établit une nouvelle vision pour l'exploration spatiale canadienne, renforce les partenariats avec l'industrie pour assurer la création d'emplois de l'avenir, met à profit le pouvoir de l'espace pour inspirer les jeunes et maximise le potentiel de l'espace pour apporter des solutions aux problèmes rencontrés quotidiennement par les Canadiens, tout en perçant les secrets de l'Univers.

utiliser l'espace pour résoudre les problèmes quotidiens des Canadiens; appuyer le secteur spatial commercial canadien afin de stimuler la croissance économique et la création des emplois de demain.

La Stratégie spatiale indique que le secteur spatial contribue pour 2,3 milliards de dollars au PIB du Canada, emploie directement près de 10 000 Canadiens et est l'un des secteurs de l'économie canadienne qui fait le plus de recherche et développement (R et D). De plus, les petites et moyennes entreprises constituent plus de 90 % des entreprises spatiales du Canada et regroupent près de 30 % des emplois dans ce secteur.

Il reste qu'entre 2016 et 2019, le Canada n'a investi que 2,6 milliards de dollars dans son industrie spatiale (Gouvernement du Canada, 2019a). En 2022-2023, le budget de l'Agence spatiale canadienne n'était que de 329 millions de dollars, soit 0,001 % du budget fédéral total du Canada. En comparaison, le budget de la NASA était de 25,4 milliards de dollars US en 2023, soit 0,004 % du budget fédéral des États-Unis. Le Canada n'est vraiment pas à la hauteur, le budget annuel de l'Agence spatiale canadienne n'équivalant qu'à 1 % de celui de la NASA, c'est-à-dire le quart de l'allocation fédérale équivalente de la NASA.

Le budget de 2023 alloue au PAEL un montant supplémentaire de 150 millions de dollars sur cinq ans, ou 30 millions de dollars par année, pour soutenir le développement de nouvelles technologies par l'industrie spatiale canadienne. Or, un tel budget peut seulement soutenir du financement de démarrage. Pour que le Canada devienne un chef de file et profite des avantages collectifs de l'innovation qui en découlent, nous devons prendre envers l'URIS un engagement ressemblant davantage à celui qui a été donné au Canadarm et au rover lunaire. La différence manifeste est que l'industrie minière dans l'espace a un potentiel encore plus grand en tant que secteur économique indépendant, et que ses technologies connexes ont très nettement clairement des applications ici, au profit des forces collectives du Canada.

L'URIS et l'industrie minière dans l'espace offrent clairement l'occasion d'une génération, qui cadre avec les objectifs stratégiques du Canada. Un investissement dans le cadre d'une action claire et décisive pour l'industrie minière

dans l'espace se répercutera sur de multiples facettes de l'économie canadienne, notamment la fabrication de pointe, la technologie propre, la géophysique, la science quantique, la robotique et l'intelligence artificielle, tout en incitant la prochaine génération à viser les étoiles.

1.4 Une industrie en mouvement

Le Canada doit agir d'urgence. L'industrie spatiale change, et le Canada doit se réorienter dans ce nouvel environnement. Or, notre stratégie spatiale et notre cadre réglementaire sont lents à s'adapter. Alors que l'on ne comptait autrefois qu'une poignée de pays menant des activités spatiales, il y en a aujourd'hui des douzaines. Les normes de la technologie ne sont plus aussi élevées qu'elles l'étaient, et un certain nombre d'innovations ont eu pour effet d'élargir considérablement l'accès à l'espace. Alors qu'il coûtait autrefois des dizaines, voire des centaines de millions de dollars pour envoyer un satellite dans l'espace, l'arrivée des nanosatellites (comme les CubeSat) et la disponibilité de pièces dans le commerce ont grandement réduit les contraintes pour mettre du matériel dans l'espace.

Des puissances spatiales émergentes, comme l'Australie, l'Arabie saoudite et les Émirats arabes unis, ont décidé de se tourner vers l'espace, et l'ont fait avec des capitaux importants et une orientation claire vers des objectifs nationaux et industriels. Non seulement ils investissent dans leurs capacités, mais ils persuadent des entreprises à établir des activités à l'intérieur de leurs frontières, en mettant en place des programmes pour encourager et attirer cette nouvelle industrie. Ces pays posent d'autres défis au programme spatial du Canada. Le Canada a longtemps joui d'une position de partenaire des États-Unis dans l'espace. Vu l'évolution rapide du programme Artemis, ces pays annoncent rapidement ce que seront leurs contributions aux efforts. Le Canada risque d'être pris au dépourvu en agissant trop lentement dans une industrie en accélération, d'être laissé pour compte et de céder en même temps sa position de chef de file mondial de l'industrie minière et de la mise en valeur des ressources.

La concurrence est stimulante. Des lois concernant les ressources spatiales ont été adoptées aux États-Unis, au Luxembourg, au Japon, dans les Émirats arabes unis et plus récemment en Inde. Ces pays offrent la clarté réglementaire nécessaire pour permettre aux entreprises de mobiliser et d'attirer des capitaux et nombre d'entre eux investissent dans des entreprises de partout dans le monde et les soutiennent et les attirent de façon proactive. D'autres pays ont fait savoir au monde qu'ils se font une priorité de se positionner comme chef de file. C'est ainsi que, dans le cadre de sa stratégie spatiale (Gouvernement de l'Australie, 2019), l'Australie a créé AROSE (AROSE, n.d.) pour encourager la collaboration industrielle et les synergies qui ouvrent des possibilités commerciales dans le secteur des ressources, tant sur Terre que dans l'espace.

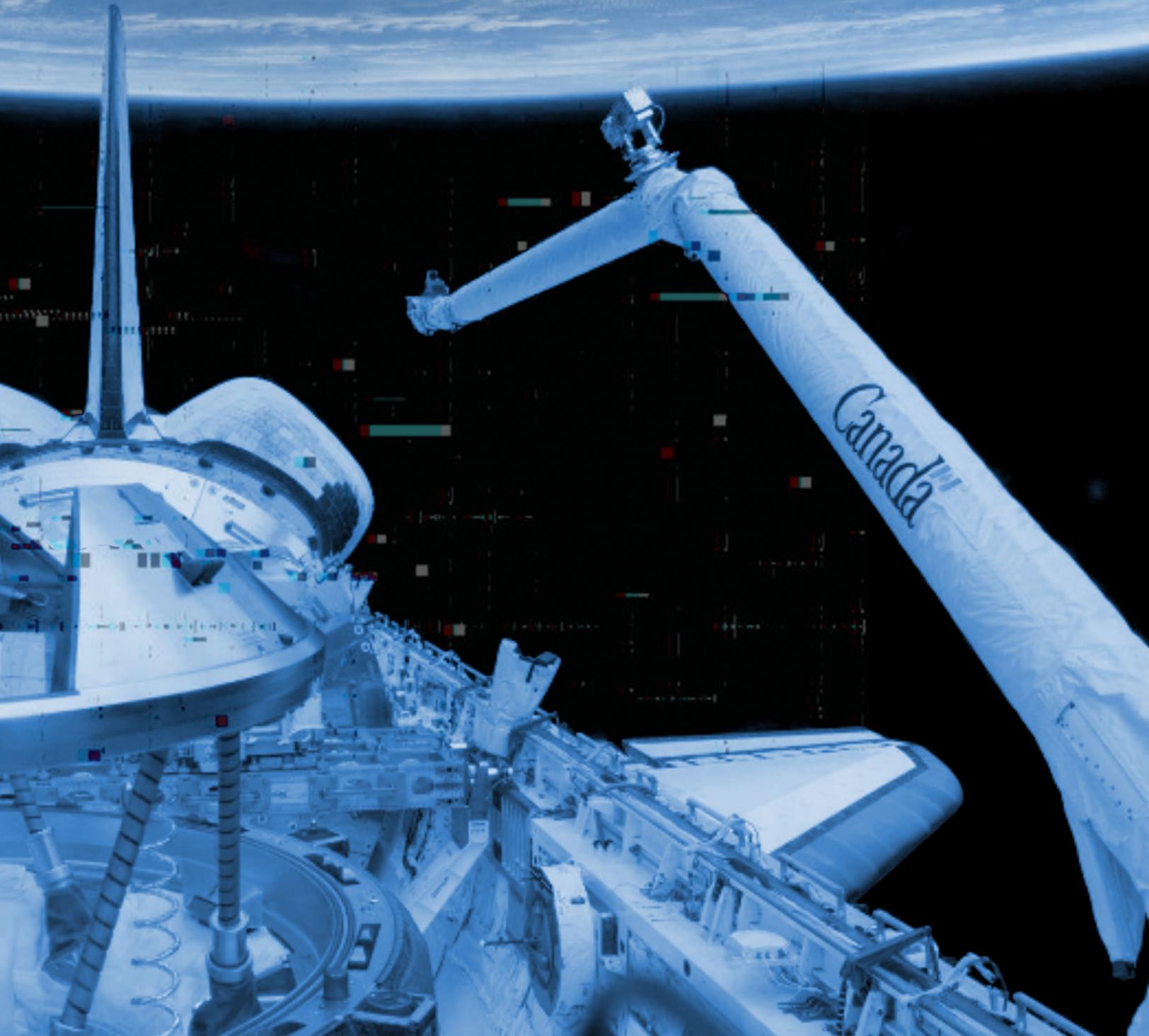
Dans nombre de discussions avec des banques d'investissement, des sociétés de capital de risque et des investisseurs providentiels, il revient souvent que le manque de clarté réglementaire du Canada est un obstacle pour son industrie spatiale et ses entreprises NewSpace. Le capital est fongible, et les investisseurs visent à obtenir les meilleurs rendements de leur capital, et non à atteindre des objectifs stratégiques nationaux. La plupart des financiers préfèrent un marché doté d'un régime de réglementation approprié. La moitié de tous les capitaux liés à l'industrie minière terrestre transitent par le Canada, et plusieurs pays ont adopté notre processus de divulgation. Ce cadre devrait être étendu aux ressources spatiales (NI43-101). Malgré le fait que le Canada possède les plus grands marchés de capitaux de financement et de placement miniers de la planète, son manque de clarté réglementaire concernant les ressources spatiales menace d'étouffer son industrie des ressources spatiales, au détriment de son économie, de sa compétitivité mondiale et des objectifs stratégiques qu'il s'est donnés.

Le Canada est un chef de file mondial de l'industrie minière et de la mise en valeur des ressources naturelles. Il a un mandat clair de « positionner le Canada comme la principale nation minière » (Trudeau, 2021). Il a aussi indiqué en 2019 que « [des] mesures rapidement prises par le Canada en matière de nouvelles

frontières minières serviraient à démontrer son leadership, signalerait qu'il accueille favorablement l'innovation et les investissements et appuie le transfert technologie entre les secteurs » (Gouvernement du Canada, 2019d). Bien que le moment pour une action précoce puisse être venu et reparti, le Canada a encore la possibilité de devenir le chef de file mondial de la mise en valeur des ressources spatiales. Toutefois, cela ne s'est pas transmis à l'ASC, car les termes *industrie minière*, *ressources* ou *URIS* sont absents de la Stratégie spatiale du Canada (2019). Le Canada doit faire valoir ses forces. Nous sommes déjà le chef de file mondial de l'industrie minière, et il nous faudrait relativement peu d'efforts pour prendre la tête de l'industrie des ressources spatiales. L'absence d'une politique réglementaire claire du Canada nuit à ses entrepreneurs et à sa position concurrentielle à l'échelle mondiale, et envoie au reste du monde le signal que nous ne tenons pas vraiment à être au premier rang du secteur minier.

2

Retombées pour le Canada



2

Retombées pour le Canada

Les retombées d'une stratégie ambitieuse en matière d'URIS sont considérables et comportent des avantages pour les technologies de prochaine génération, les secteurs industriels stratégiques, les mandats sociaux et les politiques gouvernementales.

On ne saurait surestimer les avantages économiques en aval de l'investissement public dans les programmes de technologie spatiale. L'ASC a indiqué que chaque dollar investi dans ses contrats entraîne des retombées de 1,20 \$ (ASC, 2015). Des estimations plus récentes indiquent un rendement encore plus grand du capital investi, le rapport État du secteur spatial canadien de 2023 de l'ASC indiquant que pour chaque dollar investi, 2,20 \$ reviennent en recettes accessoires. On peut avoir une idée de l'envergure de l'innovation dans l'industrie spatiale au Canada en examinant les brevets liés à l'espace. En appliquant aux brevets l'indice d'avantage technologique révélé (ATR) de l'OCDE, le rapport Brevets dans l'espace du gouvernement du Canada a montré que le pays avait un avantage technologique dans l'industrie spatiale. L'étude a relevé pour l'ensemble du monde 86 000 brevets liés à l'espace entre 1996 et 2015, dont plus de 1 200 se rattachaient à plus de 200 organisations canadiennes, comme des entreprises, le gouvernement, le milieu universitaire et des institutions de recherche – à part les universités.

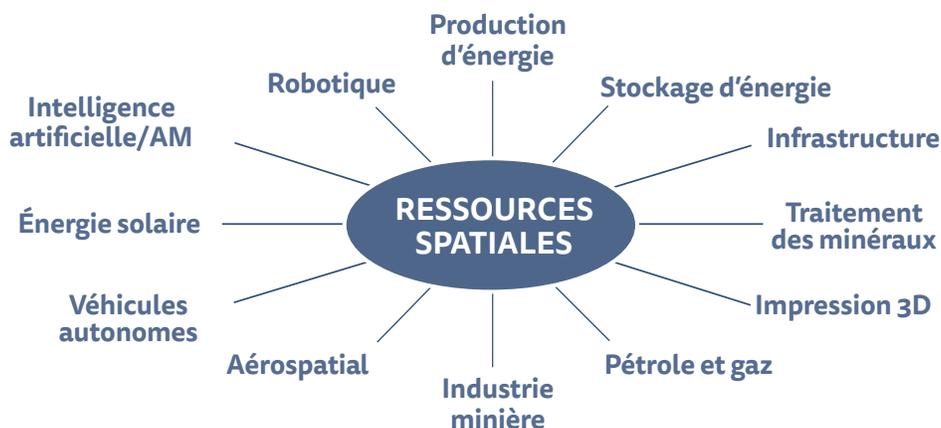
La canalisation des ressources et la coordination des parties prenantes aux fins de l'URIS peuvent faire encore plus, en stimulant un nouveau réseau interdisciplinaire ou ce qu'on a appelé un « superamas de galaxies ». Le tableau 5 est une liste préliminaire des domaines qui se recoupent pour soutenir l'URIS.

TABLEAU 2 : Domaines se recoupant pour soutenir l'URIS

Technologies	Industries	Social impact	Government mandates
<ul style="list-style-type: none"> • Autonomous vehicles • Artificial intelligence • Robotics • Quantum sensing • Geoscience • Materials processing • Additive manufacturing • Energy generation • Energy storage 	<ul style="list-style-type: none"> • Advanced manufacturing • Energy • Aerospace • Transportation 	<ul style="list-style-type: none"> • Climate change • Just energy transition • Northern land stewardship • Advancement of science and exploration 	<ul style="list-style-type: none"> • Position Canada as leading mining nation • Net-zero • Support R & D • Critical minerals • Train and create green jobs • Industrial transition • Pan-Canadian geoscience strategy • Pan-Canadian quantum strategy • Pan-Canadian AI strategy • Indigenous community development national strategy

FIGURE 5 : Effet de superamas galactique de la SCMS

Le secteur des ressources spatiales n'est pas constitué seulement des mines et de l'espace. Il est éminemment interdisciplinaire et varié, ce qui signifie que l'allocation de capitaux peut avoir **un effet de superamas** dans l'économie, favorisant la compétitivité dans des domaines clés de la nouvelle macroéconomie mondiale.



Comme il a été mentionné précédemment, l'encouragement de l'innovation dans l'un ou l'autre de ces secteurs ouvrirait d'importantes possibilités de croissance économique et de création d'emplois. Le Canada a été l'un des chefs de file dans le monde en encourageant les transferts des technologies du secteur spatial pour leur commercialisation dans l'économie plus large. Une stratégie ambitieuse qui définit un objectif clair pour l'innovation dans tous ces secteurs peut renforcer la compétitivité mondiale du Canada pour des décennies.

Une stratégie ambitieuse qui définit un objectif clair pour l'innovation dans tous ces secteurs peut renforcer la compétitivité mondiale du Canada pour des décennies.

Les technologies développées aux fins de l'URIS auront certains effets omniprésents, notamment sur les mandats gouvernementaux de positionner le Canada comme le chef de file mondial de l'industrie minière et de maintenir son avantage concurrentiel mondial dans ce domaine. La croissance des technologies de l'URIS aura un effet semblable sur la création d'emplois de grande qualité, sur les talents et sur les possibilités dans les domaines de prochaine génération. Les sous-chapitres suivants décrivent en détail quelques-uns des autres effets plus nuancés des technologies de l'URIS sur chaque secteur industriel stratégique et sont suivis d'un résumé de leur contribution prévue aux mandats sociaux et aux politiques gouvernementales.

2.1 Véhicules autonomes, robotique et intelligence artificielle

Les véhicules autonomes (VA), la robotique et l'intelligence artificielle (IA) sont trois technologies habilitantes susceptibles de profiter le plus de l'émergence de l'URIS. Plusieurs technologies en usage dans ces trois domaines ont déjà leurs racines dans l'industrie spatiale. Par exemple, bon nombre des capteurs requis, comme le lidar et le radar, ont été développés à l'origine pour être utilisés dans les satellites et d'autres systèmes spatiaux. Le lidar a pris de l'importance après le succès de son utilisation dans le cadre de la mission Apollo 15 en 1971 (Cremons, 2022) et correspondait à un marché évalué à 1,5 milliard de dollars

US en 2021, qui devrait passer à 4,83 milliards de dollars US d'ici 2030 (Spherical Insights LLP, 2023).

Le gouvernement du Canada a indiqué que les investissements dans l'IA, la robotique et les VA constituent une priorité, tout signalant la sécurité, l'accessibilité, le respect de l'environnement et les possibilités économiques associées à leur utilisation (Gouvernement du Canada, 2019c). Cet engagement a donné lieu, en 2018, à une ronde d'investissements par le gouvernement fédéral dans de multiples entités, afin de poursuivre des projets de véhicules autonomes dans le cadre du Programme de promotion de la connectivité et de l'automatisation du système de transport (Gouvernement du Canada, 2019b). En tout, quinze projets menés par différents groupes – dont des municipalités et des ministères des gouvernements provinciaux – ont été financés pour un total d'environ 3 millions de dollars.

Le développement de ces trois technologies habilitantes dans le cadre d'une stratégie en matière d'URIS aura de profondes répercussions sur les secteurs industriels stratégiques du Canada.

2.1.1 Fabrication de pointe

L'URIS suscitera une nouvelle demande pour la fabrication de pointe de produits de prochaine génération, et le secteur de la fabrication de pointe pourrait retirer des avantages considérables des progrès de l'IA, des VA et de la robotique, progrès que les programmes de R et D spatiale isolés catalysent depuis longtemps.

Le Canada, par exemple, est un chef de file mondial de l'utilisation de robots industriels, avec une densité de robots (le nombre de robots par 10 000 emplois manufacturiers) de 1 475, l'une des plus élevées au monde d'après le rapport *Canada's Adoption et Robotics Landscape* de 2021 de NGen. Or, une analyse plus approfondie du même rapport révèle que le Canada accuse actuellement un retard par rapport à d'autres pays développés dans la plupart des secteurs autres que le secteur automobile. La densité de robots du Canada à l'exclusion du secteur automobile se situe à 71, soit plus ou moins la moitié de celle des États-Unis. De plus, la recherche de NGen indique que le taux d'adoption des robots est aussi en

retard sur celui des États-Unis, avec une augmentation de la densité de robots de seulement 20 entre 2016 et 2019 comparativement à 39 aux États-Unis. Une autre étude peint de la même façon le portrait de la robotique canadienne, classant le Canada au 14^e rang mondial pour la densité de robots et indiquant que le pays se situe à 44 % en dessous de son taux d'adoption prévu – un paramètre qui utilise les niveaux de salaires et la durée prévue de récupération de l'investissement dans l'installation de robots pour établir le taux prévu d'utilisation de la robotique d'un pays (Atkinson, 2019).

Le rattrapage de ce retard du Canada dans l'adoption de la robotique nécessitera incontestablement une réponse complexe et variée. Le Canada a fait de la transformation industrielle, un domaine clé pour l'utilisation de la robotique, l'une des trois priorités de son Fonds stratégique pour l'innovation (Gouvernement du Canada, 2023c).

L'une des forces du Canada pour ce qui est d'encourager le transfert des technologies spatiales trouve son origine dans son premier programme spatial (1990-2000), appelé Strategic Technologies in Automation et Robotics (STEAR; en français : Technologies stratégiques en automatisation et robotique). Le STEAR était un programme de R et D qui avait pour but de créer une nouvelle génération de petites et moyennes entreprises (PME) de robotique spatiale et d'encourager les transferts technologiques et les technologies dérivées. Le processus de commercialisation était un élément obligatoire dans le programme STEAR.

La viabilité commerciale des projets proposés était l'un des principaux critères imposés aux PME dans le processus d'appel d'offres. Une évaluation du programme a conclu qu'il avait créé plus de 600 emplois et généré un chiffre d'affaires d'au moins 10 millions de dollars en huit ans. Le programme, qui soutenait les PME canadiennes dans leur développement des technologies d'automatisation et de robotique, a jeté les bases permettant au Canada de maintenir son avantage en robotique spatiale. Le transfert technologique qui s'en est suivi comprend NeuroArm, un système robotique guidé par l'image et basé sur la technologie du Canadarm2, qui aide les neurochirurgiens, dont les

spécialistes disent qu'elle ne pourrait avoir été lancée dans l'environnement exigeant de l'espace.

Aujourd'hui, l'engagement du Canada à demeurer un chef de file mondial de la robotique spatiale assistée par l'IA suppose un investissement gouvernemental de 1,9 milliard de dollars pour développer un système robotique de prochaine génération pour l'espace lointain, assisté par l'IA. Comportant un grand et un petit bras robotiques, le système sera capable de se déplacer autour de Gateway et sera hautement autonome. Le Canada s'attend à ce que la technologie développée aux fins de la mission positionnera les organisations scientifiques et commerciales canadiennes comme chefs de file mondiaux dans le futur marché des services en orbite.

Aujourd'hui, l'engagement du Canada à demeurer un chef de file mondial de la robotique spatiale assistée par l'IA suppose un investissement gouvernemental de 1,9 milliard de dollars (...).

De la même façon, les bases de la force du Canada en matière de VA et d'apprentissage machine (AM) ont été établies à l'origine dans le cadre de programmes de R et D spatiale isolés. L'Institute for Aerospace Studies (en français : Institut d'études aérospatiales) de l'Université de Toronto (UTIAS), par exemple, est apparu comme un chef de file mondial de la technologie de localisation et cartographie visuelles simultanées connue en anglais sous le nom de Visual Simultaneous Localization et Mapping (VSLAM), une technologie d'AM qui utilise les données de caméras stéréoscopiques pour assembler en temps réel des cartes à haute résolution de terrains inconnus, sans recourir à un système de localisation externe comme le GPS. La technologie a été développée en réponse aux besoins de l'ASC de permettre à ses rovers

lunaires et martiens de se repérer et se déplacer de façon autonome dans des paysages planétaires inconnus. Mené par le professeur Timothy Barfoot, le SLAM de l'UTIAS a depuis été mis sous licence pour accélérer l'industrie des véhicules autonomes au Canada, notamment à la société Clearpath Robotics et soutient maintenant chaque jour des clients dans le monde entier à l'intérieur d'applications industrielles axées sur la mission (Gryfe, 2023). La société Clearpath Robotics amène aussi un autre exemple d'innovation spatiale se propageant dans le secteur industriel canadien, où son véhicule terrestre autonome Warthog est un résultat du véhicule utilitaire ARGO J5 de la société Ontario Drive & Gear qui a été développé à l'origine dans le cadre du programme de développement d'un microrover de 2008 de l'ASC. Le Warthog est aujourd'hui déployé dans plusieurs applications militaires canadiennes (Gariépy, 2023).

Au cours des six prochaines années, l'URIS établira de nouvelles exigences ambitieuses pour l'IA, A les VCA et la robotique qui donneront lieu à des innovations tant attendues qu'inattendues. Le Canada doit commencer à incuber ces technologies dès maintenant pour se préparer et faire en sorte que son secteur de fabrication de pointe soit à même de demeurer concurrentiel à l'échelle mondiale.

2.1.2 Industrie minière

L'industrie minière est un autre secteur susceptible de profiter grandement de l'innovation catalysée dans l'IA, les VA et la robotique et dans lequel la R et D dans le domaine spatial a déjà montré qu'elle pouvait créer de la valeur terrestre. Pour surmonter les défis constants et demeurer concurrentielle, l'industrie minière du Canada aura besoin d'innovation technologique pour améliorer l'exploration de précision, la productivité et la durabilité, et pour réduire les coûts. L'IA, les VA et la robotique sont appelés à permettre cet équilibre, en offrant des solutions fiables, précises, autonomes et électrifiées pour explorer, extraire et traiter les ressources naturelles de façon plus efficiente et plus durable. Le marché prévu des camions miniers autonomes, par exemple, devrait

passer de 1,6 milliard de dollars US en 2025 à 12,5 milliards de dollars US d'ici 2035 (Allied Market Research, 2022). Encore plus frappante est la croissance prévue de la robotique industrielle, dont la valeur, qui était de 14,6 milliards de dollars US en 2020, devrait atteindre 352,1 milliards de dollars US d'ici 2030 (Mining Technology, 2022). La valeur des VA et de la robotique est portée par les capacités sous-jacentes de l'IA. Comme le décrit Eric Anderson, directeur général de the Saskatchewan Industrial et Mining Suppliers Association (SIMSA; en français : Association des fournisseurs des secteurs industriel et minier de la Saskatchewan) :

« Il y a pour 58 milliards de dollars de projets connus qui nécessiteraient 150 000 travailleurs. Or, nous n'avons pas ces 150 000 travailleurs. La seule chose qui nous empêche d'accueillir des milliards de dollars d'investissement est la main-d'œuvre. Il va donc nous falloir trouver des façons d'automatiser. »

– Eric Anderson, directeur général de la SIMSA

Comme dans le transfert technologique décrit pour la fabrication de pointe, le Canada a déjà fait ses preuves pour ce qui est d'accélérer les applications minières de l'IA, des VA et de la robotique grâce à la R et D soutenue par le secteur spatial. L'Université Queen's, par exemple, offre un programme de génie minier dans l'espace qui attire des étudiants hautement qualifiés et produit de la propriété intellectuelle transformatrice, qui est ensuite disséminée parmi les entreprises terrestres. Selon le directeur du programme Joshua Marshall (2022), le programme spatial est reconnu pour placer des diplômés hautement qualifiés en génie minier dans l'espace dans des sociétés minières canadiennes qui peinaient auparavant à attirer des talents en génie de prochaine génération.

Selon le professeur Marshall, le programme a aussi permis de dériver des produits d'une recherche destinés à l'espace, comme un logiciel de prélèvement autonome, et de les octroyer sous licence à de grandes sociétés minières terrestres, comme Atlas Copco, qui l'a ensuite déployé sur des véhicules miniers souterrains dans le monde entier. Le professeur Marshall a poursuivi en déclarant

avoir été déçu de constater que l'industrie canadienne n'était pas suffisamment développée pour recevoir l'innovation directement; par nécessité, le programme a dû octroyer sous licence la technologie à un fabricant européen qui l'a ensuite exportée vers des entreprises canadiennes. Le responsable scientifique de Rio Tinto, Nigel Steward (2022), a aussi indiqué que ses pratiques de R et D en vue d'opérations minières autonomes sont directement guidées par les exigences de l'URIS dans l'espace, en mentionnant les contraintes uniques qui se posent, comme la catalysation de la pensée critique afin de résoudre les problèmes terrestres.

2.1.3 Transport

Les véhicules autonomes sont inextricablement liés aux progrès dans le domaine du transport. Tout bien pesé, la firme McKinsey & Company (2023) prédit que d'ici 2035, les VA généreront un chiffre d'affaires de 300 à 400 millions de dollars US. Le Canada pourrait en profiter, mais doit se positionner pour tirer parti de la vague à venir d'innovations découlant des efforts d'URIS à des fins commerciales.

Comme la fabrication de pointe et l'industrie minière, le transport a aussi été transformé par la R et D dans le domaine spatial. Les applications de la technologie GPS sont aujourd'hui utilisées par plus de 23 millions de Canadiens pour se rendre là où ils veulent aller. L'utilisation dans l'espace est aussi étroitement liée au contrôle du trafic aérien par le biais des communications, de la navigation et de la surveillance. La technologie spatiale ADS-B pourrait permettre aux avions de ligne de suivre des itinéraires plus efficaces, faisant économiser du temps, de l'argent et des émissions. La société Euroconsult affirme que des itinéraires plus efficaces permettraient de supprimer 5 000 heures de vol au Canada chaque jour. Dans le secteur du transport maritime, le Service canadien des glaces produit des cartes des glaces marines de source ouverte à partir desquelles peuvent être déterminés des itinéraires optimaux. Les cartes basées sur les données RADARSAT-2 et Sentinel-1 favorisent l'efficacité financière du transport maritime en réduisant le temps en mer et du même coup la consommation de carburant et les coûts.

Le lien entre les investissements dans l'espace et le développement rapide de l'IA, des VA et de la robotique est clair, l'espace agissant comme un accélérateur du développement de ces technologies critiques. Ce lien continuera de plus belle dans la nouvelle ère d'exploration. Une des principales contributions du Canada aux missions Artemis est le développement, le lancement et l'opération d'un rover lunaire destiné à faire une démonstration de la technologie à la surface de la Lune. Le rover explorera une région polaire de la Lune dès 2026. La mission fera la démonstration de technologies clés et recueillera des données scientifiques pour aider à trouver de la glace d'eau et permettra aux scientifiques de mieux comprendre la géologie et l'environnement lunaires. Elle devra de plus assurer le fonctionnement du rover durant une nuit entière sur la Lune. Les nuits lunaires, qui durent près de 14 jours terrestres, sont extrêmement froides et sombres et posent un défi technologique important (ASC, 2022), ce qui donnera lieu à un chevauchement des exigences de développement de la production et du stockage d'énergie. Dans un proche avenir, l'exploration et l'extraction des ressources recourront aux technologies autonomes et même à la production in situ mobile d'électricité et de chaleur pouvant être cogénérées pour le traitement des matériaux.

2.2 Géoscience, traitement des matériaux et technologies quantiques

Les progrès de la géoscience et du traitement des matériaux sont au cœur de la chaîne d'approvisionnement mondiale, alors que la demande mondiale en éléments des terres rares (ETR) s'intensifie depuis des décennies et est un goulot d'étranglement pour les stratégies mondiales visant la durabilité et la transition vers les énergies propres. La Chine, toutefois, a pratiquement acquis le monopole de la chaîne d'approvisionnement en ETR et contrôle près de 97 % des ETR traités dans le monde. La communauté internationale le constate et travaille d'urgence à diversifier les chaînes d'approvisionnement en ETR pour y inclure des partenaires internationaux plus dignes de

confiance. Cette urgence a conduit à la publication en 2022 de la Stratégie pancanadienne de géoscience du Canada (Comité national des commissions géologiques, 2022), appuyée ensuite par la Stratégie quantique nationale de 2022 du Canada (Gouvernement du Canada, 2022c). Les antécédents du Canada en tant que puissance mondiale de l'industrie minière et ses immenses ressources naturelles le placent au premier plan de l'innovation en matière d'ETR.

Les antécédents du Canada en tant que puissance mondiale de l'industrie minière et ses immenses ressources naturelles le placent au premier plan de l'innovation en matière d'ETR.

Les technologies de l'URIS constituent pour le Canada une chance formidable de maintenir ses intérêts stratégiques et sa compétitivité mondiale dans le domaine. Elles comprennent des approches tout à fait transformatrices de la télédétection, faisant appel à la mécanique quantique pour caractériser la composition d'une planète à partir d'une position orbitale, ainsi que de nouvelles méthodes de traitement des matériaux ne produisant aucun déchet et pouvant fabriquer de l'eau potable à partir de métaux oxydés.

2.2.1 Industrie minière

Afin de répondre aux défis constants et demeurer concurrentielle, l'industrie minière canadienne a besoin d'innovation technologique pour améliorer l'exploration de précision, la productivité et la soutenabilité environnementale ainsi que pour réduire les coûts. Elle devra s'adapter aux changements des conditions du marché et des demandes des consommateurs et trouver des façons de réduire son impact environnemental, tout en continuant de répondre à la demande croissante de métaux et minéraux critiques et d'autres ressources.

En 2023, le directeur exécutif de l'Agence internationale de l'énergie, Fatih Birol, affirmait :

Le Canada doit augmenter sa production de minéraux critiques et jouer un rôle de chef de file mondial pour se défendre contre les crises de sécurité énergétique provoquées par les pays qui se servent des combustibles fossiles comme des armes.

– Fatih Birol, directeur exécutif de
l'Agence internationale de l'énergie

Monsieur Birol a ajouté que les minéraux, essentiels pour l'énergie solaire et éolienne, sont indispensables aux sources d'énergie carboneutres sur Terre. Parmi ceux-ci se trouvent les éléments de terres rares, qui sont aussi essentiels aux technologies de la vie moderne, des téléphones intelligents aux batteries de voiture.

En cherchant de la glace lunaire en 2009, la sonde Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) de la NASA a découvert la présence d'oxydes métalliques, notamment de fer et de titane, dans les grands cratères lunaires. Certaines des technologies et des procédés mis au point aux fins de l'URIS pourraient être déployés commercialement sur Terre des années avant d'être mis à l'essai sur la Lune.

Selon les levés géologiques, la Lune renferme trois ressources cruciales : de l'eau, de l'hélium 3 et des ETR. L'eau sera essentielle au soutien de la vie et de l'agriculture dans l'espace et devra être convertie en carburant de fusée pour propulser les humains encore plus loin dans l'espace. L'hélium 3, un isotope rare de l'hélium, peut être utilisé en vue d'innovations liées à la fusion nucléaire.

La chaîne d'approvisionnement cislunaire pour les ressources en est réellement encore à ses balbutiements, mais les pays concurrents se mobilisent déjà pour protéger leurs intérêts. La Chine, par exemple, déploie d'urgence du matériel de prospection de surface au pôle Sud de la Lune, afin de repérer les gisements de ressources lucratives, et est devenue l'an dernier le premier pays à prendre et à ramener des échantillons d'hélium 3 de l'environnement lunaire.

FIGURE 6 : Technologie de télédétection souterraine par satellite QASM de la SCMS



Par le passé, la Chine a pu garder la mainmise sur le traitement des ETR en se préoccupant peu des impacts environnementaux comparativement à d'autres pays développés. L'URIS, toutefois, promet de nouvelles technologies qui permettront l'exploration, l'extraction et le traitement des ressources avec une précision transformatrice.

On peut donner en exemple la technologie QASM de la SCMS. Il s'agit d'un capteur fondé sur les effets quantiques qui sera embarqué sur un satellite et qui permettra de réaliser des tomographies à des profondeurs, à des résolutions et à des vitesses auparavant inimaginables. Actuellement financé par le Consortium pour l'eau de l'Ontario, le QASM est une occasion de développer la capacité révolutionnaire de repérer les riches gisements de matériaux sans nuire à l'écosystème environnant. Ce genre de capacité est absolument essentiel aux

fonctions de l'URIS, les coûts et les risques dans les environnements spatiaux étant beaucoup plus grands que les activités semblables menées sur Terre, ce qui accentue l'urgence et l'importance d'accéder à une information précise.

Un autre exemple est le nouveau procédé de la SCMS, appelé HYDRO, pour convertir des métaux oxydés de la poussière lunaire en composés et éléments volatils critiques pour soutenir la vie, comme l'eau et l'oxygène. Ce type d'innovation recèle un potentiel incalculable pour répondre à la crise grandissante de l'eau propre sur Terre et pour séparer les métaux et minéraux critiques de façons respectueuses de l'environnement et durables.

2.1 Production et stockage d'énergie

Le secteur énergétique est un pilier de l'économie canadienne, contribuant pour plus de 175 milliards de dollars au PIB du pays et employant plus de 276 000 personnes.

Toutefois, le secteur énergétique du Canada et du monde fait face à un certain nombre de défis, dont la nécessité de passer à des formes d'énergie plus propres, de concurrencer les sources d'énergie renouvelable et d'assurer la sécurité énergétique. L'URIS promet de répondre à nombre de ces défis, comme le besoin de diversifier les sources d'énergie autres celles à base de carbone, de créer de nouvelles possibilités économiques et d'aider à répondre aux défis mondiaux de l'industrie. Globalement, l'URIS constitue pour le secteur énergétique une occasion prometteuse de répondre à ses défis et de saisir de nouvelles possibilités de croissance et de développement.

Les investissements dans l'industrie spatiale ont déjà mené à d'importants progrès des technologies énergétiques, y compris l'énergie solaire, les petits réacteurs modulaires, l'hydrogène et le stockage.

Petits réacteurs modulaires et énergie nucléaire

Un sujet qui retient particulièrement l'attention, ces dernières années, est le développement des petits réacteurs modulaires (PRM), qui promettent d'offrir

FIGURE 7 : Image conceptuelle d’une activité d’URIS à la surface lunaire



de l'énergie nucléaire abordable, sûre et propre sous une forme qui peut être lancée et posée sur la Lune, en étant déployés dans des collectivités isolées et hors réseau ou agrandis pour fournir une alimentation de base dans des milieux urbains ou pour des applications industrielles. Il s'agit de réacteurs nucléaires compacts et adaptables qui permettent de produire de l'électricité dans une variété de contextes, notamment dans l'espace. Le développement des PRM pour des applications spatiales a aussi mené à leur utilisation sur Terre, offrant ainsi une nouvelle source d'énergie propre aux collectivités et aux industries. Les PRM comportent plusieurs avantages potentiels par rapport aux gros réacteurs nucléaires usuels. D'abord, ils sont beaucoup plus petits et plus portables, ce qui les rend plus faciles à transporter et à déployer dans une variété de contextes. Ils peuvent aussi être plus flexibles et polyvalents, car ils peuvent être adaptés pour répondre à des besoins énergétiques particuliers et être agrandis ou réduits selon les besoins. De plus, les PRM possèdent un certain nombre

de caractéristiques de sécurité qui les rendent particulièrement attrayants, notamment des systèmes de sécurité passive qui ne dépendent pas de sources d'alimentation externes pour fonctionner. Si les résultats sont probants, ces technologies pourraient avoir un effet transformateur sur la façon dont nous produisons et consommons de l'énergie, au Canada et dans le monde entier.

Les progrès en matière de microréacteurs sont en grande partie attribuables aux efforts internationaux récents pour retourner sur la Lune, et en particulier la mission Artemis. Les PRM sont reconnus comme un facteur incontournable d'une présence humaine durable et des activités industrielles à la surface lunaire. En juin 2022, la NASA et le Département de l'énergie des États-Unis ont accordé à Lockheed Martin, à Westinghouse et à la coentreprise d'Intuitive Machines et X-Energy 5 millions de dollars US chacune dans le cadre du projet Fission Surface Power (FSP). Ce financement vise le développement de concepts d'un système de réacteur à fission nucléaire de 6 000 kg et 40 kWe devant durer plus de dix ans et être lancé à des fins de démonstration d'ici la fin de la prochaine décennie. L'Agence spatiale canadienne (ASC) a suivi en finançant deux projets d'importantes entreprises canadiennes d'ingénierie spatiale, McDonald, Detwiler et Associés (MDA) et la Société canadienne des mines spatiales (SCMS), pour élaborer des concepts de PRM et en définir les capacités aux fins du FSP, respectivement. Le projet de la SCMS financé par l'ASC revêt un intérêt particulier, car il constitue une occasion unique de tirer parti d'une technologie canadienne emblématique pour prendre les devants de l'adoption des PRM sur la scène mondiale.

Il est difficile de trouver des détails au sujet des concepts de PRM retenus par la NASA, ceux-ci étant limités pour des raisons de propriété intellectuelle et de sécurité nationale. Toutefois, les données disponibles montrent que la conception des nouveaux PRM et leur préparation à la commercialisation peuvent coûter jusqu'à 500 millions de dollars US. Les projets font aussi face à de sérieux goulots d'étranglement pour la construction d'usines de démonstration, alors que leurs contreparties terrestres sont des années en avant d'eux dans la file d'attente d'espace à l'Idaho National Laboratory (ANS, 2022). Comme pour

leurs contreparties terrestres, on estime que ces PMR ne parviendront pas à la viabilité commerciale avant 8 ou 10 ans. D'après les rares déclarations publiques, il semble que le concept de MDA ne soit qu'une reprise des solutions de X-Energy avec un contenu canadien pour le moins douteux.

Énergie solaire

Le développement des technologies de l'énergie solaire en vue de leur utilisation dans l'espace a une longue histoire. Des panneaux solaires sont utilisés depuis des décennies pour alimenter les systèmes des vaisseaux spatiaux et des satellites, et la technologie a continué de s'améliorer au fil du temps. Ces améliorations ont été transférées aux applications terrestres et ont donné lieu à l'adoption répandue des panneaux solaires pour produire de l'électricité sur Terre. L'industrie spatiale a aussi stimulé le développement de cellules solaires plus efficaces et plus durables ainsi que l'emploi de nouveaux matériaux, comme l'arséniure de gallium et le diséléniure de cuivre, d'indium et de gallium, dont le rendement de conversion énergétique est supérieur à celui des cellules solaires usuelles au silicium (Green et al., 2015).

Blue Origin a mis au point une technologie pour construire des systèmes de production d'énergie sur la Lune directement à partir des matières qui existent déjà à la surface, sans avoir à importer des matériaux de la Terre. « Nous sommes à l'avant-garde de la technologie et en avons démontré toutes les étapes. Notre approche, Blue Alchemist, peut s'adapter indéfiniment, ce qui élimine la contrainte de l'alimentation en énergie où que ce soit sur la Lune, a annoncé l'entreprise en février 2023.

Hydrogène

L'utilisation de l'hydrogène est apparue comme une solution de recharge écologique dans la lutte contre les changements climatiques, car elle n'émet que de la vapeur d'eau et aucun gaz à effet de serre nocif. Le marché de la production d'hydrogène était évalué à 130 milliards de dollars en 2020-2021 et devrait croître de 9,2 % par année jusqu'en 2030 (Kane & Gill, 2022). Les progrès de la

technologie solaire permettent la production d'hydrogène par la dissociation de l'eau à l'aide de l'énergie solaire, ce qui fait de celui-ci un vecteur énergétique propre et renouvelable. La recherche de technologies efficaces par l'industrie spatiale a concouru au développement d'applications avancées de l'hydrogène, notamment l'emploi de nouveaux matériaux dans les piles à combustible. Le potentiel de stockage de l'hydrogène répond aux problèmes d'intermittence des énergies renouvelables, en permettant de stocker l'énergie solaire excédentaire et de la reconvertir en électricité selon les besoins. L'adoption de l'hydrogène comme solution de recharge écologique est susceptible de transformer le paysage énergétique canadien et de bâtir un avenir durable. Des pays comme le Japon, l'Allemagne et la Corée du Sud mettent en œuvre des stratégies pour promouvoir l'adoption de l'hydrogène, en investissant dans la recherche, l'infrastructure et l'intégration dans l'industrie. Ces efforts reflètent l'intérêt croissant dans le monde envers l'hydrogène comme une solution énergétique propre et polyvalente.

Stockage de l'énergie

Le marché mondial du stockage de l'énergie, stimulé en grande partie par l'expansion du marché des véhicules électriques (VE), devrait attirer des investissements de 622 milliards de dollars d'ici 2040. L'Agence internationale de l'énergie prédit que d'ici 2030, la production de VE pourrait atteindre 43 millions d'unités et une valeur de plus de 567 milliards de dollars par année (Gouvernement du Canada, 2020a). Le développement des matériaux et des technologies de pointe en vue de leur utilisation dans des systèmes de stockage d'énergie, comme les batteries et piles à combustibles avancées, est crucial pour répondre à cette demande croissante de VE et d'autres applications. Ces matériaux et ces technologies peuvent résister aux rudes conditions de la navigation spatiale, comme les températures extrêmes, la radiation et d'autres agressions environnementales, ce qui les rend idéaux pour une utilisation dans les systèmes de stockage d'énergie sur Terre.

En plus du développement de nouveaux matériaux et de nouvelles technologies, l'exploration et la recherche spatiales peuvent aussi améliorer notre

compréhension du stockage d'énergie et de la science fondamentale derrière celui-ci. Par exemple, la recherche menée sur la Station spatiale internationale a donné lieu au développement des batteries lithium-ion et des supercondensateurs à grande capacité, qui sont susceptibles d'améliorer grandement le rendement et l'efficacité des systèmes de stockage d'énergie sur Terre.

L'industrie spatiale a joué un rôle important dans le développement des nouvelles technologies et techniques de production et de stockage d'énergie. Ces innovations ont mené à l'adoption de sources d'énergie propres et efficaces et de méthodes plus efficaces et plus respectueuses de l'environnement pour l'exploration et l'extraction des combustibles fossiles. Il est probable qu'au fur et à mesure que l'industrie spatiale repoussera les frontières de l'innovation, surviendront d'autres progrès dans les technologies énergétiques qui auront de profondes répercussions sur la façon dont nous produisons, stockons et utilisons de l'énergie sur Terre.

2.4 Fabrication additive

La fabrication additive se réfère au procédé de fabrication d'objets à partir des données de modèles en trois dimensions, généralement par la superposition de couches successives. Elle contraste directement avec la fabrication soustractive, qui consiste dans le retrait de matière d'un objet de plus grande dimension jusqu'à l'obtention de la forme voulue (Dassault Systems, s.d.).

Le recours à la fabrication additive sera sans aucun doute essentiel à la construction de bâtiments visant à faciliter une présence à long terme sur la Lune, et les progrès connexes auront probablement des incidences considérables sur la fabrication de pointe et les techniques de construction pour le secteur industriel canadien.

Le programme spatial chinois a déjà ciblé les technologies de fabrication additive comme un domaine d'intérêt et envisage de les mettre à l'essai en vue d'y recourir pour construire des bâtiments sur la Lune lors de sa mission Chang'e 8 prévue en 2028 (3Dnatives, 2023). La NASA a elle aussi reconnu le potentiel de la

fabrication additive pour faciliter la poursuite de l'exploration spatiale, en concluant un contrat de 57,2 millions de dollars US avec la société de technologie de construction ICON pour examiner les moyens de construire l'infrastructure lunaire, dont des plates-formes d'atterrissage, des habitations et des routes (NASA, 2022). De plus, la NASA exploite l'Additive Manufacturing Center (AMC), un laboratoire de recherche et une installation de production rattachés au laboratoire Jet Propulsion Facility. Les travaux de l'AMC portent sur la fabrication de matériel de vol spatial et de matériel de soutien mécanique au sol pour les missions de la NASA (NASA, s.d.).

Le milieu universitaire a répondu avec enthousiasme au potentiel de la fabrication additive dans l'espace. Ces dernières années sont apparues une recherche d'avant-garde consistant dans une analyse des compromis portant sur l'utilisation des technologies de fabrication additive actuelles dans l'espace (Labeaga-Marinez et al., 2017) et dans des expérimentations pour vérifier le rendement des systèmes de fabrication en condition de gravité lunaire et de microgravité (Reitz et al., 2021).

Ailleurs que dans l'espace, la fabrication additive a d'innombrables applications sur Terre, notamment pour fabriquer des pièces de machinerie, des implants médicaux ou des prothèses et pour imprimer des outils sur mesure (Hexagon, s.d.). Le marché de la fabrication additive est reconnu comme une pierre angulaire de la fabrication de pointe et devrait connaître un taux de croissance annuel composé de 21 % et une valeur de 44 milliards de dollars d'ici 2027. L'URIS pourrait stimuler l'innovation en ce qui concerne le traitement des matériaux et la construction in situ, compte tenu de l'exigence d'utiliser les matériaux complexes tirés du régolithe lunaire pour construire des routes, des sites de lancement et d'autres ouvrages nécessaires pour survivre dans des environnements austères. Comme cela est le cas depuis le début de l'exploration spatiale, les progrès technologiques qui découlent de l'utilisation des technologies dans l'espace se répercuteront sans aucun doute sur les applications terrestres, ce qui donnera lieu à une utilisation de la fabrication additive plus complexe et créatrice de valeur.

2.5 Un secteur d'innovation indirecte : les soins de santé

Les soins de santé sont reconnus comme l'une des activités de soutien essentielles qui devront être améliorées afin de soutenir une présence humaine permanente sur la Lune. Deux aspects sont retenus : les services de santé (comme les dispensaires, les cliniques et les examens de santé) et les centres d'entraînement physique (comme les tapis roulants et les autres appareils d'exercice).

Les progrès technologiques de la prestation des services de soins de santé pour les astronautes en orbite terrestre basse et dans l'espace lointain pourraient aussi mener à des améliorations à court terme dans les soins de santé au Canada, puisque certains des défis auxquels font face les astronautes sont les mêmes que ceux vécus dans le contexte unique du Canada, en particulier dans les collectivités éloignées et celles du Nord. Pour se déplacer plus loin dans l'espace, les astronautes auront besoin de solutions de soins de santé plus autonomes et indépendantes d'une assistance terrestre. L'initiative Nouveaux horizons en santé de l'ASC est l'une des contributions du Canada au programme spatial international et vise à trouver des solutions à ces défis. La contribution du Canada est une approche transformatrice de la prestation de soins de santé à distance qui facilite la capacité et l'autonomie médicales sur place. Ce « modèle de soins de santé dans l'espace lointain » sur place répondrait aux défis en la matière auxquels les astronautes feront face lors des missions de longue durée vers la Lune et au-delà.

La nouvelle stratégie spatiale du Canada précise en quoi le fait de maintenir les astronautes en bonne santé dans l'espace lointain a des retombées directes sur les soins de santé au Canada. Le gouvernement fédéral s'engage à travailler avec ses partenaires provinciaux en matière de santé et les collectivités nordiques pour que les connaissances et technologies de pointe acquises dans le cadre du programme spatial puissent être utilisées pour offrir des avantages tangibles aux Canadiens.

Les investissements dans l'industrie spatiale ont déjà amélioré les soins de santé au Canada. Par exemple, la société Carré Technologies de Montréal a

mis au point le biomonitor pour l'Agence spatiale canadienne. Le biomonitor est une technologie prêt-à-porter qui contrôle et enregistre les signes vitaux des astronautes à bord de la Station spatiale internationale. Une première version de la technologie pourrait être bénéfique pour les athlètes, et de futures versions du dispositif prêt-à-porter pourraient aider les Canadiens alités, immobilisés à la maison ou vivant dans des collectivités rurales où l'accès à un soutien médical est limité.

Les investissements dans l'industrie spatiale ont déjà amélioré les soins de santé au Canada.

Cinq entreprises canadiennes ont été retenues pour construire des prototypes du module médical de soins synergiques et ont développé une technologie de pointe pour accroître l'autonomie médicale des équipages, leur permettant de gérer eux-mêmes leurs soins de santé lors des missions dans l'espace lointain au cours de la prochaine décennie. Ces technologies pourraient aussi être des technologies à double usage pour aider à résoudre les défis actuels des soins de santé dans les collectivités éloignées au Canada et ailleurs.

Cela pourrait donner lieu à des progrès technologiques permettant aux astronautes de diagnostiquer et traiter eux-mêmes des problèmes de santé, en de ceux permettant de contrôler à distance la santé des astronautes. L'ASC travaille déjà avec des partenaires au développement de dispositifs prêt-à-porter pour contrôler la santé des astronautes et transmettre les données pour analyse à des professionnels de la santé sur Terre. L'ASC soutient que ces types de progrès pourraient être à l'avantage des astronautes lors des missions à long terme vers la Lune et avoir des applications à court terme au Canada.

La prestation de soins médicaux à distance dans des régions éloignées du Canada se produit déjà et pourrait profiter des progrès technologiques asso-

ciés à la prestation de soins de santé à distance dans l'espace. La société Euroconsult a estimé que neuf collectivités du Nord canadien avaient eu recours à la télémédecine ou à des solutions de cybersanté et épargné 600 000 \$ en 2017 parce que ses membres n'avaient pas à se déplacer vers un médecin. Des applications à court terme sur Terre pourraient aussi découler du développement au Canada de dispositifs prêt-à-porter pour contrôler la santé des astronautes. Euroconsult a estimé qu'en 2018 plus de 300 000 Canadiens ont téléchargé des applications liées à la santé et la condition physique et un tiers d'entre eux recourent à la technologie GPS (de l'anglais Global Positioning System; en français : système mondial de positionnement), elle-même liée au système de géolocalisation et navigation par satellites connu sous l'abréviation anglaise GNSS (pour Global Navigation Satellite System) (Gouvernement du Canada, 2020b).

D'autres solutions à double usage dans le domaine de la santé, dans l'espace et sur Terre, pourraient même avoir des applications plus larges. Citi GPS indique que la R et D pharmaceutique est un domaine d'intérêt particulier en raison des effets de la microgravité sur les atomes et les molécules. La R et D pharmaceutique dans l'espace pourrait mener à la découverte de nouvelles protéines et de nouveaux traitements pharmaceutiques. En supposant que la R et D sur la microgravité arrive à représenter environ 4 % des dépenses en R et D dans le secteur pharmaceutique d'ici 2040, Citi GPS prédit un chiffre d'affaires potentiel de 14 milliards de dollars par année durant cette période (Citi GPS, 2022).

2.6 Un secteur d'innovation indirecte : l'agriculture

L'agriculture canadienne profite de la technologie spatiale de différentes façons. L'imagerie satellitaire a aidé les gouvernements provinciaux à épargner 75 millions de dollars en prévention de l'érosion des sols. L'agriculture de précision que permet la technologie GPS fait économiser aux agriculteurs jusqu'à 550 millions de dollars par année en permettant d'améliorer les rendements et de réduire les coûts des engrais et de l'irrigation, soit de 10 à 25 dollars l'acre. En

outre, la société Euroconsult a estimé que le recours à l'imagerie satellitaire en soutien de support l'industrie du canola a ouvert aux agriculteurs canadiens un marché d'exportation de 100 à 200 millions de dollars par année vers l'Union européenne (ASC, 2019).

Un autre exemple est celui de la société NithField Advanced Agronomy, établie dans le Sud de l'Ontario, qui aide les agriculteurs à utiliser plus efficacement leurs terres en mettant à profit des produits satellitaires comme les données RADARSAT du Canada. La société affirme que les ressources spatiales peuvent accroître la productivité agricole, en permettant aux agriculteurs d'évaluer et de gérer à distance les conditions des champs.

La recherche que mène l'ASC sur les techniques de culture hors sol a permis de cultiver des plantes dans des environnements arctiques pauvres en ressources, ce qui rend ces techniques idéales pour les missions spatiales, où le poids et le volume sont critiques. En maîtrisant ces techniques, des agences spatiales comme l'ASC et la NASA visent à compléter l'alimentation des astronautes par des aliments d'origine végétale frais et nourrissants lors des missions de longue durée, en améliorant leur nutrition et leur bien-être lors de l'exploration d'autres mondes. En outre, les connaissances acquises des expériences dans l'espace peuvent avoir des retombées pratiques sur Terre et contribuer à des pratiques agricoles plus durables et plus efficaces compte tenu de la population mondiale en croissance. En témoignent les travaux de l'ASC sur le projet Naurvik au Nunavut (ASC, 2021).

La nouvelle stratégie spatiale du Canada affirme que la technologie servant à cultiver des aliments de façon efficace dans les régions les plus éloignées du Canada, où se trouvent souvent les milieux les plus arides, pourrait un jour évoluer pour permettre de cultiver des aliments pour les astronautes sur la Lune ou dans l'espace lointain. En encourageant cette capacité, le Canada résout deux défis : la sécurité alimentaire dans les régions éloignées du pays et l'alimentation des astronautes sur la Lune.

À mesure que des humains se déplaceront plus loin dans l'espace, une innovation technologique deviendra de plus en plus nécessaire pour cultiver des ali-

ments sur place en utilisant de l'eau lunaire. Cette utilisation des ressources in situ va nécessiter d'importants progrès technologiques dans l'industrie agricole dont l'agriculture terrestre pourrait aussi profiter. La firme PWC indique que l'agriculture sur la surface lunaire sera essentielle à la production d'aliments et au soutien de la vie (PWC, 2021). Cela pourrait peut-être être fait à l'aide de « biosphères » en cylindre et de serres lunaires. L'agriculture sur la Lune n'est pas quelque chose qui pourrait arriver, mais qui doit arriver.

En fait, des Canadiens travaillent déjà sur applications destinées à l'agriculture lunaire, et ces solutions pourraient aider à surmonter les défis au Canada et ailleurs. Des chercheurs de l'Université de Guelph travaillent sur des techniques qui pourraient un jour permettre de produire des cultures sur la Lune et ultérieurement sur Mars. La tâche sur Terre est immense : d'ici 2050, la production alimentaire devra augmenter de 70 % juste pour suivre la croissance de la population terrestre actuellement prévue.

La firme Goldman Sachs (2016) a montré en quoi les technologies reposant sur l'utilisation de dispositifs spatiaux jouent déjà un plus grand rôle dans l'agriculture sur Terre, comme en témoigne, par exemple, l'utilisation plus fréquente de drones, de véhicules de ferme automatisés et de la télédétection. Ces progrès technologiques que permet l'utilisation de dispositifs spatiaux ne font que commencer à se répercuter sur l'agriculture sur Terre.

Dans un avenir proche, une plus grande utilisation des dispositifs spatiaux, puis des dispositifs in situ, apportera davantage d'innovations et de gains d'efficacité aux entreprises agricoles. La valeur des avantages de la seule navigation par satellite pour les fermes canadiennes pourrait dépasser 1 milliard de dollars par année si toutes adoptaient cette technologie. Aujourd'hui, quelque 45 000 fermes utilisent la navigation par satellite d'une façon ou d'une autre, ce qui représente plus de la moitié de la superficie totale cultivée et fait réaliser des économies de coûts de 575 millions de dollars par année.

2.7 Résumé de l'alignement sur les politiques actuelles

L'industrie minière dans l'espace et l'URIS s'alignent sur un certain nombre de politiques et de mandats actuels du Canada au niveau fédéral. Le présent rapport se fonde sur l'idée que non seulement le soutien de l'URIS, en tant que stratégie ambitieuse, s'aligne sur les politiques actuelles, mais qu'il aide aussi à les réaliser, tout en équilibrant les engagements du Canada envers l'industrie, ses citoyens et ses responsabilités sociales. Les sections ci-dessous décrivent les effets de ce soutien sur les mandats stratégiques gouvernementaux.

2.7.1 Leadership mondial dans l'industrie minière

Le Canada est un chef de file mondial en matière de ressources naturelles. Le gouvernement a pour priorité essentielle de maintenir la domination et la compétitivité mondiales du Canada dans le domaine minier. Les lettres de mandat de 2021 comprennent le passage « positionner le Canada comme la principale nation minière » (Trudeau, 2021). Le principal document stratégique du Canada dans le domaine minier, le Plan canadien pour les minéraux et les métaux, a pour point fort d'exposer une vision du Canada comme « chef de file de l'industrie minière ». Le document expose une occasion stratégique pour le Canada à l'égard de l'industrie minière dans l'espace, non seulement pour assurer sa compétitivité, mais aussi pour stimuler l'innovation afin d'aider dès maintenant son industrie minière sur le plan de l'efficacité et des coûts. Le Canada a déjà fait le constat suivant : « Des mesures rapidement prises par le Canada en matière de nouvelles frontières minières serviraient à démontrer son leadership, signaleraient qu'il accueille favorablement l'innovation et les investissements et appuie le transfert de technologie entre les secteurs ». L'espace est le nouveau domaine minier et devrait par conséquent être pris en compte dans le cadre de la stratégie du Canada pour devenir le premier pays minier.

2.7.2 Stratégie sur les minéraux critiques

Un prolongement du leadership du Canada en matière de ressources naturelles réside dans sa stratégie sur les minéraux critiques. Il y a un lien très fort entre

l'innovation de l'URIS et sa contribution à la stratégie sur les minéraux critiques du gouvernement, avec ISDE et Ressources naturelles Canada (RNCan). Non seulement l'URIS et les technologies connexes stimuleront l'innovation dans l'exploration, l'exploitation et le traitement des minéraux critiques, mais la Lune elle-même est considérée comme le prochain domaine stratégique pour ces minéraux, comme les montrent des déclarations récentes de la Chine en ce sens (Modern Diplomacy, 2023).

« Soutenir l'approche 'Des mines à la mobilité' en attirant des placements sûrs dans des domaines clés comme le traitement des minéraux, la fabrication de cellules et la fabrication et l'assemblage de pièces de véhicules zéro émission et se servir de tous les outils, y compris la *Loi sur Investissement Canada*, pour assurer la protection et l'exploitation de nos minéraux critiques. Cela suppose une collaboration avec le ministère des Ressources naturelles pour élaborer et lancer une stratégie canadienne sur les minéraux critiques, afin de positionner le Canada aux premières lignes de l'exploration, de l'extraction, de la transformation et de la fabrication de ces minéraux et comme un chef de file de la production de batteries et des autres technologies propres et numériques, ainsi que pour créer un écosystème d'innovation et de fabrication industrielle de batteries durables au Canada, y compris le positionnement du pays comme un chef de file mondial de la fabrication, du recyclage et de la réutilisation des batteries. »

L'urgence autour des minéraux critiques a déjà donné lieu à d'autres stratégies nationales, dont la Stratégie pancanadienne de géoscience et la Stratégie quantique nationale. Chacune d'elles plaide pour de l'innovation dans les technologies des capteurs pouvant explorer et repérer les ressources naturelles avec une précision transformatrice. Comme il a été mentionné précédemment, les technologies de l'URIS sont étroitement liées à chacune de ces priorités et, pour peu qu'on y mette de l'ambition et de la détermination, rapprocheront naturellement le Canada de ses objectifs relatifs aux minéraux critiques.

2.7.3 Objectifs de carboneutralité

On ne saurait surestimer le potentiel de l'URIS d'influer sur les objectifs de carboneutralité. Des solutions de production et de stockage d'énergie sans émission pour la fabrication de pointe, l'électrification et la décarbonation de l'équipement industriel, et du traitement durable des ETR, jusqu'aux technologies quantiques et géoscientifiques de pointe pour révolutionner l'industrie minière et réduire les dommages écologiques inutiles causés par les méthodes d'exploration usuelles, les technologies de l'URIS promettent de réduire l'empreinte carbone des industries reconnues comme celles qui contribuent le plus aux émissions de GES dans le monde entier.

Plusieurs lettres de mandat insistent sur la nécessité pour le Canada d'atteindre ses cibles de carboneutralité. La fabrication de pointe, l'industrie minière et l'énergie joueront toutes des rôles importants dans l'atteinte de ces cibles vu l'appel à veiller à ce que les investissements « transforment de façon significative l'industrie canadienne pour qu'elle agisse comme chef de file et soit concurrentielle dans un avenir carboneutre » (Trudeau, 2021). La technologie de l'URIS offre des capacités de prochaine génération pour renforcer les forces concurrentielles du pays, tout en continuant de répondre aux exigences de carboneutralité.

2.7.4 Stratégie nationale de développement communautaire autochtone

Des méthodes responsables et durables de gestion des ressources naturelles aideront aussi le Canada à gérer ses obligations concernant les terres autochtones du Nord, tout en équilibrant le besoin de ressources du pays et la protection du passage du nord contre les menaces étrangères. En 2019, la valeur de la production minérale dans les Territoires du Nord-Ouest était de 3,3 milliards de dollars canadiens (Gouvernement du Canada, 2021c). Selon l'Agence canadienne de développement économique du Nord (2023) :

Le potentiel des ressources minérales du Canada se trouve en grande partie dans les territoires. Les gisements de minéraux sont susceptibles d'y soutenir des projets d'extraction de ressources, dont

des diamants, de l'or, des métaux de base et de l'argent, du tungstène, de l'uranium, des éléments des terres rares, du fer, du zinc et du cuivre. Le gouvernement du Canada soutient l'industrie minière durable, notamment l'extraction de minéraux critiques qui l'aideront à passer à une économie verte, à faible émission de carbone. Les minéraux critiques sont les composantes de base essentielles des énergies renouvelables et des applications des technologies propres (p. ex. les batteries, les aimants permanents, les panneaux solaires et les éoliennes), de la fabrication de pointe, des produits électroniques grand public et d'autres applications.

L'exploration de précision et les méthodes de traitement propres qui découlent de l'innovation liée à l'URIS, comme QASM et HYDRO mentionnés précédemment, peuvent être déployées afin de favoriser des stratégies non perturbatrices et pertinentes pour la coexploitation de sites miniers avec les collectivités autochtones.

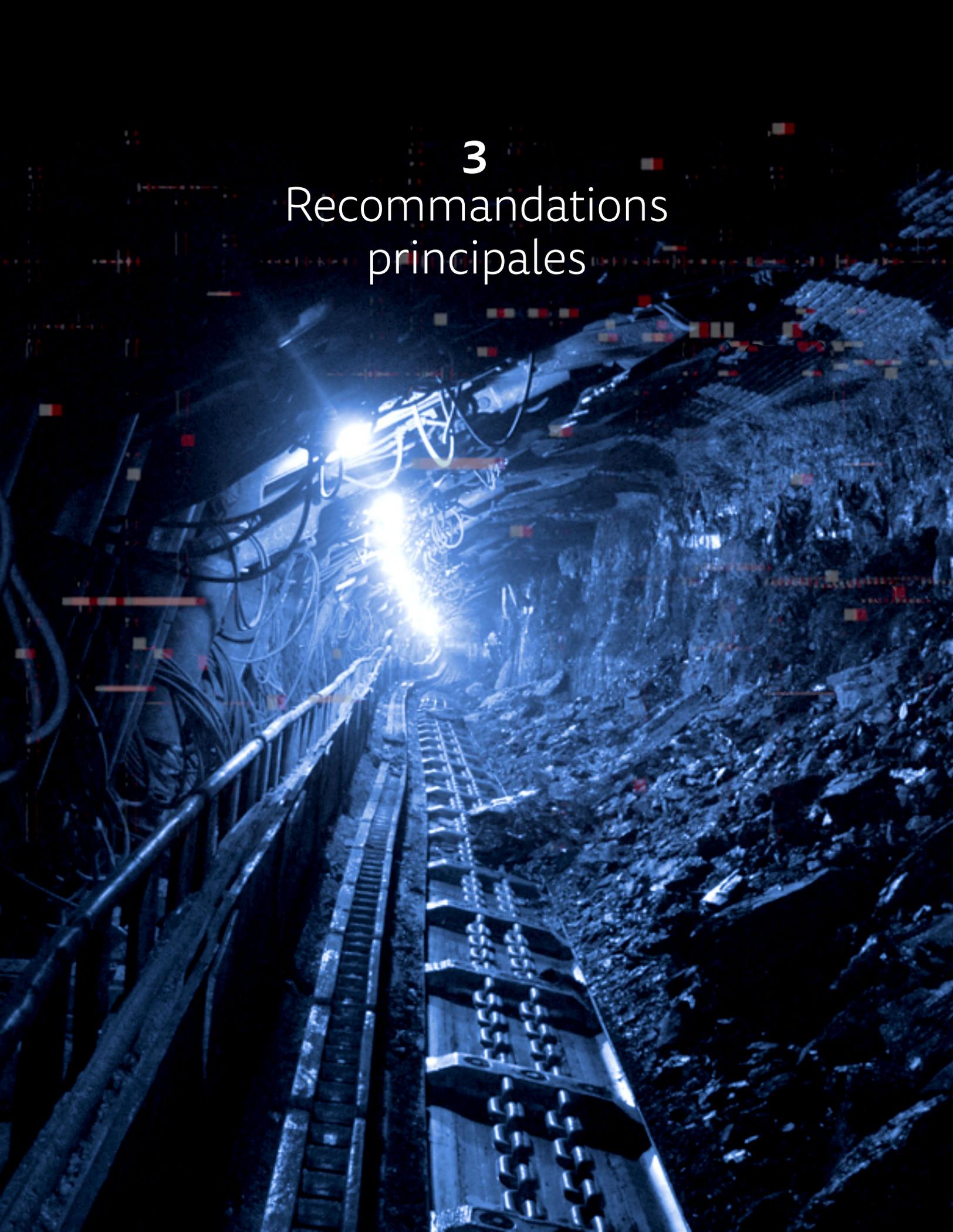
Un autre aspect primordial pour les collectivités autochtones est l'accès inéquitable à l'électricité, au chauffage et aux soins de santé dans le Nord canadien. En Colombie-Britannique, par exemple, seulement 40 % des personnes vivant dans une réserve ont accès au gaz naturel pour chauffer leur maison, comparativement à 95 % des autres résidents de la province (Ecotrust Canada, s.d.). À l'échelle du pays, des estimations indiquent que 200 collectivités autochtones ne sont pas raccordées à un réseau électrique (McCarthy, 2016). La technologie de l'URIS, comme les microréacteurs et l'infrastructure de santé modulaire, pourra prendre la forme d'innovations durables et efficaces pour répondre à des besoins essentiels à des opérations industrielles éloignées et hors réseau dans un environnement extrême. De ce fait, les collectivités autochtones du Canada pourraient compter parmi les plus grands bénéficiaires de ces technologies.

2.7.5 Inspirer la prochaine génération d'innovateurs dans les disciplines STIM

Les mandats du gouvernement du Canada comprennent le soutien des activités liées aux disciplines STIM à tous les points de vue, ce qui comprend : un rôle de chef de file des responsables du système d'éducation; des rôles intégrés pour RNCan, ISDE et bien d'autres pour ce qui est de trouver des occasions de soutenir et d'inspirer des activités liées aux disciplines STIM; et, bien sûr, le mandat premier de l'ASC d'inspirer la prochaine génération d'innovateurs des disciplines STIM. Les disciplines STIM constituent une priorité reconnue clairement dans presque tous les ministères. L'espace a toujours captivé les esprits, inspiré la curiosité et mobilisé des talents de façons qu'on n'aurait jamais crues possibles. La course spatiale des années 1960 en a été le premier exemple, alors que l'ambitieux programme Apollo des États-Unis catalysait des talents comme jamais auparavant. Une stratégie ambitieuse en matière d'URISferait de même pour le Canada et, comme il a été exposé tout au long du présent rapport, elle permettrait de disséminer ces talents parmi les industries stratégiques qui éprouvent habituellement des difficultés à attirer les Canadiens les plus innovateurs.

3

Recommandations principales



3 Recommandations principales

La possibilité de pouvoir compter sur une orientation fédérale unifiée en ce qui concerne l'URIS laisse entrevoir des avantages réels et en cascade pour le Canada, ses citoyens et son industrie. Toutefois, le budget ne saurait à lui seul concrétiser le potentiel latent de création d'emplois, de développement de talents et de motivation que recèle l'URIS. Des cadres réglementaire et d'approvisionnement plus clairs doivent aussi être envisagés. Les cinq recommandations principales ci-dessous portent sur un financement et des cadres réglementaire et d'approvisionnement susceptibles de propulser le Canada aux premières lignes de cette occasion d'une génération.

Recommandation 1

Adopter une loi en deux phases sur les ressources spatiales et instaurer un régime réglementaire clair pour aider l'industrie à prospérer.

Il n'existe pas de cadre réglementaire parfait pour les ressources spatiales. La recommandation préconise une approche en deux phases, d'abord pour établir la phase 1 d'une loi sur les ressources spatiales simplifiée et inspirée du travail déjà fait par d'autres pays alliés (États-Unis, Japon et Luxembourg). Cela permettrait à l'industrie et à la formation de capital de se mettre en place. Selon l'état de l'industrie à la fin de la décennie 2020, le Canada pourrait revoir le cadre et adopter la phase 2 de la loi, plus complète et intégrant toutes les nuances nécessaires.

Tout retard de la phase 1, en tentant de passer directement à la phase 2, ne ferait que nuire aux intérêts économiques et stratégiques du Canada et risquerait d'étouffer la jeune industrie. Une approche semblable à celle d'un

lancement commercial au Canada serait appropriée, soit de faire une annonce pour signaler l'intention du pays de soutenir les ressources spatiales et pour indiquer un calendrier précis de mise en œuvre des deux phases. Le Canada doit envoyer au reste du monde un signal clair qu'il entend tirer parti de ses capacités de chef de file mondial de l'industrie minière au profit de ses alliés et de la communauté internationale.

Recommandation 2

Modifier la *Loi sur l'impôt sur le revenu* pour étendre à l'espace (la Lune, les astéroïdes et d'autres corps célestes) les dispositions fiscales particulières s'appliquant à l'industrie minière, afin de faire du Canada le territoire le plus attrayant du point de vue financier pour l'industrie minière dans l'espace, comme il l'a fait avec l'industrie minière sur Terre.

La force de l'industrie canadienne des ressources tient en grande partie à la dotation du pays en ressources naturelles, mais aussi de son environnement d'investissement unique. Grâce à des dispositions fiscales particulières pour l'industrie minière, le Canada a créé pour les sociétés minières le territoire idéal où s'établir, mener des activités et, plus important encore, mobiliser des capitaux. Cela a eu pour effet que le Canada possède aujourd'hui le plus grand marché de capitaux pour les ressources naturelles sur la planète, lequel finance 52 % de toutes les transactions minières sur une base annuelle. L'élargissement à l'espace du champ d'application de ces dispositions pourrait conférer au Canada un avantage concurrentiel à l'échelle mondiale en ce qui a trait aux ressources spatiales.

Toutes les activités liées aux ressources spatiales et à la vente de produits auront lieu hors du territoire de compétence du Canada et, par conséquent, l'imposition serait considérée comme extraterritoriale, et les opérations minières dans l'espace, comme des « activités à l'étranger ». Pour que le Canada profite des retombées économiques et recueille les recettes fiscales potentielles, une rédaction attentive de la définition de ce qui constitue des dépenses d'exploration admissibles s'impose.

Bien qu'il soit peu courant qu'une société minière canadienne mène directement des activités à l'étranger, le cas échéant et sauf quelques exceptions, celle-ci calcule les revenus qu'elle en tire (ou les pertes qu'elles lui font subir) selon essentiellement les mêmes règles que s'ils étaient de source canadienne :

- La plupart des dépenses liées aux activités minières à l'étranger sont traitées comme des frais relatifs à des ressources à l'étranger (FRE), ceux-ci étant l'équivalent à l'étranger des frais d'exploration au Canada (FEC) et des frais d'aménagement au Canada (FAC) sous le régime canadien de l'impôt sur le revenu;
- Les activités minières à l'étranger auraient lieu sur la Lune, les astéroïdes ou d'autres corps planétaires, mais comme il n'existe pas de convention fiscale officielle avec ces corps, les droits d'imposition du Canada ne seraient aucunement restreints;
- Dans la mesure où un impôt sur les revenus et les bénéfices est perçu dans le territoire étranger où une société minière canadienne exerce des activités, celle-ci a en principe droit à un crédit pour impôt étranger selon les règles fiscales canadiennes, ce qui réduit l'impôt canadien autrement exigible sur ses revenus et bénéfices. Or, comme aucun impôt ne serait perçu à l'étranger dans le cas des ressources spatiales, l'impôt irait entièrement au Canada.

Puisqu'une bonne partie des activités serait exercée dans le champ de compétence du Canada, les avantages économiques et les recettes fiscales seraient maximisés à l'intérieur des frontières du pays. L'industrie minière dans l'espace sera avantageuse pour les sociétés canadiennes spécialisées dans les industries de haute technologie ayant des exigences élevées en matière de connaissances et offrant de hauts salaires. Les programmes des universités canadiennes qui se spécialisent en génie mécanique, en robotique et en technologies aérospatiales en bénéficieront probablement aussi.

Le rapport Emerson (2012) plaidait pour que le traitement fiscal avantageux accordé actuellement aux investisseurs dans les actions accréditatives de sociétés d'exploration minière soit étendu aux investisseurs dans les activités

commerciales dans l'espace, que ces activités soient liées ou non à l'industrie minière. Cette mesure est susceptible d'encourager les efforts du secteur privé à long terme. Vu le petit nombre de sociétés spatiales commerciales au Canada, les dépenses annuelles aux fins de cette mesure seraient marginales.

Les actions accréditives peuvent faire bénéficier les sociétés minières d'une réduction du coût des capitaux sur une base nette et feraient du Canada l'un des territoires les plus attrayants du monde pour les ressources spatiales. Elles permettraient aussi aux sociétés de ressources de rattraper leur retard dans la mobilisation de capitaux par rapport à leurs pairs des États-Unis, du Japon et du Luxembourg.

De plus, l'élargissement du crédit d'impôt pour l'exploration minière (CIEM) aux entreprises canadiennes œuvrant dans l'exploration des ressources spatiales dans l'intention expresse de les exploiter donnerait à l'industrie un avantage sur ses concurrents étrangers. Le CIEM a pour but d'aider les sociétés d'exploration à lever des fonds propres et peut être utilisé en plus des réductions d'impôt normales associées aux investissements dans les actions accréditives. Le CIEM est un crédit d'impôt non remboursable de 15 % des dépenses d'exploration admissibles, y compris les coûts liés à la prospection et aux levés géologiques, géophysiques et géochimiques aux fins de la recherche de gisements de métaux de base ou de métaux précieux. Ce programme a grandement contribué à stimuler l'investissement de capitaux privés dans les sociétés canadiennes d'exploration et d'exploitation minières et à faire du Canada le centre mondial du financement minier et de l'exploration et de l'exploitation minières.

Les moyens de financement du secteur spatial indiqués ci-dessus seraient à l'avantage du gouvernement, car ils financent le développement de l'innovation qui a déjà un effet financier positif pour le pays. La technologie peut se propager au reste de l'économie et consolider le bastion de l'industrie minière terrestre qu'est le Canada.

Recommandation 3

Allouer dans le prochain budget un montant de capitaux suffisants aux sociétés de ressources, aux technologies, à la recherche-développement et aux projets spatiaux.

Une stratégie nationale ambitieuse inciterait le gouvernement à allouer suffisamment de capital à des ministères habituellement non concernés, afin de souligner l'importance des investissements dans l'espace dans le cadre d'une stratégie fédérale d'innovation axée sur les missions et de permettre au Canada de rattraper son retard sur le reste du monde en matière de ressources spatiales. En combinaison avec les recommandations ci-dessus visant à procurer un avantage au Canada, une allocation suffisante dans le budget de plusieurs ministères mettrait l'industrie canadienne sur un pied d'égalité avec le reste du monde du point de vue du capital. La meilleure façon de faire cela est d'adopter une approche pangouvernementale, sous l'impulsion de RNCan, d'ISDE et de l'ASC, entre autres.

Recommandation 4

Envisager les possibilités dans le domaine du nucléaire dans l'espace lors de la mise à jour du régime réglementaire canadien et une voie réglementaire claire pour les solutions avancées par l'industrie.

Pouvant s'appuyer sur des décennies de leadership en matière de développement de la technologie nucléaire et sur une réputation enviable comme partenaire mondial, le Canada a une occasion réelle dans le domaine du nucléaire dans l'espace. L'ASC doit pouvoir autoriser et valider le lancement de réacteurs sur une orbite terrestre basse ou dans l'environnement lunaire. Or, il n'existe clairement aucun mécanisme permettant cela au Canada, et l'ASC devra probablement compter encore sur la collaboration de partenaires d'autres pays, comme la NASA.

Afin de démontrer et de valider cette capacité d'opération dans l'espace, l'ASC devra assurer une coordination avec AMC, RNCan et d'autres organismes

pour définir une voie réglementaire. Le Canada devra trouver une façon d'y arriver sans que les États-Unis m'aient à assigner le *Traité de non-prolifération*. Ce travail et les défis qui lui sont associés ont probablement été abordés dans le cadre des travaux menés par l'ASC aux fins de ses études avec RNCAN et les Laboratoires nucléaires canadiens et par MDA aux fins de l'Initiative d'exploration de la surface lunaire, dans la catégorie Énergie.

Recommandation 5

Que le gouvernement repense son approche de l'espace de manière à créer un environnement d'essai sain permettant l'afflux de capitaux privés dans l'industrie spatiale canadienne, de sorte qu'il ne soit plus le seul bailleur de fonds.

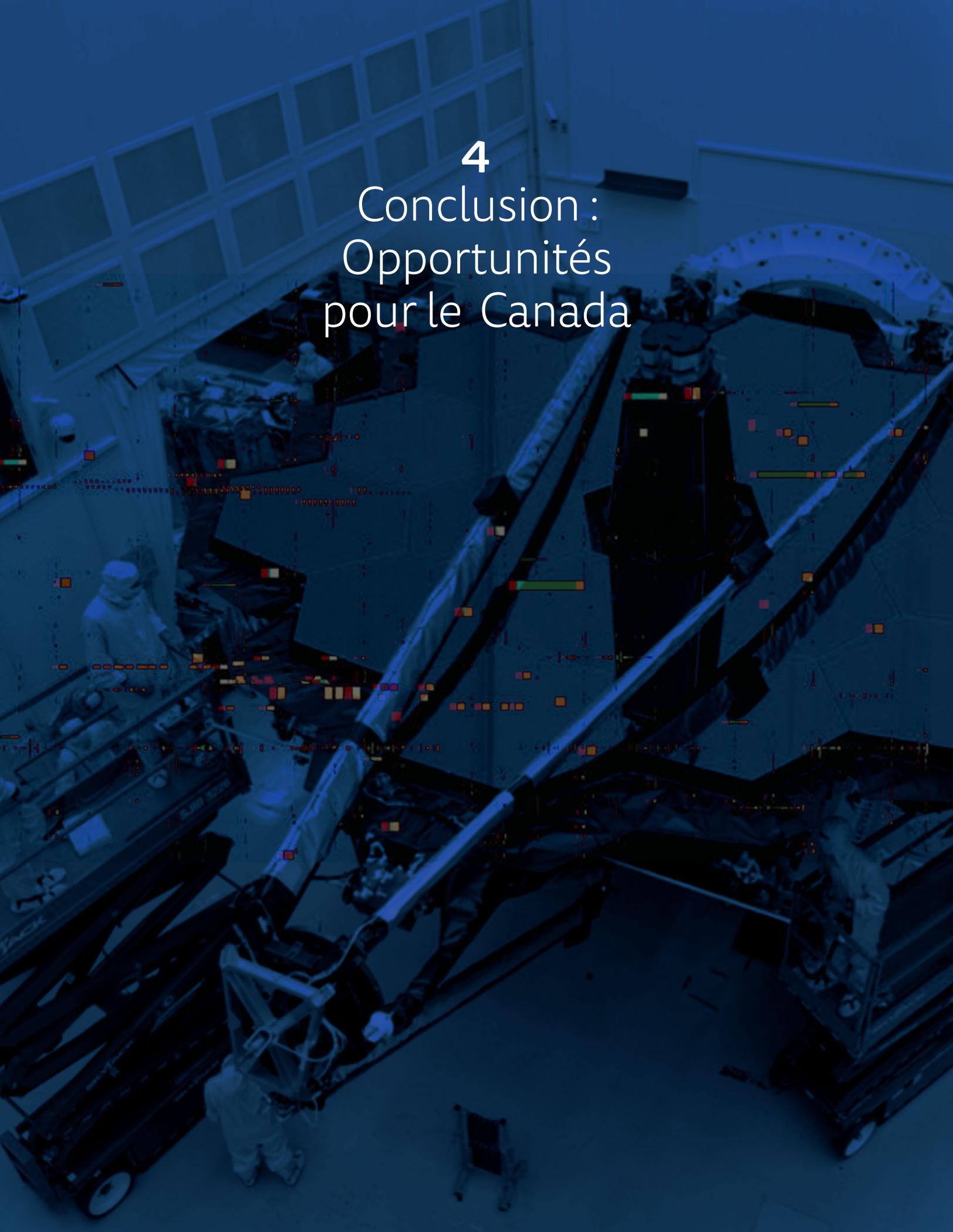
L'ASC devrait adopter une approche à plusieurs niveaux pour assurer l'existence au Canada d'une industrie spatiale fonctionnelle. Il est crucial de voir à la création d'un environnement d'essais approprié pour soutenir l'entrepreneuriat, l'afflux de capitaux et les possibilités qui se présentent, tout en atténuant le risque du gouvernement et en protégeant les intérêts stratégiques du Canada. Les mesures immédiates à prendre sont notamment les suivantes :

- Adopter une approche selon laquelle l'ASC agit comme client de référence, avec des engagements limités selon les risques pour l'achat de biens ou de données qui permettent aux sociétés spatiales d'utiliser le crédit gouvernemental comme un client principal pour financer le développement et la commercialisation de la technologie;
- Soutenir l'afflux de capitaux privés dans l'industrie grâce à un fonds constitué de fonds propres institutionnels ou de capital de risque. Cela pourrait être administré dans le cadre d'un partenariat public-privé ou par le biais d'un fonds de capital de risque dédié de la BDC qui ciblerait le secteur spatial et aérospatial, stimulerait les investissements stratégiques dans l'espace et assureraient des capitaux suffisants pour soutenir une industrie canadienne émergente;

- Mobiliser du capital de risque ciblant le secteur spatial et aérospatial, qui stimulerait l'investissement dans l'espace et assurerait des capitaux suffisants à l'appui d'une industrie canadienne émergente;
- Moderniser les processus d'approvisionnement, en passant à une nouvelle approche de l'espace, plus rapide, comme l'ont fait des pays concurrents. L'initiative Nouveaux horizons en santé et des modules médiaux de soins synergiques (M²S²) de l'ASC est un bel exemple de cette approche rapide, plutôt que la méthode de passation de marchés de maîtrise d'œuvre lente et pénible qui convenait dans un environnement mondial moins compétitif;
- Apporter une clarté réglementaire suffisante pour les nouveaux secteurs de l'industrie, afin de permettre l'afflux de capitaux privés dans l'industrie, qu'entraverait l'absence d'une réglementation adéquate;
- Envisager que l'ASC utilise ses capitaux conformément à sa capacité d'émettre et de garantir des emprunts en vertu de la *Loi sur l'Agence spatiale canadienne*. Un programme de prêts à faible taux d'intérêt ou sans intérêt pourrait être mis sur pied, qui non seulement permettrait des sorties de capitaux, mais créerait aussi un mécanisme alimentant un « fonds permanent » grâce auquel l'ASC pourrait obtenir des remboursements de capitaux. Cela donnerait à l'ASC la capacité de soutenir l'industrie, tout en accroissant sa base de capital au fil du temps, même en cas de croissance statique du budget.

4

Conclusion : Opportunités pour le Canada



4

Conclusion : Opportunités pour le Canada

L'espace a toujours captivé les esprits et propulsé notre civilisation. Dès que nous avons ouvert les yeux, nous avons regardé les étoiles avec émerveillement. Elles jouent depuis toujours un rôle déterminant dans les grandes questions que nous nous posons sur notre identité et nos origines. Après des millénaires, une génération entière a été fascinée de voir les astronautes de la mission Apollo faire « un pas de géant pour l'humanité », un moment qui résonne toujours dans notre imaginaire. Plus récemment, les Canadiennes et Canadiens ont admiré avec grande fierté le bras canadien (Canadarm) à bord de la navette spatiale et, plus tard, un modèle encore plus avancé (Canadarm2) à bord de la station spatiale internationale (ISS). Chaque jour, nous sommes éblouis par les images captées par le télescope spatial James Webb, qui nous approche sans cesse des réponses aux grandes questions que nous nous posons depuis des millénaires. L'espace a une capacité unique à inspirer et attirer de nouvelles générations de scientifiques, d'ingénieurs et d'explorateurs et à stimuler sans cesse d'importantes avancées. Cette grande curiosité et cette soif de connaissance ont été à l'origine d'immenses innovations, avec des applications directes pour les missions en cours et des applications indirectes qui offrent des possibilités inattendues. L'exploitation minière de l'espace pourrait être notre prochain moment, notre prochain « pas sur la lune ».

Les technologies in situ et leurs applications à double usage sur Terre peuvent faire partie de la solution aux plus grands défis auxquels le Canada est confronté aujourd'hui, qu'il s'agisse de la production d'énergie carboneutre qui

rapproche le Canada de son objectif d'émissions nettes nulles d'ici 2050, des applications de soins de santé portables qui répondent aux besoins de notre population vieillissante, ou des opportunités économiques directes dans l'industrie spatiale en plein essor et dont la valeur estimative se chiffre à mille milliards de dollars.

Une question importante est de savoir si le Canada suit le rythme, perd du terrain ou maintient son avantage concurrentiel dans l'industrie spatiale. À l'échelle mondiale, il a été démontré que les revenus de l'industrie spatiale ont augmenté de 74 % entre 2005 et 2010 à 2015, alors que les revenus du Canada dans ce secteur ont augmenté de 44 % au cours de la même période. Il existe une opportunité d'augmenter les investissements canadiens dans le secteur afin de s'approprier une plus large part des revenus mondiaux.

Ce rapport a identifié les opportunités de l'économie spatiale pour le Canada, en particulier en ce qui concerne l'utilisation des ressources in situ (URIS) et l'exploitation minière de l'espace. Pour atteindre notre plein potentiel et devenir des chefs de file mondiaux dans ces domaines, nous devons bénéficier d'un soutien et d'une collaboration concertés. À cette fin, le rapport recommande que le Canada élabore une stratégie en matière d'URIS, qu'il apporte un soutien financier significatif du même ordre que celui accordé aux programmes du Canadarm et du rover lunaire, et qu'il coordonne le développement d'une supergrappe galactique afin de réunir les parties prenantes et les esprits créatifs nécessaires dans l'industrie et le milieu universitaire. 🌍

À propos de la SCMS

La Société canadienne des mines spatiales (SCMS) est une société d'infrastructure visionnaire qui vise à assurer une présence canadienne durable dans l'espace en adressant les grands défis terrestres dans les domaines de l'utilisation des ressources, des soins de santé et de l'énergie. Ces opérations soutiendront le développement de l'infrastructure et de la technologie nécessaires au soutien d'une économie basée sur l'activité spatiale qui sera robuste, à double usage sur Terre et dont l'ensemble des Canadiens bénéficiera bien avant de se rendre sur la Lune.

Fidèle à l'esprit canadien, la SCMS a l'intention d'atteindre ses objectifs lunaires par la mise en place d'un consortium robuste et concerté d'organisations fondées sur des valeurs, couvrant l'industrie, le monde universitaire et les administrations gouvernementales, à la fois au niveau national et à l'étranger. Ce projet spatial cherchera à étendre le leadership canadien en matière de pratiques minières durables au-delà de la Terre, à la prochaine frontière de l'exploitation des ressources.

Les cinq membres principaux de l'équipe possèdent des dizaines d'années d'expérience dans la gestion de projets complexes de haut niveau au Canada, pour la NASA et à l'étranger. Il s'agit notamment des missions spatiales les plus importantes pour le Canada, comme les missions Radarsat (1, 2, & RCM), Canadarm 1-3, la privatisation de l'industrie de l'énergie nucléaire du Canada, ainsi que des dizaines de projets d'instrumentation spatiale et d'exploitation minière. Les dirigeants de SCMS ont une grande expérience dans le développement et la construction de propriétés et d'infrastructures dans des environnements urbains et éloignés, ce qui est pertinent pour leur mission.

Depuis sa création en 2020, la SCMS a remporté trois contrats importants avec l'Agence spatiale canadienne (ASC), dont l'Initiative d'exploration de la surface lunaire (IESL), dans le cadre de laquelle elle dirige les travaux d'exploitation minière spatiale et d'utilisation des ressources in situ (URIS) pour le Canada. La SCMS est la seule entreprise en démarrage en lice pour le prochain grand programme d'exploration spatiale du Canada dans le cadre de l'IESL. La SCMS a également construit un prototype d'hôpital pour l'ASC en tant que projet de recherche précoce dans le cadre du programme C2M2. Cette clinique médicale en conteneur d'expédition offre une technologie d'infrastructure perturbatrice pour la fourniture de soins de santé aux communautés éloignées et autochones dans les environnements les plus extrêmes et les conditions climatiques les plus difficiles. De plus, la SCMS a obtenu un des cinq projets financés pour l'énergie nucléaire spatiale sur la planète, soit le seul grand projet de cet ordre financé au Canada.

La SCMS compte environ 15 employés répartis entre Toronto et Montréal. Le SCMS vise la Lune, rien de moins. Nous croyons qu'il est dans l'intérêt national du Canada de le faire, afin d'assurer la compétitivité continue du Canada à l'avenir, particulièrement dans le secteur des ressources. La SCMS est canadien dans sa constitution, galactique dans sa vision et international dans son approche.

csmc-scms.ca

À propos de NGen

Fabrication de prochaine génération Canada (NGen) est l'organisation sectorielle à but non lucratif qui dirige la Grappe d'innovation mondiale en fabrication de pointe du Canada. NGen se consacre à la mise en place de capacités de fabrication de pointe de calibre mondial au Canada, pour le bénéfice de tous les Canadiens.

Nous visons à renforcer l'économie canadienne et à créer des emplois de grande valeur pour les Canadiens tout en contribuant à des solutions à certains des défis les plus pressants du monde dans des domaines comme les soins de santé, la gestion de l'énergie et des ressources, et la durabilité de l'environnement. NGen s'efforce d'atteindre ces objectifs en tirant parti des forces de la recherche, de la technologie et de l'industrie de l'écosystème de fabrication de pointe du Canada.

Nous créons de nouvelles possibilités en combinant les capacités des fabricants, des sociétés d'ingénierie et de technologie, des services aux entreprises, des chercheurs, des établissements d'enseignement, des centres d'innovation, des réseaux d'affaires et de notre main-d'œuvre de grande qualité. En améliorant la collaboration, NGen vise à améliorer le rendement de l'industrie canadienne en innovation, à relier et à renforcer notre écosystème de fabrication de pointe, et à accroître la capacité concurrentielle et le potentiel de croissance des entreprises de fabrication de pointe du Canada.

ngen.ca

Bibliographie

3Dnatives (25 avril 2023). Building on the Moon: China's 3D Printing Mission. <https://www.3dnatives.com/en/building-on-the-moon-chinas-3d-printing-mission-250420236/#>

Agence spatiale canadienne (2022). *Le rôle du Canada dans l'exploration de la lune*. <https://www.asc-csa.gc.ca/fra/astronomie/exploration-lune/role-du-canada.asp>

Agence spatiale canadienne (2015). *Comprehensive Socio-Economic Impact Assessment of the Canadian Space Sector*. <https://www.asc-csa.gc.ca/eng/publications/2015-assessment-canadian-space-sector.asp#efcss1>

Agence spatiale canadienne (2021). *Le projet Naurvik au Nunavut*. <https://www.asc-csa.gc.ca/fra/sciences/production-alimentaire/projet-naurvik-au-nunavut.asp>

Agence spatiale canadienne (2019). *Avantages socioéconomiques de l'utilisation de l'espace*. <https://www.asc-csa.gc.ca/fra/publications/2018-avantages-socio-economiques-utilisation-espace.asp>

Agence spatiale canadienne (2023). *État du secteur spatial canadien*. <https://www.asc-csa.gc.ca/fra/publications/etat.asp>

Agence spatiale européenne (Mai 2021). *ESA competition to boost advanced mining solutions for Earth and space*. <https://business.esa.int/news/esa-competition-to-boost-advanced-mining-solutions-for-earth-and-space>

Agence spatiale européenne (2019). *ESA Space Resources Strategy*. https://sci.esa.int/documents/34161/35992/1567260390250-ESA_Space_Resources_Strategy.pdf

Allied Market Research (Octobre 2022). *Autonomous Mining Truck Market by Size (Small, Medium, Large), by Propulsion (Diesel, Electric and Hybrid), by Level of Autonomy (Level 1 and 2, Level 3, Level 4 and 5), by Type (Underground LHD Loaders, Autonomous Hauling Trucks, Others): Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2025-2035*. <https://www.alliedmarketresearch.com/autonomous-mining-truck-market-A09608>

AROSE (n.d.). AROSE. <https://www.rose.org.au/>

Atkinson, R. (15 octobre 2019). *Robotics and the Future of Production and Work*. <https://itif.org/publications/2019/10/15/robotics-and-future-production-and-work/>

Bloomberg (12 mai 2022). *Citi GPS Report: Space Launch Costs to Fall to \$100/kg by 2040, Driving New Industries and Facilitating Monitoring of GHG*. <https://www.bloomberg.com/press-releases/2022-05-12/citi-gps-report-space-launch-costs-to-fall-to-100-kg-by-2040-driving-new-industries-and-facilitating-monitoring-of-ghg>

CIFAR (2022). *Stratégie pancanadienne en matière d'intelligence artificielle*. <https://cifar.ca/fr/ia/>

Citi (Mai 2022). *Space: The Dawn of a New Age*. <https://ir.citi.com/gps/kdhSENV4r-6W%2BZfP44EmqY4zHu%2BDyovMIZnLqk4CrvkaSl1RIJ943g%2FrFEnNLit-1jB%2BjLJV4P9JM%3D>

Comité national des commissions géologiques (2022). *Stratégie pancanadienne de géoscience*. <https://www.commissionsgeologiques.ca/strategie-pancanadienne-geoscience>

Cremons, D.R. (21 octobre 2022). *The future of lidar in planetary science*. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frsen.2022.1042460/full>

Dassault Systems (non daté). *Additive vs. Subtractive Manufacturing*. <https://www.3ds.com/make/solutions/blog/additive-vs-subtractive-manufacturing>

Ecotrust Canada (non daté) *Tackling energy poverty in Indigenous communities on reserve*. <https://ecotrust.ca/latest/blog/tackling-energy-poverty-in-indigenous-communities-on-reserve/>

Emerson Report (Novembre 2012). *Reaching Higher: Canada's Interests and Future in Space*. [http://aerospacereview.ca/eic/site/060.nsf/vwapj/Space-e-online.pdf/\\$file/Space-e-online.pdf](http://aerospacereview.ca/eic/site/060.nsf/vwapj/Space-e-online.pdf/$file/Space-e-online.pdf) pg 54

Euroconsult (9 janvier 2023). *Value of Space Economy reaches \$464 billion in 2022 despite new unforeseen investment concerns*. <https://www.euroconsult-ec.com/press-release/value-of-space-economy-reaches-424-billion-in-2022-despite-new-unforeseen-investment-concerns-2/>

Goldman Sachs (2016). *Profiles in Innovation: Precision Farming*. https://docdrop.org/static/drop-pdf/GSR_agriculture-N1sH6.pdf

Gouvernement de l'Australie (1er avril 2019). *Australian Civil Space Strategy 2019-2028*. <https://www.industry.gov.au/publications/australian-civil-space-strategy-2019-2028>

Gouvernement du Canada (2023a). *Budget de 2023 – Un plan canadien : une classe moyenne forte, une économie abordable, un avenir prospère*. <https://www.budget.canada.ca/2023/home-accueil-fr.html>

Gouvernement du Canada (2023b). *Grappe de fabrication de pointe du Canada*. <https://ised-isde.canada.ca/site/grappes-dinnovation-mondiales/fr/grappe-fabrication-pointe-canada>

Gouvernement du Canada (2023c). *Priorités actuelles en matière d'investissements : Fonds stratégique pour l'innovation*. <https://ised-isde.canada.ca/site/fonds-strategique-innovation/fr/investissements/priorites-actuelles-investissements>

Gouvernement du Canada (2023d). *L'énergie au Canada*. <https://www.cer-rec.gc.ca/fr/regie/publications-rapports/rapport-annuel/2018/lenergie-canada.html>

Gouvernement du Canada (2022a). *La Stratégie canadienne sur les minéraux critiques*. <https://www.canada.ca/fr/campagne/mineraux-critiques-au-canada/la-strategie-canadienne-sur-les-mineraux-critiques.html>

Gouvernement du Canada (2022b). *Plan de réduction des émissions pour 2030 : Prochaines étapes du Canada pour un air pur et une économie propre*. <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/nouvelles/2022/03/plan-de-reduction-des-emissions-pour-2030--prochaines-etapes-du-canada-pour-un-air-pur-et-une-economie-forte.html>

Gouvernement du Canada (2022c). *Stratégie quantique nationale du Canada*. <https://ised-isde.canada.ca/site/strategie-quantique-nationale/fr>

Gouvernement du Canada (2022d). *Aérospatiale et défense au Canada*. <https://ised-isde.canada.ca/site/aerospatiale-defense/fr/commerce-exportation/aerospatiale-defense-canada>

Gouvernement du Canada (2021a). *Passerelle du secteur de la fabrication au Canada*. <https://ised-isde.canada.ca/site/passerelle-secteur-fabrication-canada/fr>

Gouvernement du Canada (2021b). *Stratégie nationale de développement Communautaire autochtone*. <https://www.sac-isc.gc.ca/fra/1550512330682/1550512404487>

Gouvernement du Canada (2021c). *Favoriser le développement des ressources dans les territoires*. <https://www.cannor.gc.ca/fra/1368816364402/1368816377148>

Gouvernement du Canada (2020a). *Des mines à la mobilité : saisir les nouvelles occasions pour le Canada que présente la chaîne de valeur mondiale des batteries*. <https://publications.gc.ca/site/eng/9.891986/publication.html>

Gouvernement du Canada (2020b). *Avantages socioéconomiques de l'utilisation de l'espace*. <https://www.asc-csa.gc.ca/fra/publications/2018-avantages-socio-economiques-utilisation-espace.asp>

Gouvernement du Canada (2019a). *Exploration, Imagination, Innovation: une nouvelle stratégie spatiale pour le Canada*. <https://publications.gc.ca/site/fra/9.869551/publication.html>

Gouvernement du Canada (2019b). *Projets financés dans le cadre du Programme de promotion de la connectivité et de l'automatisation du système de transport*. <https://tc.canada.ca/fr/transport-routier/technologies-novatrices/vehicules-connectes-automatisees/projets-finances-dans-cadre-programme-promotion-connectivite-automatisation-systeme-transport>

Gouvernement du Canada (2019c). *Comprendre les véhicules connectés et automatisés*. <https://tc.canada.ca/fr/transport-routier/technologies-novatrices/vehicules-automatisees-connectes/comprendre-vehicules-connectes-automatisees>

Gouvernement du Canada (2019d). *Le Plan canadien pour les minéraux et les métaux*. <https://www.minescanada.ca/fr/>

Gouvernement du Canada (2017). *Canada's Innovation and Skills Plan*. https://www.budget.canada.ca/2017/docs/themes/Innovation_en.pdf

Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., & Dunlop, E. D. (2015). *New Materials for Solar Energy Conversion: Gallium Arsenide and Copper Indium Gallium Diselenide*. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 23(1), 3-13.

Heraeus (n.d.). *Space Innovations*. [https://www.heraeus.com/en/landingspages/lp_group/apollo_11/the_reflector/space_ideas/space_ideas.html#:~:text=Magnetic%20resonance%20imaging%20\(MRI\),-One%20of%20the&text=The%20algorithms%20used%20to%20create,taken%20by%20probes%20and%20satellites](https://www.heraeus.com/en/landingspages/lp_group/apollo_11/the_reflector/space_ideas/space_ideas.html#:~:text=Magnetic%20resonance%20imaging%20(MRI),-One%20of%20the&text=The%20algorithms%20used%20to%20create,taken%20by%20probes%20and%20satellites)

Hexagon (n.d.) *Additive Manufacturing Technology*. <https://www.simufact.com/additive-manufacturing.html>

International Space Exploration Coordination Group (ISECG) (2021). *ISRU gap assessment report*. <https://www.globalspaceexploration.org/wordpress/wp-content/uploads/2021/04/ISECG-ISRU-Technology-Gap-Assessment-Report-Apr-2021.pdf>

ISED (Innovation, Sciences et Développement économique Canada) (2022). *Aérospatiale et défense au Canada*. <https://ised-isde.canada.ca/site/aerospace-defence/en/trade-and-exporting/aerospace-and-defence-canada>

Kane, M. K., Gil, S. (23 juin 2022). *Green Hydrogen: A key investment for the energy transition*. <https://blogs.worldbank.org/ppps/green-hydrogen-key-investment-energy-transition#:~:text=The%20demand%20for%20hydrogen%20reached,9.2%25%20per%20year%20through%202030>

Luxembourg Space Agency (Décembre 2018). *Opportunities for space resources utilizations: Future markets and value chains*. <https://space-agency.public.lu/dam-assets/publications/2018/Study-Summary-of-the-Space-Resources-Value-Chain-Study.pdf>

McCarthy, S. (23 novembre 2016). *Push to end poverty in indigenous communities underway*. <https://www.theglobeandmail.com/news/national/the-push-to-end-energy-poverty-in-indigenous-communities/article33012480/#:~:text=For%20remote%20indigenous%20communities%20across,diesel%20generators%20for%20their%20power.>

McKinsey & Company (6 janvier 2023). *Autonomous driving's future: Convenient and connected*. <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/autonomous-drivings-future-convenient-and-connected>

McKinsey & Company (28 janvier 2020). *Climate risk and decarbonization: What every mining CEO needs to know*. <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/climate-risk-and-decarbonization-what-every-mining-ceo-needs-to-know>

Mills, R. (6 novembre 2020). *Canada's warming Arctic – implications*. <https://www.mining.com/web/canadas-warming-arctic-implications/>

Mining Technology (26 octobre 2022). *Robotics – indispensable tools for the future of mining*. <https://www.mining-technology.com/comment/robotics-future-mining/#catfish>

Modern Diplomacy (30 juillet 2023). *China plans to drill the moon for minerals*. <https://moderndiplomacy.eu/2023/07/30/china-plans-to-drill-the-moon-for-minerals/>

NASA (n.d.). *Additive Manufacturing Center (AMC)*. <https://scienceandtechnology.jpl.nasa.gov/amc>

NASA (29 novembre 2022). *NASA, ICON Advance Lunar Construction Technology for Moon Missions*. <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-icon-advance-lunar-construction-technology-for-moon-missions>

Next Generation Manufacturing (2021). *Canada's Automation and Robotics Landscape*. <https://f.hubspotusercontent20.net/hubfs/5005023/Documents/TAP/Automation-and-robotics-NGen-Report.pdf>

N. Labeaga-Martínez, M. Sanjurjo-Rivo, J. Díaz-Álvarez, J. Martínez-Frías. *Additive manufacturing for a Moon village, Procedia Manufacturing*. Volume 13, Pages 794-801 (2017). ISSN 2351-9789, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.186>.

OCDE (2019). *The Space Economy in Figures. How Space Contributes to the Global Economy*. https://www.oecd-ilibrary.org/sites/c5996201-en/1/2/8/3/index.html?itemId=/content/publication/c5996201-en&_csp_=ffe5a6bb-c1382ae-4foead9dd2da73ff4&itemIGO=oecd&itemContentType=book

PWC (Septembre 2021). *Lunar market assessment: market trends and challenges in the development of a lunar economy*. <https://www.pwc.com.au/industry/space-industry/lunar-market-assessment-2021.pdf>

Reitz, B., Lotz, C., Gerdes, N. et al. *Additive Manufacturing Under Lunar Gravity and Microgravity*. *Microgravity Sci. Technol.* 33, 25 (2021). <https://doi.org/10.1007/s12217-021-09878-4>

Santamaria, G. (22 juillet 2021). *What is New Space?* <https://www.solar-mems.com/what-is-new-space/>

Spherical Insights LLP (6 avril 2023). *Global LiDAR Market Size to Surpass USD 4.83 Billion By 2030 | CAGR of 13.8%*. <https://www.globenewswire.com/en/news-release/2023/04/06/2642904/o/en/Global-LiDAR-Market-Size-To-Surpass-USD-4-83-Billion-By-2030-CAGR-of-13-8.html#:~:text=The%20Global%20LiDAR%20Market%20Size,published%20by%20Spherical%20Insights%20%26%20Consulting>.

Statistique Canada (2023). *Dépenses intérieures brutes en recherche et développement, pour 2020 (final), 2021 (préliminaire) et 2022 (intentions)*. https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=2710027301&request_locale=fr

Statistique Canada (2022). *Indicateurs des ressources naturelles, deuxième trimestre de 2022*. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/fr/daily-quotidien/220922/dq220922b-fra.pdf?st=XoHGwZFF>

TheFutureEconomy.ca (10 juin 2019). *Advanced Manufacturing: Leveraging tech to customize manufacturing*. <https://thefutureeconomy.ca/interviews/jayson-myers/>

Trudeau, J. (16 décembre 2021). *Lettre de mandat du ministre des Ressources naturelles*. <https://www.pm.gc.ca/fr/lettres-de-mandat/2021/12/16/lettre-de-mandat-du-ministre-des-ressources-naturelles>



Fabrication de prochaine génération Canada

175, chemin Longwood Sud, bureau 301
Hamilton, ON L8P 0A1

info@ngen.ca

ngen.ca



Société canadienne des mines spatiales

66, rue Wellington Ouest, bureau 5300
Tour TD Bank, C. P. 48
Toronto, ON M5K 1E6

get.involved@csmc-scms.ca

csmc-scms.ca