



Agence spatiale
canadienne

Canadian Space
Agency



Évaluation des Missions spatiales habitées et Utilisation de la Station spatiale internationale

Période d'avril 2013 à mars 2018

Projet n° 17/18-02-01

Préparé par la Direction Audit et évaluation

Décembre 2019

Table des matières

Liste des figures et des tableaux.....	iii
Acronymes utilisés dans le rapport.....	iv
Sommaire	v
1 Introduction	1
2 Description du programme.....	1
2.1 Contexte général du programme.....	1
2.2 Modèle logique du programme, activités réalisées, clientèles et partenaires.....	3
2.3 Ressources du programme	8
2.3.1 Ressources financières.....	8
2.3.2 Ressources humaines.....	8
2.3.3 Structure de gestion.....	9
3 Approche et méthodes d'évaluation	10
3.1 But et portée	10
3.2 Méthodes.....	11
3.2.1 Étude comparative et revue de littérature	11
3.2.2 Revue documentaire.....	11
3.2.3 Entrevues auprès d'informateurs clés	11
3.2.4 Études de cas	12
3.2.5 Données internes	12
3.3 Limites.....	13
4 Constats de l'évaluation	14
4.1 Pertinence.....	14
4.1.1 Dans quelle mesure le programme a répondu aux besoins?	14
4.1.2 Dans quelle mesure les objectifs du programme sont conformes aux priorités du gouvernement fédéral?.....	31
4.1.3 Quels sont les rôles et les responsabilités du gouvernement fédéral relativement à l'exécution du programme?	31
4.2 Résultats.....	32
4.2.1 Données sur le rendement	32
4.2.2 Dans quelle mesure les extrants attendus ont été réalisés?	34
4.2.3 Dans quelle mesure les résultats immédiats attendus ont été réalisés?	37
4.2.4 Dans quelle mesure les résultats intermédiaires attendus ont été réalisés?.....	37

4.2.5 Dans quelle mesure les résultats finaux attendus ont été réalisés?	39
4.2.6 La mise en œuvre du programme a-t-elle eu des répercussions imprévues négatives ou positives?	42
4.3 Efficience et économie.....	42
4.3.1 Effet levier des partenariats.....	43
4.3.2 Modèle de la SSI.....	46
4.3.3 Modèle de l'ASC.....	48
4.3.4 Existe-il des moyens plus rentables d'exécuter le programme actuel?	50
4.4 Quelles sont les répercussions du programme sur les groupes de l'ACS+?	51
5 Plan d'action	52

Liste des figures et des tableaux

Figure 1 : Modèle logique du programme	3
Figure 2 : Chronologie des recherches et instruments scientifiques de l'ASC.....	5
Figure 3 : Lien des activités de sensibilisation vers les résultats ultimes y étant reliés.....	29
Figure 4 : Domaines de recherches pour chacune des agences partenaires de la SSI	43
Tableau 1 : Ressources affectées au programme.....	8
Tableau 2 : Nombre d'équivalents temps plein prévus et réels par année (2013-2014 à 2017-2018).....	9
Tableau 3 : Questions de l'évaluation	10
Tableau 4 : Nombre d'entrevues et de répondants par catégories.....	12
Tableau 5 : Résumé des risques pour la santé et le rendement des astronautes.....	19
Tableau 6 : Recherches, instruments scientifiques et sous-systèmes spatiaux	34
Tableau 7 : Temps d'utilisation de la SSI	35
Tableau 8 : Résultats des indicateurs d'extrants liés aux astronautes	36
Tableau 9 : Atteinte des résultats immédiats ciblés.....	37
Tableau 10 : Les bénéfices de la SSI augmentent grâce à la collaboration internationale	44

Acronymes utilisés dans le rapport

ASC	Agence spatiale canadienne
ASE	Agence spatiale européenne
ACS+	Analyse comparative entre les sexes plus
AOP	Avis d'offre de participation
CRII	Comité de revue et d'intégration des investissements
CT	Conseil du Trésor du Canada
ETP	Équivalent à temps plein
EVA	Sorties extravéhiculaires
IGA	Intergovernmental Agreement
INO	Institut national d'optique
ISECG	International Space Exploration Coordination Group
ISLSWG	International Space Life Science Working Group
JAXA	Agence d'exploration aérospatiale japonaise
LEO	Low Earth Orbit
MCR	Moyenne des citations relatives
NASA	National Aeronautics and Space Administration
OBNL	Organisme à but non lucratif
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Économique
ONF	Office national du film du Canada
ONU	Organisation des Nations Unies
PE	Protocoles d'entente
PHQ	Personnes hautement qualifiées
R-D	Recherche et développement
SMR	Stratégie de mesure du rendement
SEM	Système d'entretien mobile
SP	Sous-programme
SSP	Sous-sous-programme
SSI	Station spatiale internationale
STIM	Sciences, technologies, ingénierie et mathématiques

Sommaire

Ce rapport présente les constats de l'évaluation du sous-programme 1.2.3. *Missions spatiales habitées et soutien connexe* ainsi que du sous-sous-programme 1.2.1.2. *Utilisation de la Station spatiale internationale* (ci-après nommés le « programme »), mis en œuvre par l'Agence spatiale canadienne (ASC) pour la période allant du 1^{er} avril 2013 au 31 mars 2018.

En 1985, le *Programme canadien de la Station spatiale* a débuté lorsque le premier ministre Brian Mulroney a accepté l'invitation du président des États-Unis Ronald Reagan à participer au programme multilatéral de développement et de construction de la Station spatiale internationale (SSI). Les partenaires initiaux étaient les États-Unis (leader), le Canada, l'Europe (représentée par l'Agence spatiale européenne (ASE)) et le Japon. Une entente intergouvernementale (« entente IGA » pour Intergovernmental Agreement¹) a été signée en 1988, puis mise à jour en incluant la Russie en 1998. L'assemblage en orbite a débuté en 1998 et s'est terminé en 2011. La contribution du Canada à la SSI a pris la forme d'un équipement d'infrastructure robotisé, le Système d'entretien mobile (SEM), pour lequel le Canada est notamment tenu d'appuyer son exploitation, de fournir la formation aux membres d'équipage pour l'opérer et payer sa part des coûts communs d'exploitation des systèmes. Depuis le début de la SSI jusqu'en 2017, le Canada a contribué à hauteur d'environ 2,2 milliards de \$ en frais de fonctionnement et en développement.

Au cours de la période d'évaluation, le programme a, entre autres, mené les activités suivantes :

- 10 recherches scientifiques distinctes étaient en développement ou ont été complétées au cours de la période d'évaluation;
- 10 instruments scientifiques distincts étaient en développement ou ont été complétés au cours de la période d'évaluation;
- La mission de l'astronaute Chris Hadfield a été réalisée du 19 décembre 2012 au 14 mai 2013;
- La campagne de recrutement des astronautes qui a eu lieu de juin 2016 à août 2017 a mené à l'embauche de deux astronautes, Jennifer Sidey et Joshua Kutryk.

Une variété d'activités de communication ont été réalisées; telles que des vidéos produites par Chris Hadfield pendant sa mission à bord de la SSI, des présentations d'astronautes et des participations à des événements tournés dans les écoles en lien avec des projets scientifiques, notamment créés par l'organisme *Parlons Science*, et visant à sensibiliser les jeunes à l'importance des STIM (sciences, technologie, ingénierie, mathématiques) dans leur vie.

¹ IGA (1998). *Agreement among the Government of Canada, Governments of Member States of the European Space Agency, the Government of Japan, the Government of the Russian Federation, and the Government of the United States of America concerning Cooperation on the Civil International Space Station*, janvier 1998], [https://aerospace.org/sites/default/files/policy_archives/Space%20Station%20Intergovernmental%20Agreement%20Jan98.pdf]

Au cours de la période évaluée, les dépenses du programme se sont élevées à 56 millions de dollars, principalement en soutien financier à des entités externes (54%) et en salaires (33%). Les autres dépenses (13%) ont été consacrées à la gestion continue du programme, incluant les frais de fonctionnement et d'entretien. Les ressources humaines affectées au programme étaient d'en moyenne 35 équivalents temps plein (ÉTP) par année, en hausse dans les deux dernières années de la période (2016-2017 et 2017-2018) en raison de la réaffectation de ressources à la mission de l'astronaute David Saint-Jacques, à la campagne de recrutement des astronautes, ainsi qu'à la mise à niveau de la capacité des programmes pour soutenir un accroissement des activités scientifiques à bord de la SSI prévues à partir de 2019.

L'évaluation couvre la pertinence, le rendement, l'efficacité et l'analyse comparative entre les sexes plus (ACS+) des Missions spatiales habitées et Utilisation de la SSI (sous-programme 1.2.3 et sous-sous-programme 1.2.1.2) et une variété de méthodes de collecte de données ont été utilisées : une étude comparative et une revue de littérature, une revue documentaire, 52 entrevues, quatre études de cas et une analyse des données internes. Les limites rencontrées lors de l'évaluation étaient les suivantes : 1) certaines données de rendement n'étaient pas disponibles; 2) la plupart des répondants en entrevue avaient un intérêt direct dans le programme et 3) il était trop tôt pour quantifier et évaluer les résultats de certains projets. L'évaluation a atténué ces limites en se servant de données secondaires, en ajoutant de l'information qualitative provenant des études de cas et en demandant aux répondants en entrevue de fournir des exemples pour étayer leur opinion.

Constats de l'évaluation

Dans l'ensemble, l'évaluation dresse un bilan positif en ce qui a trait à la pertinence du programme, à l'atteinte des résultats et à l'efficacité.

Pertinence

Le Canada a investi une somme de 2,2 milliards de \$ depuis le début de la SSI jusqu'en 2017 pour participer à sa construction et à son entretien. Ceci lui octroie le droit d'effectuer de la recherche scientifique à bord de la SSI à hauteur de 2,3% des ressources disponibles de la portion internationale (installations, temps d'équipage et services associés tels que le transport de l'équipement de recherche et du ravitaillement). Les Missions spatiales habitées et l'Utilisation de la SSI constituent le retour du Canada sur ses investissements dans le Système d'entretien mobile². Également, la revue documentaire démontre l'intérêt qu'accordent les Canadiens à l'importance d'investir dans l'exploration spatiale; un avis partagé tant par la population en général que par le secteur spatial canadien. Les cinq besoins spécifiques, identifiés dans la stratégie de mesure du rendement du programme, ont été jugés pertinents et sont d'ailleurs toujours alignés avec la nouvelle Stratégie spatiale canadienne lancée en mars 2019: 1) positionner le Canada à la fine pointe de la science et de la technologie; 2) recruter, entraîner et sécuriser les occasions

² Le Canada est également tenu de compenser la NASA pour 2,3% des coûts communs d'exploitation des systèmes de la SSI. Ces derniers représentent les coûts liés à l'exploitation de la SSI dans son ensemble.

de vol pour les astronautes; 3) identifier, comprendre, atténuer ou éliminer les risques pour la santé des astronautes; 4) concevoir, construire, lancer et exploiter le matériel spatial pour mener des expériences en science de la vie et soutenir la santé des astronautes et 5) créer de nouveaux emplois dans des domaines tels que l'ingénierie, la science, le secteur manufacturier et l'administration.

Depuis 2013, les besoins n'ont pas significativement changé, mais le contexte a évolué et le programme s'est adapté pour demeurer pertinent. Entre autres, le programme a décidé, en 2012, de concentrer son intervention sur certaines priorités de recherche dans le domaine de la santé et des sciences de la vie, domaines ayant le potentiel de résoudre les problèmes liés à la santé sur Terre. Du côté des astronautes, de nouveaux critères de sélection ont été utilisés lors de la dernière campagne de recrutement pour s'adapter à l'allongement de la durée des missions d'environ deux semaines à plus de six mois. Par exemple, considérant que les missions spatiales de longue durée sont devenues la norme, l'ASC a resserré les exigences liées à la santé physique, psychologique et sociale des candidats afin de soutenir le profil de ces missions. Également, l'ASC a recherché des individus qui étaient aptes à bien travailler en équipe pendant de longues périodes de temps dans un environnement confiné.

En plus des cinq besoins identifiés par le programme, l'évaluation n'a pas identifié d'autres besoins qui n'auraient pas été couverts par le programme, mais certains répondants en entrevue ont mentionné que la sensibilisation du public à l'égard des Missions spatiales habitées et de l'Utilisation de la SSI n'était pas clairement représentée dans ces cinq besoins alors que cela représente un élément clé du programme.

Le modèle de livraison est jugé adéquat et la nouvelle Stratégie spatiale permet de positionner le programme pour le futur. En ce qui a trait aux ressources humaines, des répondants ont mentionné en entrevue que certains postes étaient très spécialisés et uniques, présentant ainsi un risque de ne pas atteindre les résultats (perte d'expertise en cas de départ d'employés), mais que la petite taille de l'équipe permettait aussi d'être agile.

Par rapport aux priorités gouvernementales, les activités entreprises par le biais du programme cadrent avec la stratégie canadienne misant sur l'innovation comme levier de développement économique. Les missions d'exploration spatiale nécessitent le développement de nouvelles technologies de pointe, dont les applications rejoignent à la fois les besoins spatiaux et terrestres. Le recrutement de nouveaux astronautes et l'annonce en février 2019 de la participation canadienne au projet du « Gateway » lunaire illustrent l'engagement à long terme du Canada dans ce domaine.

En ce qui concerne la légitimité de l'ASC d'intervenir par le biais du programme, il est évident que l'ASC joue un rôle unique qui ne saurait être assumé par d'autres, que ce soit le secteur public, privé ou universitaire. Il n'existe aucun autre programme au Canada qui poursuit les mêmes objectifs et produit les mêmes résultats. Par sa loi constitutive, l'ASC est l'organisme fédéral ayant comme fonction de « collaborer avec les agences spatiales – ou les organismes œuvrant dans un domaine connexe – d'autres pays à l'exploitation et à l'usage pacifiques de l'espace ».

Résultats

Dans l'ensemble, les extrants et les résultats ciblés par le programme ont été atteints et surpassés. Les chercheurs et astronautes canadiens sont reconnus par la communauté internationale et suscitent l'intérêt de la population générale. L'allocation du Canada en termes de temps d'utilisation de la SSI est de 2,3%, ce qui représente environ 20 heures de temps d'équipage par incrément de six mois. Lorsque les partenaires n'arrivent pas à utiliser au complet leur propre allocation, les autres partenaires peuvent utiliser le temps restant. Ainsi, la cible d'utilisation de 100% du temps par année a été surpassée sauf en 2015-2016 où 87% du temps alloué a été utilisé. Selon un répondant en entrevue, l'ASC a pratiquement doublé cette allocation en collaborant avec des partenaires de la SSI pour certaines recherches (ex : en utilisant un même échantillon pour différentes recherches). Les partenaires internationaux ont également reconnu l'excellence des astronautes canadiens en les affectant à des fonctions critiques et des rôles de leadership pendant leur mission. Par exemple, Chris Hadfield a été commandant de la SSI pour les expéditions 34/35; tandis que Jeremy Hansen est actuellement responsable de la nouvelle classe d'astronautes à la NASA; et avant 2013 Dave Williams et Steve MacLean ont occupé d'importants postes de gestion à la NASA. En entrevue, les répondants, dont les partenaires de la SSI et les intervenants externes, considèrent que les astronautes canadiens sont hautement qualifiés et capables de bien performer sous pression.

Les chercheurs principaux travaillant aux projets de recherche qui reçoivent du financement de l'Agence ont employé du personnel hautement qualifié (PHQ) (en moyenne 58 par année) et des étudiants (en moyenne 13 par année) pour les aider dans leurs travaux, contribuant ainsi au développement d'une main-d'œuvre hautement spécialisée au Canada et ultimement à positionner le Canada à la fine pointe de la science et de la technologie. Chaque année, en moyenne cinq établissements universitaires canadiens (universités et hôpitaux universitaires) ont participé à un ou deux projets de recherche au cours de la période visée et en moyenne six entreprises canadiennes ont participé à un projet de recherche.

Certains projets ont donné lieu à des utilisations sur Terre et à des réutilisations dans l'espace. Par exemple, des recherches scientifiques financées par l'ASC, débutées en 1998, ont mené au développement de l'instrument OSTEO. Cet instrument a depuis participé à plusieurs missions de la navette spatiale, notamment avec la NASA en 2015 et l'ASE en 2018. Aussi, la compagnie Carré Technologies a lancé une version commerciale du biomoniteur nommée AstroSkin, soit une ligne de vêtements intelligents avancés pouvant être utilisés par des organisations à des fins de recherche en santé, en aérospatial, en sécurité, en défense et en pharmaceutique.

Au cours de la période d'évaluation, soit de 2013 à 2018, 47 publications revues par les pairs et issues du financement du programme ont été publiées. Ces publications ont été citées 254 fois dans d'autres articles scientifiques, soit en moyenne 5,4 fois chacune et 58% d'entre elles ont fait l'objet d'une collaboration internationale avec 10 pays, impliquant des co-auteurs provenant de 26 institutions d'enseignement et de recherche étrangères et quatre agences spatiales étrangères.

Les résultats démontrent une collaboration marquée tant du milieu universitaire canadien et étranger qu'avec l'industrie canadienne. Cette collaboration a des retombées positives sur le profil du Canada à l'étranger et permet l'avancement des connaissances concernant la capacité des humains à vivre dans l'espace. Également, certains projets donnant lieu à des réutilisations dans l'espace ou à des utilisations sur Terre contribuent à l'économie canadienne et à d'autres bénéfices sociaux. Enfin, l'évaluation n'a identifié aucune répercussion imprévue négative ou positive.

Efficiencia et économie

L'évaluation s'est concentrée sur les aspects qualitatifs de l'efficiencia étant donné l'absence de programme comparable et la nature variée des activités du programme. La coopération internationale requise pour des projets aussi importants et coûteux que la SSI permet au Canada de participer aux percées scientifiques et technologiques qui en découlent. De plus, le Canada a fait progresser l'industrie de haute technologie (dans les domaines de l'aérospatial et de la robotique) en s'impliquant dans la SSI. À l'échelle nationale, le programme a collaboré avec de nombreux partenaires, soit d'autres ministères et agences gouvernementales, l'industrie de la recherche et le milieu académique menant à des découvertes et de nouvelles façons novatrices de traiter les maladies, de créer de la technologie ou de découvrir de nouvelles avancées en sciences de la vie et de la santé.

Il a été mentionné en entrevue que les protocoles d'entente (PE) sous-jacents à l'entente IGA, de même que la gouvernance et les multiples comités et groupes de travail entre les partenaires, sont efficaces et bien rodés. L'examen documentaire et les entrevues réalisées dans le cadre de la présente évaluation ont toutefois fait ressortir deux facteurs qui contribueraient à améliorer l'efficiencia du programme à long terme : augmenter les opportunités de vols et avoir davantage de collaborations avec certains partenaires étrangers. Le Canada est le plus petit partenaire de la SSI³, ce qui ne l'empêche toutefois pas d'accomplir de très grandes réalisations. Également, le Canada fait bonne figure sur la scène internationale en ce qui a trait au domaine spatial; que ce soit pour son apport en science et en robotique, son efficacité, son efficacité ou encore pour la qualité de sa collaboration. Les ressources humaines œuvrant au programme sont jugées compétentes mais la petite taille de l'équipe œuvrant au programme est également un enjeu pour le développement des employés et leurs opportunités de carrière. En entrevue, certains ont indiqué que la mise en place d'un nouveau processus d'approbation au cours des dernières années avait créé une pression supplémentaire sur les ressources humaines. Les répondants en entrevue sont toutefois d'accord

³ Les partenaires initiaux sont les États-Unis (leader), le Canada, l'Europe (représentée par l'ASE) et le Japon. La Russie est partenaire de la SSI depuis 1998. Actuellement, la SSI est composée de deux sections : la section russe et la section dite « internationale » qui est sous la supervision des États-Unis. Au sein de cette dernière, l'allocation des partenaires représente 76,6% pour la NASA, 14,4% pour la JAXA, 8,3% pour l'ASE et 2,3% pour l'ASC. En contrepartie de sa contribution, le Canada a donc le droit d'utiliser 2,3% des installations de recherche de la SSI, il possède 2,3% du temps alloué à l'équipage en orbite pour exploiter ces installations, puis il est tenu de compenser la NASA pour 2,3% des coûts communs d'exploitation des systèmes de la SSI (ces derniers représentent les coûts liés à l'exploitation de la SSI dans son ensemble).

sur le bien-fondé du processus qui, plus exigeant qu'auparavant en termes de préparation, est tout de même plus rigoureux.

Répercussions du programme sur les groupes de l'ACS+

En mars 2017, l'ASC a adopté sa propre directive relative à l'ACS+, qui permet d'opérationnaliser cette exigence dans le cadre précis de l'agence. L'ASC a intégré directement des considérations liées à l'ACS+ dans sa campagne de recrutement des deux nouveaux astronautes de même que dans des études sur l'alitement et l'isolement faites en collaboration avec l'ASE. Par exemple, lors de la dernière campagne de recrutement ayant mené à l'embauche de Jennifer Sidey-Gibbons et de Joshua Kutryk, les activités suivantes ont été entreprises : une formation sur l'ACS+ suivie par les membres du comité de recrutement avant d'entreprendre leur mandat, une campagne qui ciblait directement les femmes et les minorités visibles de même que des efforts déployés pour engager les communautés nordiques et les autochtones.

Conclusion

L'évaluation a démontré que le programme est pertinent et qu'il atteint les résultats visés tout en étant efficient. Il permet au Canada de continuer à jouer un rôle clé dans les missions spatiales habitées et également dans la recherche en santé et sciences de la vie dans l'espace.

Les besoins identifiés à l'origine du programme sont toujours présents et d'actualité. Le modèle de partenariat de la SSI offre au Canada de bénéficier de l'utilisation d'un laboratoire de recherche unique dans l'espace et des opportunités scientifiques et technologiques qui en résultent, en plus d'engendrer des retombées significatives sur Terre pour l'ensemble de la population canadienne. Les résultats immédiats du programme ont non seulement été atteints, mais dans le cas du PHQ et des étudiants, les cibles établies ont été largement surpassées. Pour leur part, les résultats intermédiaires ont été majoritairement surpassés et les résultats finaux démontrent que le programme atteint les résultats escomptés, surtout en ce qui a trait à la qualité de la science et à la promotion du Canada sur le plan international. Enfin, le modèle de livraison est considéré efficace et efficient malgré la petite taille de l'ASC. Le personnel affecté au programme, incluant les astronautes, est jugé compétent et bénéficie d'une bonne réputation nationale et internationale. De plus, le rapport souligne l'important effet levier des partenariats entre l'ASC et les autres agences spatiales membres de la SSI qui coordonnent leurs efforts en matière de recherche.

Pour ces raisons, le rapport ne contient aucune recommandation et aucun plan d'action de la direction n'est requis.

1 Introduction

Ce rapport présente les constats de l'évaluation du sous-programme 1.2.3. *Missions spatiales habitées et soutien connexe* ainsi que du sous-sous-programme 1.2.1.2. *Utilisation de la Station spatiale internationale* (ci-après nommés le « programme »), mis en œuvre par l'Agence spatiale canadienne (ASC). Il s'agit de la première évaluation de ce programme et elle a été menée par la Direction Audit et évaluation de l'ASC, de juin 2018 à septembre 2019.

L'évaluation couvre une période de cinq ans, du 1^{er} avril 2013 au 31 mars 2018 et traite des enjeux de pertinence, d'efficacité et d'efficience des sous-sous-programmes suivants⁴ qui se rapportent au programme d'Exploration spatiale : 1.2.3.1. *Entraînement et missions d'astronautes*, 1.2.3.2. *Médecine spatiale opérationnelle*, 1.2.3.3. *Santé et sciences de la vie*, et 1.2.1.1. *Utilisation de la Station spatiale internationale*. Les deux derniers sous-sous-programmes contribuent au programme global de subventions et contributions à l'appui de la recherche, de la sensibilisation et de l'éducation en sciences et technologies spatiales. En plus des sous-programmes évalués, le programme global d'Exploration spatiale comprend le sous-sous-programme 1.2.1.1. *Opération d'assemblage et d'entretien de la Station spatiale internationale* (SSI) qui a fait l'objet d'une évaluation en 2016⁵.

Cette évaluation est incluse dans le plan d'évaluation quinquennal de l'ASC et elle a été menée conformément à la *Politique sur les résultats* (2016) du Conseil du Trésor du Canada (anciennement *Politique sur l'évaluation* (2009))⁶.

2 Description du programme

Cette section du rapport comprend une description du programme et du contexte général dans lequel il est mis en œuvre. Les composantes clés du programme y sont abordées, c'est-à-dire le modèle logique, les principaux intervenants et partenaires, la structure de gouvernance et les ressources humaines et financières.

2.1 Contexte général du programme

En 1974, la NASA a sollicité l'expertise canadienne pour la mise au point d'un bras robotisé : le Canadarm. Cette invitation a marqué le début d'une étroite collaboration entre le Canada et les États-Unis dans le domaine des vols spatiaux habités. Par la suite, la NASA a invité un astronaute canadien à participer à une mission dans l'espace, ce qui a donné naissance au premier corps d'astronautes

⁴ Depuis le 1^{er} avril 2018, ces sous-programmes ont été remplacés par le Programme d'exploration spatiale.

⁵ ASC (2016). *Évaluation du Programme d'opérations d'assemblage et d'entretien de la Station spatiale internationale de l'Agence spatiale canadienne – mars 2008 à 2015*, février 2016, p. 15, [<http://asc-csa.gc.ca/fra/publications/re-1415-0201.asp>].

⁶ La *Politique sur les résultats* et la *Politique sur l'évaluation* définissent toutes deux les enjeux d'évaluation à considérer dans l'évaluation des programmes, soit la pertinence, l'efficacité et l'efficience.

canadiens en 1983. Puis, en 1985, le *Programme canadien de la Station spatiale* a débuté lorsque le premier ministre Brian Mulroney a accepté l'invitation du président des États-Unis Ronald Reagan à participer au programme multilatéral de développement et de construction de la SSI.

Les partenaires initiaux étaient les États-Unis (leader), le Canada, l'Europe (représentée par l'Agence spatiale européenne (ASE) et le Japon. Une entente intergouvernementale (« entente IGA » pour *Intergovernmental Agreement*⁷) a été signée en 1988, puis mise à jour en incluant la Russie en 1998. L'assemblage en orbite a débuté en 1998 et s'est terminé en 2011. La SSI est occupée en permanence depuis 2000 et peut accueillir des équipages entre trois à six personnes (six personnes depuis 2009). En septembre 2019, 239 personnes provenant de 9 pays avaient visité la SSI. La SSI représente l'effort combiné de cinq agences spatiales représentant 15 pays et demeure la plus grande structure faite par l'être humain mise en orbite autour de la Terre. La SSI est un laboratoire de recherche qui gravite autour de la Terre à une altitude de 400 kilomètres à 28 000 km/heure. La participation à la mission de la SSI confère des avantages au Canada, notamment : le développement des capacités industrielles; l'avancement des connaissances; le renforcement des partenariats internationaux; une meilleure compréhension de la santé humaine; la consolidation de la fierté nationale; et l'incitation des Canadiens à faire carrière dans le secteur des sciences, technologie, ingénierie et mathématiques (STIM). En plus de l'entente IGA, la NASA a également signé des protocoles d'entente⁸ avec chacune des agences spatiales. La Russie, le Japon et les États-Unis opèrent des vaisseaux spatiaux assurant le transport des cargos à la SSI. Le transport des équipages a été assuré par le programme des navettes spatiales de la NASA (*Space Shuttle program*) jusqu'en 2011. Depuis, la seule option de transport des astronautes est le vaisseau russe Soyouz.

La contribution du Canada à la SSI a pris la forme d'un équipement d'infrastructure robotique : le Système d'entretien mobile (SEM). Les principales composantes du SEM sont : le télémanipulateur de la station spatiale (le bras robotisé Canadarm2 lancé en 2001); la base mobile transportant les robots canadiens et les composantes de la SSI le long de la poutrelle principale de la station (lancée en 2002); et le manipulateur agile spécialisé (Dextre, lancé en 2008). Conformément à l'entente IGA, le Canada est notamment tenu d'appuyer l'exploitation du SEM, de fournir la formation aux membres d'équipage pour l'opérer et payer sa part des coûts communs d'exploitation des systèmes. Depuis le début de la SSI jusqu'en 2017, le Canada a dépensé environ 2,2 milliards de \$ en frais de fonctionnement et en développement. En contrepartie de sa contribution, le Canada a le droit d'utiliser 2,3% des installations de recherche de la station et 2,3% du temps alloué à l'équipage en orbite pour exploiter ces installations

⁷ IGA (1998). *Agreement among the Government of Canada, Governments of Member States of the European Space Agency, the Government of Japan, the Government of the Russian Federation, and the Government of the United States of America concerning Cooperation on the Civil International Space Station*, janvier 1998, [https://aerospace.org/sites/default/files/policy_archives/Space%20Station%20Intergovernmental%20Agreement%20Jan98.pdf]

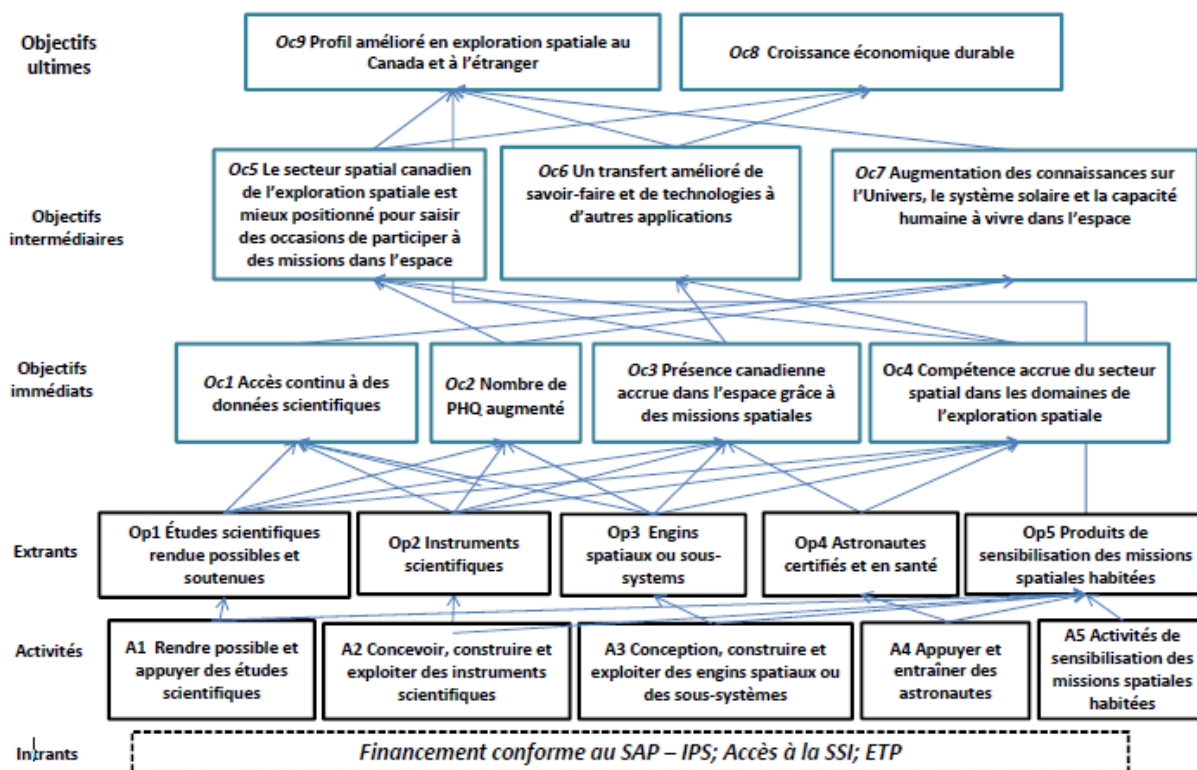
⁸ ASC et NASA (1998). *Memorandum of Understanding between NASA and CSA concerning cooperation on the ISS*, janvier 1998, [https://www.nasa.gov/mission_pages/station/structure/elements/nasa_csa.html]

(calculé sur la portion internationale de la SSI). Selon l'entente IGA, le Canada accumule des crédits de temps dans l'espace pour les vols des astronautes canadiens. Le Canada a donc mis en place un programme pour sélectionner ses astronautes et assurer leur suivi médical et les préparer aux vols vers la station auxquels a droit le Canada. Il participe aussi à la gestion globale du programme de la SSI et dispose d'un droit de vote à part égale avec les cinq partenaires de la SSI.

2.2 Modèle logique du programme, activités réalisées, clientèles et partenaires

Le modèle logique, décrit dans la stratégie de mesure du rendement du programme⁹, présente les liens entre les différents éléments du programme, allant des intrants et activités jusqu'aux résultats finaux.

Figure 1. Modèle logique des sous-programmes Missions spatiales habitées et soutien connexe (1.2.3.1; 1.2.3.2; 1.2.3.3) et Utilisation de la Station spatiale internationale (1.2.1.2)



Généralement, le cycle de vie des initiatives de recherche et du développement d'instruments scientifiques comprend plusieurs phases, y compris les études préalables, la définition, la mise en œuvre

⁹ CSA (2017). *Performance Measurement Strategy for Human Space Missions and Support and International Space Station* (PM Strategy), p. 18. PM Strategy est traduit par "SMR" en français dans le rapport, soit stratégie de mesure du rendement.

et les opérations. Puisque certaines recherches se déroulent sur une période prolongée (le cycle de vie est généralement d'environ cinq à sept ans), les travaux effectués dans le cadre du programme peuvent être liés à des projets débutés depuis longtemps. L'entraînement et le soutien aux astronautes est assuré par les spécialistes de programme et également par le biais d'ententes et de contrats auprès des partenaires et d'entreprises privées et les missions d'astronautes sont planifiées et négociées selon les paramètres de l'entente IGA¹⁰.

Plus particulièrement, le programme mène les types d'activités suivantes :

- Soutien financier : le programme donne un soutien financier à des partenaires et intervenants externes. Pour les recherches scientifiques, la plupart du temps, des avis d'offre de participation (AOP) sont menés et des subventions ou contributions sont octroyées à des chercheurs et des contrats sont conclus suite à des demandes de propositions (DP) auprès d'entreprises ou d'organismes. Pour la conception et la construction d'instruments scientifiques et de véhicules spatiaux et sous-systèmes, des contrats sont émis de même que des subventions et des contributions. Des protocoles d'entente sont également conclus avec d'autres entités gouvernementales canadiennes et internationales pour différents services, par exemple la formation des astronautes à la NASA.
- Soutien des gestionnaires et des spécialistes du programme : le personnel affecté au programme contribue à la mise en œuvre générale des opérations (planification, gestion des subventions, contributions, contrats et protocoles d'entente, administration générale), participe avec les partenaires de la SSI à plusieurs instances multilatérales (conseils, comités et groupes de travail scientifiques et opérationnels) et collabore également avec des intervenants externes tels que des ministères et organismes fédéraux, des partenaires internationaux (autres agences spatiales ou nations en plus des partenaires de la SSI), la communauté scientifique canadienne et internationale, des universités et des associations.

Au cours de la période d'évaluation, le programme a, entre autres, mené les activités suivantes :

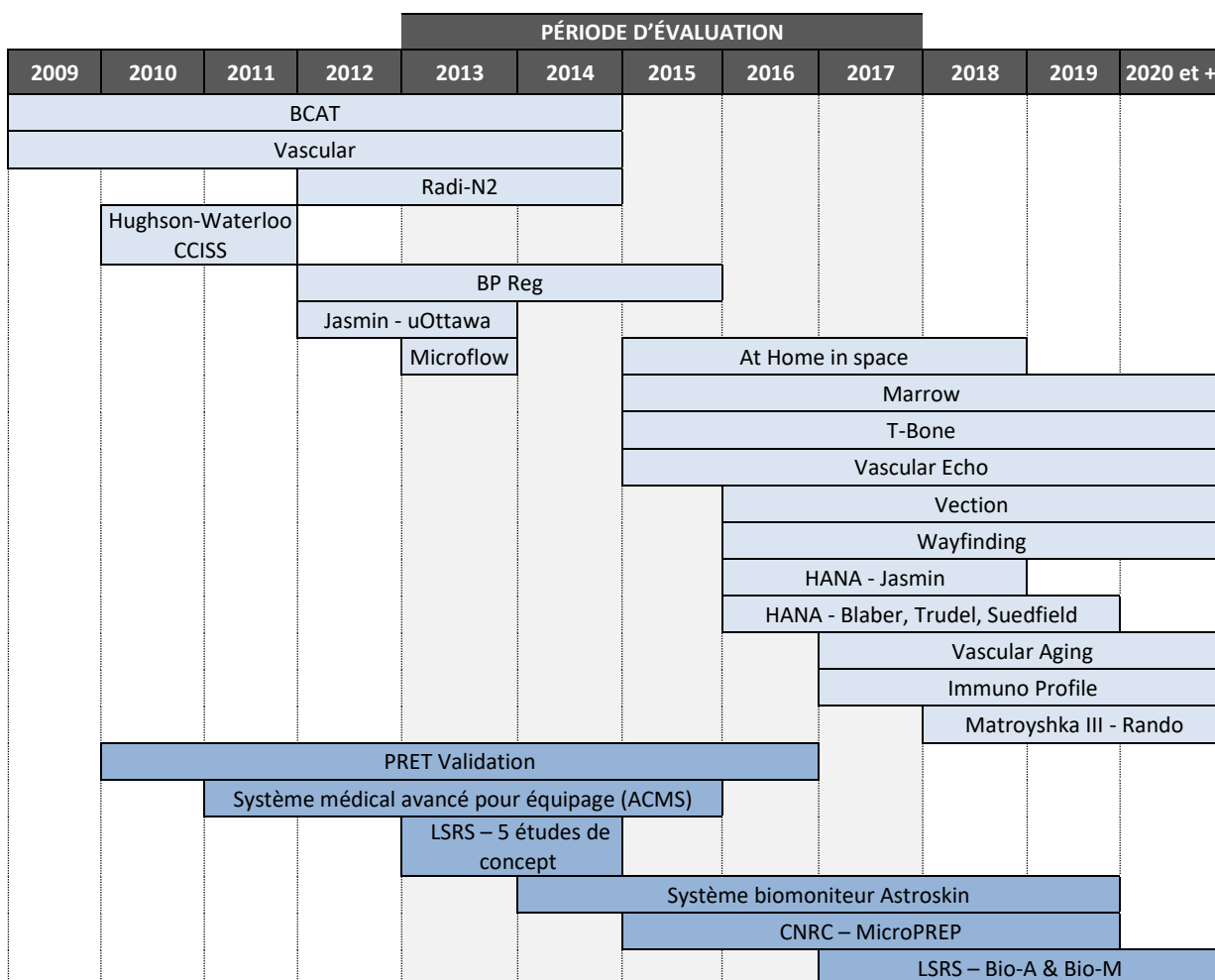
- 10 recherches scientifiques distinctes étaient en développement ou ont été complétées au cours de la période d'évaluation tel qu'illustré dans le Tableau 6 (section 4.2 Extrants). Le détail de ces recherches figure à l'Annexe A;
- 10 instruments scientifiques distincts étaient en développement ou ont été complétés au cours de la période d'évaluation tel qu'illustré dans le Tableau 6 (section 4.2 Extrants). Le détail de ces recherches figure à l'Annexe A;
- La mission de l'astronaute Chris Hadfield a été réalisée du 19 décembre 2012 au 14 mai 2013;
- La campagne de recrutement des astronautes qui a eu lieu de juin 2016 à août 2017 a mené à l'embauche de deux astronautes, Jennifer Sidey et Joshua Kutryk;

¹⁰ IGA (1998). *Op. cit.*

- Une variété d'activités de communication ont été réalisées; telles que des vidéos produites par Chris Hadfield pendant sa mission dans la SSI, des présentations d'astronautes et des participations du programme à des événements tels que des tournées dans les écoles en lien avec des projets scientifiques, par exemple un défi organisé par l'organisme *Parlons science* visant à sensibiliser les jeunes à l'importance des sciences, de la technologie, de l'ingénierie et des mathématiques (STIM) dans leur vie.

Dans la figure 2 ci-dessous, il est possible de voir l'envergure des projets de recherche scientifique et des instruments développés par le programme. Le détail de chacun de ces projets est présenté à l'Annexe A.

FIGURE 2. CHRONOLOGIE DES RECHERCHES ET INSTRUMENTS SCIENTIFIQUES EN DÉVELOPPEMENT ET EN OPÉRATION DE L'ASC



□ : Recherches scientifiques
 ■ : Instruments scientifiques

Afin d'illustrer les résultats, quatre études de cas ont été effectuées dans le cadre de l'évaluation et sont présentées dans l'encadré suivant.

Quatre études de cas

Microflow et le bioanalyseur (Bio-A)

Développé par l'Institut national d'optique (INO) et par la suite commercialisé, Microflow a été le premier outil servant à l'analyse d'échantillons biologiques à bord de la SSI. L'expérience a été testée avec succès lors de la dernière mission de Chris Hadfield et la technologie développée a permis de générer de nouvelles idées qui pourraient éventuellement permettre aux communautés de médecine opérationnelles dans l'espace ou sur Terre de fournir des capacités d'analyse d'échantillons in situ. L'instrument Bio-A est également un système permettant l'analyse d'échantillons biologiques (sang, urine, salive) à partir de l'espace, éliminant le besoin de congeler les échantillons et de les transférer sur Terre pour analyse. Au moment de l'évaluation, il est envisagé que cet instrument permettra d'accélérer les expériences scientifiques réalisées à bord de la SSI et pourrait servir à la médecine opérationnelle sur Terre et dans la SSI. Les entreprises travaillant sur ce projet prévoient d'ailleurs commercialiser cette technologie permettant, par exemple, de générer des résultats de tests sanguins en moins de cinq minutes.

Études relatives au système cardiovasculaire

Depuis 2007, six études portant sur le système cardiovasculaire ont été réalisées, dont certaines étaient toujours en cours au moment de l'évaluation. Les différentes expériences portaient sur les effets de vols spatiaux sur la santé des astronautes. Ces recherches ont des applications sur Terre, particulièrement en ce qui a trait au vieillissement et au mode de vie sédentaire. Des études sur le système cardiovasculaire ont également été menées au cours d'études sur l'alitement pour combler le manque d'information sur les effets physiologiques des missions à long terme dans l'espace. Des chercheurs d'universités canadiennes dirigent ces études sur la SSI ou au sol en collaboration avec plusieurs partenaires internationaux.

Chris Hadfield et les expéditions 34 et 35

Du 19 décembre 2012 au 14 mai 2013, l'astronaute canadien Chris Hadfield a participé à sa troisième mission dans l'espace lors de laquelle il est devenu le premier Canadien à prendre en charge le commandement de la SSI. Durant sa mission, il a entre autres mené des expériences scientifiques et testé de nouvelles technologies. Sa mission a suscité l'intérêt des Canadiens et du monde entier grâce à une vaste campagne de rayonnement.

La dernière campagne de recrutement des astronautes

En 2016-2017, l'ASC a recruté deux astronautes, Jennifer Sidey et Joshua Kutryk, lors d'une vaste campagne de recrutement visant à augmenter le nombre d'astronautes canadiens qui était de deux astronautes actifs. Le processus de sélection a mobilisé plusieurs ressources à l'ASC et des collaborations avec d'autres ministères (ex : la Défense nationale a contribué aux tests physiques) et s'est déroulé avec un échéancier serré. Les considérations relatives à la représentativité des groupes minoritaires ont été intégrées à chacune des étapes et le processus de sélection a été cité en exemple et décrit par les partenaires comme ayant été rigoureux.

Les partenaires et les populations cibles

Les partenaires des Missions spatiales habitées et Utilisation de la SSI sont :

- Les agences spatiales partenaires de la SSI : la NASA, principal partenaire qui joue un rôle prépondérant dans la SSI, est responsable de l'ensemble de la gestion de la SSI et de l'intégration des activités et de l'équipement dans la section internationale de la SSI. Elle est également responsable du transport de l'équipement de recherche canadien et du ravitaillement. Les agences spatiales des autres partenaires de la SSI sont la Russie représentée par Roscosmos, le Japon représenté par l'Agence d'exploration aérospatiale japonaise (JAXA) et l'Europe représenté par l'ASE. Le Canada est représenté par l'ASC.
- Les institutions universitaires : la communauté scientifique (scientifiques, médecins et ingénieurs dans les universités et les centres de recherche et les hôpitaux au Canada) développant et/ou utilisant les instruments dans des laboratoires spatiaux ou les expériences dans les laboratoires sur Terre portant sur les risques pour la santé humaine associés aux missions spatiales habitées.
- Les entreprises privées : les groupes de travail menés par l'industrie, les associations représentant l'industrie et les entreprises impliquées dans le développement, la construction et l'exploitation des instruments et des logiciels.
- Les autres ministères et organismes fédéraux qui collaborent à l'atteinte d'objectifs horizontaux et qui sont consultés aux différentes étapes des projets; soit la planification et la mise en œuvre.

Les partenaires de la SSI collaborent largement aux expériences scientifiques, au développement d'instruments et à la documentation des résultats, entre autres par le biais de publications scientifiques.

Les populations cibles¹¹ sont :

- Les institutions universitaires et les centres de recherche impliqués dans la recherche et le développement des sciences et technologies reliées à l'espace;
- Les entreprises privées et organismes à but non lucratif : petites, moyennes et grandes entreprises, incluant les organismes à but non lucratif impliqués dans le développement des sciences et technologies liées à l'exploration spatiale;
- Les citoyens canadiens : les jeunes et la population générale.

¹¹ Les populations cibles comprennent « les groupes que le programme compte influencer et qui sont censés profiter du programme », *Guide d'évaluation des stratégies de mesure du rendement*, [<https://www.canada.ca/fr/secretariat-conseil-tresor/services/verifications-evaluations/centre-excellence-en-evaluation/guide-elaboration-strategies-mesure-rendement.html#App3>]

2.3 Ressources du programme

Pendant les cinq années couvertes par l'évaluation, l'ASC a investi un total de 56,1 millions \$ dans le programme.

2.3.1 Ressources financières

Les données du tableau 1 démontrent que la majorité de ces ressources (87 %) ont été orientées vers du soutien financier à des entités externes (54%) (soit 43% en contrats, 6% en protocoles d'entente et 5% en subventions et contributions) et en salaires (33%). Les autres dépenses qui restent étaient consacrées à la gestion continue du programme par le biais de frais de fonctionnement et d'entretien.

TABEAU 1 : SOMMAIRE DES RESSOURCES FINANCIÈRES AFFECTÉES AU PROGRAMME

SOUS-SOUS-PROGRAMMES		2013-2014	2014-2015	2015-2016	2016-2017	2017-2018	TOTAL
Utilisation de la SSI 1.2.1.2	Contrats	2,080,197\$	1,875,835\$	1,639,787\$	6,935,303\$	8,463,804\$	32 275 220\$
	Subventions & contributions	323,000\$	271,331\$		72,368\$	274,796\$	
	Protocoles d'entente	168,180\$	100\$	9,660\$	1,550\$	4,600\$	
	Salaires	1,633,478\$	1,627,316\$	1,462,708\$	1,402,501\$	2,336,038\$	
	Fonctionnement et entretien	807,086\$	433,619\$	144,183\$	121,178\$	186,653\$	
Entraînement et missions d'astronautes 1.2.3.1	Contrats	244,143\$	133,050\$	181,251\$	429,231\$	768,347\$	14 720 080\$
	Subventions & contributions					120,000\$	
	Protocoles d'entente	100,659\$	74,131\$	153,108\$	87,001\$	375,458\$	
	Salaires	1,231,158\$	978,705\$	783,519\$	2,002,184\$	2,301,788\$	
	Fonctionnement et entretien	843,586\$	746,563\$	937,276\$	855,552\$	* 1,373,369\$	
Médecine spatiale opérationnelle 1.2.3.2	Contrats	196,199\$	154,150\$	239,625\$	248,268\$	213,849\$	3 686 450\$
	Subventions & contributions						
	Protocoles d'entente	4,925\$	85,250\$	94,229\$	82,114\$	79,996\$	
	Salaires	262,961\$	432,501\$	505,278\$	211,059\$	373,529\$	
	Fonctionnement et entretien	105,695\$	72,068\$	100,650\$	54,852\$	169,252\$	
Santé et sciences de la vie 1.2.3.3	Contrats	62,786\$	66,170\$	1,000\$	346,915\$	10,800\$	5 402 926\$
	Subventions & contributions		37,000\$	497,034\$	497,000\$	498,001\$	
	Protocoles d'entente	203,435\$	341,838\$	400,225\$	330,000\$		
	Salaires	286,410\$	348,416\$	495,178\$	733,740\$	7,255\$	
	Fonctionnement et entretien	39,493\$	38,645\$	32,765\$	81,297\$	50,521\$	
TOTAL		8 590 390\$	7 716 690\$	7 677 475\$	14 492 064\$	17 608 056\$	56 084 675\$

Source : Données financières de l'ASC.

* Note: Les frais de fonctionnement et d'entretien incluent également des dépenses liées à des projets spéciaux comme la campagne de recrutement des astronautes et la mission de David Saint-Jacques. Il s'agit de dépenses telles que des frais de voyages et de formation des astronautes et des activités et du matériel de communications.

2.3.2 Ressources humaines

Le personnel de l'ASC affecté au programme comprend notamment des gestionnaires de projets, des spécialistes (dont un médecin-chef et un médecin de vol), des scientifiques et des agents de soutien administratif. D'autres spécialistes de l'ASC donnent aussi leur appui à des projets particuliers (soutien matriciel).

Pour ce qui est des ressources humaines, en moyenne 35 équivalents à temps plein (ETP) étaient affectés annuellement au programme. Deux éléments ressortent en ce qui a trait aux ressources

humaines (voir tableau 2); tout d’abord, un petit nombre de ressources est affecté à deux sous-sous-programmes (1.2.3.2. *Médecine spatiale opérationnelle* et 1.2.3.3. *Santé et sciences de la vie*), soit en moyenne 3-4 ETP et un écart à la hausse est à noter pour le sous-sous-programme 1.2.3.1. *Entraînement et missions d’astronautes* pour les deux dernières années (2016-2017 et 2017-2018).

Pour ce qui est de l’écart à la hausse pour les années 2016-2017 et 2017-2018, l’écart entre les ETP réels et prévus du programme d’exploration spatiale pour ces années est principalement attribuable à la réaffectation des ressources à la mission de l’astronaute David Saint-Jacques et à la campagne de recrutement d’astronautes, ainsi qu’aux nouveaux postes résultant des fonds supplémentaires pour soutenir les activités de la SSI jusqu’en 2024-2025¹².

TABEAU 2. NOMBRE D’ÉQUIVALENTS TEMPS PLEIN, PRÉVUS ET RÉELS PAR ANNÉE (2013-2014 À 2017-2018)

	2013-2014		2014-2015		2015-2016		2016-2017		2017-2018	
SOUS-SOUS-PROGRAMMES	ÉTP		ÉTP		ÉTP		ÉTP		ÉTP	
	Prévu	Réel	Prévu	Réel	Prévu	Réel	Prévu	Réel	Prévu	Réel
1.2.3.1 Entraînement et missions d’astronautes	10,3	11,4	9,5	9,4	8,1	7,0	7,0	18,0	16,2	24,0
1.2.3.2 Médecine spatiale opérationnelle	5,1	2,2	1,3	3,1	2,9	3,6	3,5	2,0	1,2	3,0
1.2.3.3 Santé et sciences de la vie	4,1	2,7	2,8	3,0	2,7	4,2	3,5	8,0	0,0	1,0
1.2.1.2 Utilisation de la SSI	15,0	14,1	15,6	13,5	18,1	13,0	16,6	12,0	14,2	19,0
TOTAL	34,5	30,4	29,2	29,0	31,8	27,7	30,6	40,0	31,6	46,6

Source : Données financières provenant des rapports annuels sur le rendement de l’ASC de 2013 à 2018.

2.3.3 Structure de gestion

Le Directeur général de l’exploration spatiale assume la responsabilité globale des activités menées dans le cadre du programme. Ce faisant, il agit en respectant l’ensemble des politiques applicables du Secrétariat du Conseil du Trésor du Canada, ainsi que la *Politique sur la gestion de projet* et la *Directive sur le Cadre de surveillance et de gouvernance intégrées* adoptées par l’ASC.

Le Directeur général du programme préside le Comité de gestion de l’exploration spatiale afin d’appuyer la coordination continue des activités, des projets, des finances et des ressources humaines du programme.

¹² ASC. *Rapport Ministériel sur le Rendement 2016-2017*.

3 Approche et méthodes d'évaluation

Cette section du rapport présente une description de la méthodologie utilisée pour effectuer l'évaluation des Missions spatiales habitées et l'Utilisation de la SSI. Elle vise à préciser le but et la portée de l'évaluation, à décrire les principales questions d'évaluation qui y sont abordées ainsi que les méthodes utilisées pour recueillir les conclusions de l'évaluation. En outre, elle détermine les limites auxquelles l'évaluation a fait face, de même que les stratégies utilisées pour les atténuer.

3.1 But et portée

Le présent rapport répond à l'engagement énoncé dans le Plan d'évaluation ministériel (2017-2018 à 2021-2022) de l'ASC visant la réalisation d'une évaluation des Missions spatiales habitées et Utilisation de la SSI. Il couvre une période de cinq ans, de 2013-2014 à 2017-2018, sauf pour certaines études de cas dont la portée précède la période d'évaluation étant donné que certaines activités avaient débuté avant le 1^{er} avril 2013.

L'évaluation couvre la pertinence, le rendement, l'efficacité et l'analyse comparative entre les sexes plus (ACS+) des Missions spatiales habitées et Utilisation de la SSI. Plus précisément, elle répond aux 11 questions d'évaluation ci-dessous :

TABLEAU 3. QUESTIONS DE L'ÉVALUATION DES MISSIONS SPATIALES HABITÉES ET UTILISATION DE LA SSI

Pertinence	1. Dans quelle mesure le programme a répondu aux besoins? 2. Dans quelle mesure les objectifs du programme sont-ils conformes aux priorités du gouvernement fédéral? 3. Quels sont les rôles et responsabilités du gouvernement fédéral relativement à l'exécution du programme?
Rendement	4. Dans quelle mesure les extrants attendus ont été réalisés? 5. Dans quelle mesure les résultats immédiats attendus ont été réalisés? 6. Dans quelle mesure les résultats intermédiaires attendus du programme ont été atteints? 7. Dans quelle mesure les résultats finaux attendus du programme ont été atteints? 8. La mise en œuvre du programme a-t-elle eu des répercussions imprévues négatives ou positives?
Efficacité	9. Existe-t-il des moyens plus rentables d'exécuter le programme actuel? 10. Y a-t-il eu des problèmes et facteurs facilitants aux différentes étapes du cycle de vie du programme?
ACS+	11. Quelles sont les répercussions du programme sur les groupes de l'ACS+?

3.2 Méthodes

Les données d'évaluation ont été recueillies à l'aide d'un certain nombre de méthodes de recherche qui sont décrites brièvement dans cette sous-section.

3.2.1 Étude comparative et revue de littérature

L'évaluation du programme repose entre autres sur une étude comparative et une revue de la littérature qui s'appuient sur des documents internes de l'ASC, ainsi que sur des rapports publics et des publications académiques nationales et internationales. Ces méthodes visaient à évaluer la collaboration entre les partenaires et la manière dont la SSI a été utilisée jusqu'à ce jour afin d'approfondir les connaissances relatives à la médecine spatiale et en sciences de la vie, ainsi que d'investiguer sur les alternatives qui s'offrent à la SSI pour mener de telles recherches. De plus, l'étude comparative et la revue de littérature comprenaient également les missions au-delà de l'orbite basse et visaient à analyser le rôle que l'ASC ou l'industrie canadienne pourraient jouer dans de telles missions dans le domaine de la médecine spatiale et des sciences de la vie. Enfin, l'étude comparative visait également à en apprendre davantage sur les différentes manières dont les astronautes des pays membres de la SSI s'engagent dans des activités de sensibilisation du public.

3.2.2 Revue documentaire

La revue documentaire est variée et porte notamment sur la pertinence du programme. Elle comprend divers documents stratégiques, rapports de groupes d'experts, données, évaluations et déclarations du gouvernement du Canada. Elle comprend aussi l'information fournie par l'ASC en ce qui a trait aux Missions spatiales habitées et à l'Utilisation de la SSI, ainsi que des documents identifiés ou fournis par d'autres intervenants, notamment dans le cadre des entrevues effectuées pour les besoins de la présente évaluation. L'évaluation s'appuie également sur les autres évaluations qui ont été effectuées au cours des dernières années et qui traitent de sujets communs aux Missions spatiales habitées et Utilisation de la SSI (p. ex. Évaluation du Programme d'opération d'assemblage et d'entretien de la SSI). De plus, l'examen documentaire a couvert des activités entreprises par d'autres pays dans des activités et des missions scientifiques auxquelles le Canada a participé. Enfin, plusieurs études provenant d'organisations externes ont été étudiées dont l'évaluation de la NASA de 2018, *NASA's Management and Utilization of the International Space Station*, un article de 2016 de l'OCDE, *New Trends in Space Innovation* et un autre sur les risques sur la santé humaine de 2017 de la NASA, *Human Health and Performance due to in-Flight Medical Conditions*.

3.2.3 Entrevues auprès d'informateurs clés

Les entrevues menées auprès des informateurs clés ont contribué à acquérir une compréhension approfondie des activités des Missions spatiales habitées et de l'Utilisation de la SSI, y compris les résultats obtenus et les défis relevés par les intervenants clés. Ces entrevues ont également corroboré, expliqué ou clarifié les constats d'autres sources de données. Au total, 52 personnes provenant de groupes

d'intervenants différents ont été consultées dans le cadre d'entrevues individuelles et collectives. La distribution de ces entrevues est présentée au Tableau 4. L'information recueillie pendant ces entrevues est incluse tout au long du présent rapport, selon le cas.

TABEAU 4. NOMBRE D'ENTREVUES ET DE RÉPONDANTS PAR CATÉGORIE

CATÉGORIES DE RÉPONDANTS	NOMBRE D'ENTREVUES	NOMBRE DE RÉPONDANTS
Spécialistes de programme – ASC	9	9
Corporatif – ASC (communications, politiques, ressources humaines, programmes et planification intégrée, planification des activités d'exploration)	5	9
Haute direction – ASC	3	3
Astronautes canadiens (actifs et retraités)	3	3
Haute direction – Externe	7	7
Spécialistes de programme – Externe	6	6
Industrie et milieu académique	7	7
Astronautes non-canadiens	3	3
Organismes externes	5	5
TOTAL	48	52

3.2.4 Études de cas

Quatre études de cas ont été réalisées s'appuyant sur une revue documentaire, une analyse des données internes et externes ainsi que sur des données d'entrevues en lien avec les cas sélectionnés. Dans l'ordre de priorité, les critères de sélection suivants ont été utilisés pour la sélection des études de cas :

- La représentativité de la diversité des activités de programme;
- La durée du thème de recherche;
- Le montant de financement;
- L'importance de la collaboration internationale.

Une brève description de chacune des études de cas se retrouve à la section 2.2. *Modèle logique du programme, activités réalisées, clientèles et partenaires* dans l'encadré. De plus, tout au long du rapport, différents encadrés en lien avec les études de cas viennent documenter les questions d'évaluation.

3.2.5 Données internes

Les données internes du sous-programme *Missions spatiales habitées et soutien connexes* et du sous-sous-programme *Utilisation de la Station spatiale internationale* ont été étudiés afin d'en examiner la pertinence continue. Les données internes comprenaient entre autres les rapports sur la mesure du rendement, les données financières, les données administratives, la Stratégie de mesure de rendement (SMR), les données bibliométriques, ainsi que les rapports sur les plans et les priorités.

3.3 Limites

Cette section décrit les limites rencontrées au cours de l'évaluation et la façon dont elles ont été abordées.

1. **Certaines données de rendement ne sont pas disponibles.** Cela est particulièrement vrai pour les résultats finaux qui sont difficiles à mesurer. Par exemple, l'attribution du programme à la croissance économique soutenue du Canada. Cela dit, la majorité des données sur le rendement pour l'évaluation étaient disponibles et l'information fournie était fiable et valide même si quelques indicateurs de rendement n'avaient pas été mesurés tel que prévu dans la SMR¹³. Les données recueillies auprès des répondants en entrevue de même que les résultats plus détaillés des études de cas viennent pallier cette limite en ajoutant de l'information qualitative en lien avec les résultats.
2. **La plupart des répondants ont un intérêt direct dans le programme.** En plus des répondants internes ayant un intérêt direct envers le programme, les répondants externes étaient en majorité des chercheurs et entreprises ayant reçu l'appui du programme ou encore des partenaires de la SSI (ex : NASA, autres agences spatiales) pouvant également avoir un biais positif envers le programme évalué. Cette limite a été atténuée en demandant aux répondants qu'ils expliquent leurs points de vue et qu'ils fournissent des exemples, lorsque cela était approprié. En ce qui concerne le rapport dans son ensemble, les constatations découlant des entrevues menées auprès des répondants clés ont été recoupées avec les constatations d'autres sources de données (p. ex. examen de la documentation, données de rendement du programme et études de cas).
3. **Il est trop tôt pour quantifier/évaluer les résultats de certains projets.** Le cycle vie des projets est généralement d'environ cinq à sept ans, à partir de l'avis d'offre de participation/demande de proposition jusqu'à la fin de la réalisation des expériences et de la collecte des données scientifiques. Les premières publications revues par les pairs sont générées entre six mois à deux ans suivant la fin de la collecte des données et d'autres publications peuvent également paraître au cours des années suivantes. Les répercussions à plus long terme de projets d'envergure, comme certains présentés à travers ce rapport, notamment les retombées terrestres, peuvent donc avoir lieu plusieurs années après la fin des projets étant donné leur nature scientifique. Ceci est d'autant plus vrai pour les projets financés durant les deux dernières années de la période d'évaluation (2016-2017 à 2017-2018) qui n'avaient pas encore mené à des publications au moment de l'évaluation. Afin de pallier cette limite, deux études de cas sélectionnées dans le cadre de cette évaluation débutent en amont de cette dernière.

¹³ À noter que la SMR s'est transformée en Profil d'information sur le rendement, approuvée par l'ASC en décembre 2017 (en réponse à la nouvelle *Politique sur les résultats* de juillet 2016).

4 Constats de l'évaluation

Cette section du rapport décrit les constats de l'évaluation. Tout d'abord la pertinence du programme est abordée, puis les résultats et l'efficience sont détaillés.

4.1 Pertinence

Cette section couvre trois enjeux d'évaluation : 4.1.1 la réponse aux besoins identifiés à l'origine du programme; 4.1.2 la conformité entre les objectifs du programme et les priorités du gouvernement fédéral; et 4.1.3 les rôles et responsabilités du gouvernement fédéral relativement à l'exécution du programme.

4.1.1 Dans quelle mesure le programme a répondu aux besoins?

La présente section s'attarde, dans un premier temps, à la justification du besoin à l'origine du programme. Dans un deuxième temps, elle se penche sur l'évolution des besoins et, dans un troisième temps, à l'existence d'autres besoins non couverts par le programme.

4.1.1.1 La justification des Missions spatiales habitées et de l'Utilisation de la SSI

Constat : Le programme répond non seulement à un besoin démontré en maximisant le retour sur les investissements réalisés dans le passé (la pleine utilisation du temps alloué au Canada dans la SSI), mais il permet de mettre à profit l'expérience et la notoriété que l'ASC a acquises au fil des ans en matière de recherche, de médecine spatiale et de missions d'astronautes.

La justification générale des Missions spatiales habitées et de l'Utilisation de la SSI est déterminée par l'utilisation d'une infrastructure majeure, la SSI, qui s'inscrit dans le contexte plus large de l'exploration spatiale par des humains. Également, la justification du programme se décline selon différents besoins spécifiques auxquels répond le programme.

Maximiser les investissements passés

Tel que décrit à la section 2.1 du présent rapport, le Canada a investi une somme de 2,2 milliards \$ depuis le début de la SSI jusqu'en 2017 pour participer à la construction de la SSI. Ceci lui octroie le droit d'utiliser les installations de recherche de la SSI et d'avoir du temps alloué à l'équipage à hauteur de 2,3% (portion internationale). Les Missions spatiales habitées et l'Utilisation de la SSI permettent d'utiliser et de maximiser le rendement des investissements passés par l'utilisation de cette allocation. L'allocation de 2,3% du temps est utilisée pour le vol des astronautes canadiens vers la SSI, pour les expériences scientifiques et les démonstrations technologiques du Canada à bord de la SSI. Par ailleurs, le budget de 2012 a prolongé la participation du Canada à la SSI de 2016 jusqu'en 2020, puis les budgets de 2015 et de 2016 ont annoncé le maintien de la participation du Canada à la mission de la SSI. Ceci a réitéré l'engagement du Canada à contribuer aux opérations et à la maintenance du système d'entretien mobile jusqu'en décembre 2024, lui donnant droit notamment à des crédits de temps d'équipage et de transport.

Ainsi, les Missions spatiales habitées et l'Utilisation de la SSI s'inscrivent dans la suite du projet de construction de la SSI.

Le programme et le contexte général d'exploration spatiale

Les besoins identifiés dans la stratégie de mesure du rendement des Missions spatiales habitées et de l'Utilisation de la SSI situent en premier lieu le programme dans le contexte plus large de l'exploration spatiale. L'exploration spatiale contribue au développement de la connaissance et a le potentiel de contribuer aux nouvelles occasions commerciales : « Le programme d'exploration spatiale continue de répondre aux besoins du Canada en produisant des innovations qui ont le potentiel de devenir des produits et services courants¹⁴ ».

Différentes sources de la revue documentaire démontrent l'intérêt des Canadiens quant à l'importance d'investir dans l'exploration spatiale. Lors de consultations tenues auprès des intervenants du milieu par le *Space Advisory Board* mandaté par le ministre de l'Innovation, des Sciences et de l'Industrie du Canada en 2016, il a été recommandé de considérer l'espace comme un atout stratégique national : « Désignation de l'espace comme un actif stratégique national afin de s'assurer que le pays (gouvernements, industrie, universités et société civile) se concentre sur l'importance de l'espace pour la croissance économique et sociale du Canada. » Les participants aux consultations ont noté que, par le passé,

La capacité spatiale était généralement considérée par les gouvernements comme un actif stratégique national capable d'apporter des solutions uniques à bon nombre de problèmes nationaux critiques. [...] La technologie spatiale canadienne contribue de façon unique à l'unification du pays [et] inspire les Canadiens comme aucune autre capacité ne peut le faire (Canadarm, astronaute et astronomie spatiale)¹⁵.

Cet avis est partagé par la coalition *Don't let go Canada*¹⁶ mise sur pied par des représentants du secteur spatial (industrie et organismes à but non lucratif) pour lesquels il est primordial que le gouvernement s'implique davantage dans le secteur spatial.

En plus des intervenants du milieu spatial pour qui l'exploration spatiale est importante, un article de l'OCDE de 2016 souligne que certains entrepreneurs et grandes firmes privées sont intéressés par l'exploration spatiale humaine : [traduction] « Un changement majeur, par rapport à il y a seulement une décennie, est qu'une telle vision est non seulement exprimée par les scientifiques des agences spatiales

¹⁴ ASC (2017). PM Strategy, *Op. cit.*, p. 7.

¹⁵ GOUVERNEMENT DU CANADA (2017). *Consultations sur l'avenir du Canada dans l'espace : les commentaires reçus*, août 2017, [<https://www.ic.gc.ca/eic/site/082.nsf/fra/03996.html>].

¹⁶ La campagne *Don't let go Canada* a été initiée par l'*Aerospace Industries Association of Canada* et MDA, la plus importante compagnie canadienne dans le domaine spatial. Plus de 60 entreprises, associations et organisations académiques du secteur spatial canadien ont joint la coalition. Pour de plus amples informations : <https://dontletgocanada.ca/faq>

avec plus ou moins de soutien de la part des décideurs, mais qu'il s'agit également d'un objectif de certains entrepreneurs et grandes entreprises commerciales¹⁷». Selon cet article, la NASA envisage un rôle important du secteur privé dans la "Low Earth orbit economy" ("LEO economy") pour le développement d'activités liées aux missions spatiales humaines habitées dans le futur.

Le grand public canadien est également favorable à l'exploration spatiale selon un sondage d'opinion publique réalisé en 2018 auprès d'environ 1 600 Canadiens âgés de dix-huit et plus : [traduction] « L'enthousiasme pour l'espace est plus grand que par le passé [...]. Le Canadarm et les astronautes du Canada viennent d'abord à l'esprit des gens et sont une source de fierté. [...] Les Canadiens appuient l'investissement dans le secteur spatial et bon nombre d'entre eux rejettent l'idée que le Canada est un pays trop petit pour être actif dans l'espace¹⁸». Cet énoncé est toutefois nuancé par un autre qui mentionne que les dépenses dans le secteur spatial ne sont pas la priorité puisque la moitié des canadiens consultés affirment que le Canada devrait dépenser moins pour l'espace en général : « Le Canada devrait dépenser moins dans le secteur spatial parce que nous avons d'autres priorités plus importantes¹⁹». Un autre sondage réalisé en 2019 auprès d'un panel virtuel de 1 512 Canadiens pour le Sun/Post Media révèle que 80% des Canadiens sont fiers du rôle joué par le Canada dans l'exploration spatiale et 63% des Canadiens affirment que les astronautes les inspirent personnellement²⁰. Ces données se confirment également par le nombre élevé d'interactions sur les médias sociaux de l'ASC tel que décrit dans la section sur les résultats finaux (4.2.5). Selon un article préparé par l'*International Space Life Science Working Group* (ISLSWG), les avantages sociaux liés aux nouvelles connaissances et technologies spatiales sont nombreux et visent

Un grand nombre d'aspects différents de la vie quotidienne des panneaux solaires aux moniteurs cardiaques implantables, des thérapies contre le cancer aux matériaux légers, et des systèmes de purification de l'eau à des systèmes informatiques améliorés, sans oublier un système mondial de recherche et sauvetage²¹.

Par ailleurs, même si la nature des avantages futurs découlant de l'exploration spatiale est imprévisible, les tendances actuelles suggèrent que des avantages considérables peuvent être générés dans des domaines comme les nouveaux matériaux, la santé et la médecine, les transports et l'informatique.²²

¹⁷ OCDE (2016). *New Trends in Space Innovation*, 27 octobre 2016, p. 22, [https://read.oecd-ilibrary.org/science-and-technology/space-and-innovation/new-trends-in-space-innovation_9789264264014-3-en#page1].

¹⁸ IPSOS (2018). *Canadians' Support and Enthusiasm for Development in the Space Sector is Taking Off*, 20 septembre 2018, [<https://www.ipsos.com/en-ca/news-polls/space-sector-taking-off>].

¹⁹ *Ibid.*

²⁰ GALLICHAN-LOWE, Spencer (2019). *Majority of Canadians proud of country's space program*, CityNews, 21 juillet 2019, [<https://toronto.citynews.ca/2019/07/21/canada-space-program-poll/>].

²¹ L'*International Space Life Science Working Group* (ISLSWG) est un groupe de travail ayant pour but de coordonner la planification stratégique et la mise en œuvre des activités en sciences de la vie dans l'espace. Pour de plus amples informations : [https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/islswg_charter_october_2015_signed.pdf].

²² ASC (2016). *Évaluation du Programme d'opérations d'assemblage et d'entretien de la SSI*, Op. cit., p. 43.

L'exploration spatiale au sens large est un besoin présent selon les différents acteurs du secteur spatial et de la population canadienne en général et permet de produire des innovations ayant des retombées économiques, scientifiques et sociales pour les Canadiens.

Les besoins spécifiques identifiées dans la SMR Missions spatiales habitées et Utilisation de la SSI

Dans le contexte de l'exploration spatiale, le programme cible plus spécifiquement les cinq besoins suivants identifiés dans la stratégie de mesure de rendement du programme, objectifs qui sont toujours pertinents et alignés avec la Stratégie spatiale canadienne annoncée en mars 2019²³ :

- 1) Positionner le Canada à la fine pointe de la science et de la technologie;
- 2) Recruter, entraîner et sécuriser les occasions de vol pour les astronautes;
- 3) Identifier, comprendre, atténuer ou éliminer les risques pour la santé des astronautes;
- 4) Concevoir, construire, lancer et exploiter le matériel spatial pour mener des expériences en science de la vie et soutenir la santé des astronautes;
- 5) Créer de nouveaux emplois dans des domaines tels que l'ingénierie, la science, le secteur manufacturier et l'administration²⁴.

L'évaluation s'est penchée d'une part sur la pertinence de chacun de ces besoins et, d'autre part, sur la façon dont le programme y répond.

1) POSITIONNER LE CANADA À LA FINE POINTE DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNOLOGIE

Le besoin de positionner le Canada à la fine pointe de la science et de la technologie est un besoin commun au sous-programme *Missions spatiales habitées et soutien connexe* (1.2.3) et au sous-sous-programme *Utilisation de la SSI* (1.2.1.2). La SSI est un laboratoire permettant le développement scientifique et technologique et l'Évaluation du Programme d'opération d'assemblage et d'entretien de la Station spatiale internationale de l'Agence spatiale canadienne²⁵ a fait ressortir ce potentiel unique d'utilisation de la SSI notamment en recherche scientifique et en observation de la Terre.

Le recherche en santé humaine dans la SSI permet une meilleure compréhension de la santé humaine, notamment du vieillissement, des traumatismes, des maladies et de l'environnement [...]. La SSI facilite l'observation de la Terre visant à comprendre et à résoudre les enjeux environnementaux [...]. Les astronautes peuvent faire des observations et saisir des images d'événements en temps réel et fournir des renseignements au personnel au sol qui programme les systèmes automatisés d'observation de la Terre de la SSI²⁶.

²³ ASC (2019). *Stratégie spatiale pour le Canada*, [<https://lobbycanada.gc.ca/app/secure/ocl/lrs/do/advSrch?lang=fra>]

²⁴ ASC (2017). *PM Strategy*, *Op. cit.*

²⁵ ASC (2016). *Évaluation du Programme d'opérations d'assemblage et d'entretien de la SSI*, *Op. cit.*

²⁶ *Ibid.*, p. 44

Depuis les débuts du programme de la SSI, le Canada a participé à 60 expériences et projets touchant la science et la santé²⁷ ce qui lui a permis de se positionner comme chef de file dans certaines niches particulières telles que la médecine spatiale et la santé cardiovasculaire.

Lors des entrevues, la quasi-totalité des répondants internes considéraient que le programme contribuait à positionner le Canada à la fine pointe de la science et de la technologie. Selon eux, le Canada est respecté et reconnu au sein de la communauté internationale pour son apport et son partage de connaissances dans les domaines de la technologie et de la recherche en santé. Il a également été mentionné qu'il existe une réelle demande de nos partenaires internationaux à cet égard. De plus, de nombreux répondants ont précisé que le besoin de positionner le Canada à la fine pointe de la science et de la technologie est toujours d'actualité et que cela se reflète dans les activités menées par l'Agence. Plus d'une fois, il a été rapporté que ce besoin est intrinsèquement lié à la mission de l'Agence. Des répondants externes ont mentionné que la contribution du Canada est petite en quantité, mais grande en qualité. La quasi-totalité des répondants externes ont d'ailleurs précisé que la science de la vie et la technologie allaient devenir des secteurs encore plus importants avec les futures missions vers Mars et que le Canada pourrait accroître son importance sur l'échiquier mondial s'il poursuivait son implication dans ces domaines.

Ainsi, la SSI offre des opportunités pour le Canada de se positionner à la fine pointe de la science et de la technologie et le programme permet de saisir ces opportunités et d'être reconnu par la communauté internationale.

2) RECRUTER, ENTRAÎNER ET SÉCURISER LES OCCASIONS DE VOL POUR LES ASTRONAUTES

Le besoin de recruter, d'entraîner et de sécuriser les occasions de vol pour les astronautes est lié au sous-programme *Missions spatiales habitées et soutien connexe* (1.2.3). Le maintien d'un corps d'astronautes permet de prendre avantage des opportunités de vols allouées au Canada en vertu des droits et obligations convenus dans l'entente avec les partenaires de la SSI²⁸. De nombreux répondants en entrevue ont souligné l'importance de maintenir un corps d'astronautes au Canada. Il s'agit d'une activité essentielle du programme qui s'avère d'autant plus importante dans le contexte des futures opportunités en termes de vols commerciaux et d'exploration de l'espace lointain. Le programme est le seul à recruter et chercher des occasions de vols au Canada, ce qui lui confère un caractère unique et l'Agence doit s'assurer que les astronautes soient qualifiés, en santé et suffisamment entraînés. À ce propos, la totalité des intervenants considèrent que l'Agence recrute adéquatement ses astronautes. En ce qui a trait à l'entraînement, la majorité des intervenants considèrent que l'Agence atteint son objectif.

Dans le même ordre d'idées, la totalité des répondants sont d'avis qu'en recrutant des astronautes, l'Agence devrait pouvoir leur garantir des opportunités de vol. Si de nombreux répondants considèrent que le programme permet d'atteindre cet objectif, le quart des répondants a toutefois souligné que le

²⁷ ASC (2019). *Stratégie spatiale pour le Canada*, Op. cit., p. 3.

²⁸ IGA (1998). *Op. cit.*

Canada n'avait pas encore atteint son plein potentiel dans ce domaine. Il faudrait, selon certains, pouvoir garantir davantage de vols spatiaux. Cette question est abordée dans la section 4.3 sur l'efficacité.

3) IDENTIFIER, COMPRENDRE, ATTÉNUER OU ÉLIMINER LES RISQUES POUR LA SANTÉ DES ASTRONAUTES

Le besoin d'identifier, de comprendre, d'atténuer ou d'éliminer les risques pour la santé des astronautes est un besoin lié au sous-programme *Missions spatiales habitées et soutien connexe* (1.2.3). Il s'agit d'un besoin commun aux partenaires de la SSI qui se doivent de maintenir les astronautes en santé. L'exploration de l'espace expose les êtres humains à des risques pour la santé qui peuvent compromettre les missions ou avoir des conséquences à long terme. Ces risques sont largement liés aux effets de l'environnement spatial, notamment le rayonnement spatial, la gravité variable et l'environnement isolé, confiné et extrême, mais certains risques sont également liés à la prestation des soins de santé. Les risques identifiés sont décrits en détail dans des documents tels que *Human Health and Performance Risks of Space Exploration Missions*²⁹ et *Risk of Adverse Health Outcomes and Decrements in Performance due to In-flight Medical Conditions*³⁰. Un résumé des risques a été produit par le *Multilateral Human Research Panel for Exploration* (dont l'ASC est membre) et est présenté au tableau 5³¹.

TABEAU 5 – RÉSUMÉ DES RISQUES POUR LA SANTÉ ET LE RENDEMENT DES ASTRONAUTES

CATÉGORIE DE RISQUE	DESCRIPTION
Système musculosquelettique	Réduction de la force musculaire et de la capacité aérobie et fragilisation des os.
Système sensorimoteur	Modification ou dysfonction sensorielles nuisant au rendement.
Syndrome oculaire	Trouble de la vue et/ou pression intracrânienne élevée causés par la microgravité.
Nutrition	Incapacité à consommer des aliments en quantité et en qualité suffisantes pour satisfaire aux besoins nutritionnels et pour maintenir le moral.
Santé comportementale et rendement	Environnement isolé, équilibre travail/repos, stress, problèmes de dynamique d'équipe, problèmes d'interface entre les humains et les systèmes, risques associés à la transition dans l'après-carrière d'astronaute.
Effets du rayonnement sur la santé	Déficiences découlant de dommages causés par le rayonnement. Risque de carcinogenèse et de maladie dégénérative des tissus découlant de l'exposition aux rayonnements.
Hypogravité	Adaptation physiologique lors des phases de transit (exposition prolongée à la microgravité) et des sorties extravéhiculaires (EVA) à la surface de la Lune, d'astéroïdes ou de Mars (dysfonction vestibulaire et déficience sur le plan du rendement).
Facteurs de stress environnementaux	Exposition à un environnement toxique à bord de l'engin spatial, pendant une EVA ou en sortie à la surface d'un corps céleste sans surveillance adéquate, sans système d'avertissement ou sans comprendre la toxicité potentielle (poussière planétaire, éléments chimiques, agents infectieux, contamination microbienne).
Soins médicaux autonomes	Incapacité d'assurer des soins médicaux adéquats pendant toute la mission (comprend la formation, le diagnostic et le traitement à bord, ainsi que la présence ou l'absence d'un médecin de bord).

²⁹ NASA (2009). *Human Health and Performance Risks of Space Exploration Missions*, [<https://humanresearchroadmap.nasa.gov/evidence/reports/EvidenceBook.pdf>].

³⁰ NASA (2017). *Risk of Adverse Health Outcomes and Decrements in Performance due to In-Flight Medical Conditions*, [<https://humanresearchroadmap.nasa.gov/evidence/reports/Medical.pdf>].

³¹ Health Research and Development for Space Exploration Plan, 20 mars 2018, p. 4.

Les partenaires de la SSI ont réalisé plusieurs études sur Terre et dans la SSI pour comprendre les risques associés aux voyages spatiaux et trouver des stratégies d'atténuation pour réduire leur impact³². Selon un rapport de vérification du *Office of Inspector General* américain de février 2018, [traduction] « La compréhension et l'atténuation des risques pour la santé et le rendement des astronautes durant les vols spatiaux de longue durée constituent une priorité absolue pour la Station depuis sa création³³ ». Ce rapport fait un état de la situation de l'ensemble des risques pour la santé des astronautes démontrant l'ampleur des recherches qui restent à faire pour le développement de contremesures, soit au moins huit risques pour la santé humaine qui requerront d'être testés dans la SSI jusqu'en 2024 ou après,

les conditions cognitives ou comportementales, l'alimentation et la nutrition inadéquates, la diminution de la performance des équipes, le syndrome neuro-oculaire associé aux vols spatiaux, le stockage à long terme des médicaments, les altérations sensorimotrices, les réponses immunitaires altérées et les interactions hôte microorganisme³⁴.

Il reste plusieurs risques à caractériser et des contremesures à développer, et ce, d'autant plus dans le contexte des voyages lointains pour lesquels les impacts sur la santé humaine ne sont pas tous connus et pour lesquels les contremesures sont limitées³⁵.

Lors des entrevues, l'intégralité des personnes interrogées considéraient qu'identifier, comprendre, atténuer ou éliminer les risques pour la santé des astronautes faisait partie des préoccupations importantes de l'Agence. Aux dires de plusieurs, il s'agirait d'un besoin qui est intrinsèquement lié au besoin précédent, c'est-à-dire recruter, entraîner et sécuriser les occasions de vol pour les astronautes (besoin no. 2), au sens où l'envoi d'astronautes dans l'espace nécessite d'assurer leur santé. De plus, il a été mentionné à plusieurs reprises et par différents intervenants que l'identification, la compréhension, l'atténuation ou l'élimination des risques pour la santé des astronautes allait accroître en importance avec les futures missions lunaires et martiennes, car celles-ci seront plus longues et risquent donc d'engendrer des risques plus élevés pour la santé des astronautes. Selon de nombreux intervenants, il importe donc de poursuivre les recherches scientifiques et médicales liées aux impacts des vols spatiaux sur l'organisme. En conclusion, les risques pour la santé des astronautes sont toujours présents et doivent continuer à être étudiés.

³² À titre d'exemple, en 2014, plus de 215 millions de dollars ont été dépensés par la NASA pour la recherche sur les risques sur la santé humaine des voyages dans l'espace. NASA OFFICE OF INSPECTOR GENERAL (2015). *Nasa's Efforts to Manage Health and Human Performance Risks for Space Exploration*, p. 13, 29 octobre 2015.

³³ NASA (2018). *NASA's Management and Utilization of the International Space Station*, p. 7, [<https://oig.nasa.gov/docs/IG-18-021.pdf>].

³⁴ *Ibid.*

³⁵ NASA (2015). *Nasa's Efforts to Manage Health and Human Performance Risks for Space Exploration*, p. 13., 29 octobre 2015. Voir l'introduction de la section *What we Found* : [traduction] « Les missions de longue durée exposeront probablement les équipages à des risques pour la santé et la performance humaines pour lesquels la NASA a peu de contremesures efficaces ».

4) CONCEVOIR, CONSTRUIRE, LANCER ET EXPLOITER LE MATÉRIEL SPATIAL POUR MENER DES EXPÉRIENCES EN SCIENCE DE LA VIE ET SOUTENIR LA SANTÉ DES ASTRONAUTES

Le besoin de concevoir, de construire, de lancer et d'exploiter le matériel spatial pour mener des expériences en sciences de la vie et soutenir la santé des astronautes est un besoin lié au sous-sous-programme *Utilisation de la SSI* (1.2.1.2). Les instruments scientifiques et médicaux sont construits notamment pour aider au maintien de la santé des astronautes. Depuis plus de 20 ans, le Canada a développé une expertise dans la conception d'instruments tels que le mini-laboratoire OSTEO³⁶ et Microflow. Ces instruments, de même que ceux développés dans le cadre du projet *Life Science Research System* (LSRS) ont été et sont utilisés par la communauté scientifique en appui à l'identification, la caractérisation et l'atténuation des risques associées aux vols habités tel que discuté au besoin précédent (besoin no. 3). En plus d'aider à soutenir la santé des astronautes, les technologies développées peuvent être utiles au niveau des applications terrestres dans le domaine des soins et du suivi de la santé³⁷, notamment en télémédecine.

Selon le *Rapport du groupe d'experts sur les rôles possibles que pourrait jouer le Canada en matière de santé et d'activités biomédicales pour les vols habités dans l'espace lointain*, « le secteur des technologies médicales au Canada compte environ 2 000 entreprises couvrant de nombreux domaines de traitement et plateformes technologiques³⁸ », tels que les diagnostics de laboratoire sur puce, l'intelligence artificielle, les technologies de santé numériques comme l'Hexoskin. Ce rapport recommande « d'investir de manière significative dans les soins de santé autonomes pour les missions spatiales dans l'espace lointain, et ce, afin d'offrir une contribution audacieuse pour l'exploration spatiale et de développer l'expertise canadienne en soins de santé virtuels au profit de tous les Canadiens³⁹ ».

³⁶ L'Agence spatiale canadienne a appuyé [Millennium Biologix](http://www.millenniumbiologix.com) dans la conception du mini-laboratoire OSTEO, qui a permis de tester la croissance de cellules osseuses à l'aide d'un biomatériau synthétique, Osteologic, également développé par Millennium. Ce biomatériau qui imite la structure de l'os a permis d'étudier 192 échantillons de cellules osseuses qui avaient été développées préalablement. Aujourd'hui, une version médicale de ce matériau, le Skelite, est utilisée au Canada, aux États-Unis et en Europe pour guérir des fractures. Pour de plus amples informations : <http://www.asc-csa.gc.ca/fra/sciences/osteo.asp>.

³⁷ Les technologies de bioanalyse pourront permettre aux personnes qui vivent dans des régions éloignées (p. ex. le Nord) d'être testées rapidement pour des problèmes de santé comme des infections, réduisant ainsi les coûts en soins de santé et favorisant l'accès à des outils de niveau hospitalier à plus de Canadiens. Les technologies de bio-surveillance pour trouver des applications en télémédecine, par exemple dans le secteur des mines et des environnements maritimes, l'Arctique ainsi que dans le secteur militaire dans des zones éloignées et des environnements hostiles. La télémédecine permet aux patients d'obtenir des services médicaux rapides et efficaces dans des régions éloignées et ce sans le besoin de se déplacer. Ces technologies pourraient aussi être portées par les personnes âgées dans le confort de leur résidence pour fins de suivi à distance pour les médecins.

³⁸ ASC (2019). *Soins de santé canadiens dans l'espace lointain : Le Canada comme chef de file en soins autonomes dans l'espace et sur Terre*, [<http://www.asc-csa.gc.ca/fra/publications/soins-de-sante-canadiens-dans-lespace-lointain.asp>].

³⁹ *Ibid.*

Lors des entrevues, l'intégralité des répondants interrogés à ce sujet sont d'avis que le Canada réussit à concevoir, construire, lancer et exploiter le matériel spatial pour mener des expériences en sciences de la vie et soutenir la santé des astronautes. D'ailleurs, plusieurs d'entre eux ont mentionné que cela était au cœur de la mission de l'Agence. Certains ont également mentionné que le matériel spatial développé pouvait être réutilisé sur Terre et que cela offrait une bonne visibilité à l'expertise canadienne sur la scène internationale. Ainsi, le fait de concevoir, de construire, de lancer et d'exploiter le matériel spatial pour mener des expériences en science de la vie et soutenir la santé des astronautes pourraient contribuer également à améliorer et à transformer la prestation des soins de santé à distance et les soins aux personnes âgées.

5) *CRÉER DE NOUVEAUX EMPLOIS DANS DES DOMAINES TELS QUE L'INGÉNIERIE, LA SCIENCE, LE SECTEUR MANUFACTURIER ET L'ADMINISTRATION*

Le besoin de positionner le Canada à la fine pointe de la science et de la technologie est un besoin commun au sous-programme *Missions spatiales habitées et soutien connexe* (1.2.3) et au sous-sous-programme *Utilisation de la SSI* (1.2.1.2). En 2017, l'effectif du secteur spatial canadien était de 9 942 personnes (en équivalent temps plein (ETP)) dont 4 085 étaient des personnes hautement qualifiées (PHQ)⁴⁰ et près de 20% provenait des universités et centres de recherches (1 871 ETP)⁴¹. Ainsi, un secteur spatial compétitif et novateur est primordial afin de poursuivre la création d'emplois et l'établissement d'infrastructures nécessaires à une économie basée sur le savoir.

Étude de cas bioanalyse

Le biomoniteur a été construit par une entreprise en démarrage montréalaise et plus d'une douzaine de personnes ont travaillé sur le projet. Deux autres petites entreprises canadiennes (dont une essaimée de l'Université McGill) dans le domaine de la biotechnologie ont contribué au développement de sous-systèmes pour le biomoniteur.

Selon un responsable du programme, « Il aurait été très difficile pour ces entreprises d'avoir accès à l'espace sans le programme ».

Lors des entrevues, la majorité des répondants considérait qu'il était important de créer de nouveaux emplois dans des domaines tels que l'ingénierie, la science, le secteur manufacturier et l'administration. Il a d'ailleurs été mentionné à plus d'une reprise que ce besoin était intrinsèquement lié à la mission de l'Agence et qu'il était toujours d'actualité. Par ailleurs, plusieurs répondants pensent que le besoin de créer de nouveaux emplois dans ces domaines va s'accroître avec le développement de l'industrie et la plus grande implication des entreprises commerciales dans les vols spatiaux habités. À ce jour, les marchés spatiaux commerciaux sont les télécommunications, la navigation et les lanceurs (marché en émergence). Pour sa part, le marché domestique est très petit (limité au marché institutionnel, c'est-à-dire le

⁴⁰ ASC (2018). *État du secteur spatial canadien : rapport 2018 (faits et chiffres de 2017)*, p. 41, [<http://www.asc-csa.gc.ca/fra/publications/2018-etat-secteur-spatial-canadien.asp>].

⁴¹ *Ibid.*, p. 18.

gouvernement). Par conséquent, la pérennité des entreprises œuvrant dans le secteur de l'exploration spatiale est liée à des activités visant les marchés terrestres. D'où l'importance, à court et à moyen terme, de miser sur des entreprises qui peuvent co-développer des applications terrestres et spatiales des mêmes technologies pour développer et préserver des capacités spatiales stratégiques soutenables.

En outre, il a été mentionné plus d'une fois que répondre à ce besoin était relativement difficile considérant que le domaine spatial est un secteur particulièrement spécifique. En effet, plusieurs considèrent que le Canada a le potentiel de se tailler une place dans certains domaines liés au secteur spatial comme par exemple dans des secteurs en croissance tel que le génie biomédical qui est un secteur émergent. En développant des systèmes et des dispositifs médicaux autonomes pouvant être utilisés dans des conditions extrêmes, cela contribue autant pour les besoins dans l'espace que pour les besoins de soins à distance dans les régions éloignées au Canada.

Besoins généraux

En plus des cinq besoins précédents, les activités du programme contribuent à des objectifs généraux tels que la compétitivité économique, l'amélioration des soins de santé pour les Canadiens et l'inspiration des Canadiens à poursuivre leurs plus hautes aspirations (p. ex. les missions d'astronautes inspirent les jeunes à étudier et à se diriger dans des carrières dans le domaine des sciences et de l'ingénierie).

D'autres réalisations de la SSI ont cependant autant à voir avec la géopolitique qu'avec la science et l'innovation. Ainsi, il a été mentionné en entrevue que la plus grande réalisation du programme de la SSI est autant une réalisation humaine que technologique. En plus de réunir plusieurs véhicules de lancement, des installations de lancement, d'exploitation, de formation, d'ingénierie et de développement distribuées dans le monde entier, des réseaux de communication et la communauté internationale de la recherche scientifique, la SSI héberge des équipages multinationaux depuis près de deux décennies. Ceci malgré les conflits en cours sur la Terre. Une telle réalisation a conduit la SSI à être nommée pour le prix Nobel de la paix en 2014 et à recevoir le Prix de la paix de Westphalie⁴² la même année pour son travail en faveur de l'unité et de la paix en Europe. Comme l'a souligné l'astronaute de l'ASE Alexander Gerst à bord de la SSI:

Aujourd'hui, la SSI est un exemple frappant de la façon dont les gens peuvent vivre et grandir pour travailler ensemble au profit de l'humanité tout entière. La SSI est la marque de la coopération internationale. Un jalon dans l'histoire humaine. Car ce n'est que si nous sommes ensemble, si nous nous considérons comme une seule et même humanité - nous pouvons le voir clairement depuis l'espace - que nous pourrions construire un meilleur avenir⁴³.

⁴² Le Prix de la paix de Westphalie est une récompense décernée aux personnes ou organisations qui œuvrent à renforcer la paix européenne et internationale. Il est décerné à tous les deux ans depuis 1998, date du 350^e anniversaire des Traités de paix de Westphalie (1648) qui mirent fin à la guerre de Trente Ans et à la guerre de Quatre-Vingts Ans. Pour de plus amples informations : <https://www.reformés.ch/201403246850/6850-le-prix-de-la-paix-de-westphalie-est-decerne-dans-lespace.html>.

⁴³ ASE (2014).

4.1.1.2 L'évolution des besoins depuis les cinq dernières années (2013-2018)

Constat : Depuis 2013, les besoins n'ont pas réellement changé mais le contexte a évolué et le programme s'est adapté pour demeurer pertinent. En effet, il a décidé de concentrer son intervention sur certaines priorités de recherche. Du côté des astronautes, de nouveaux critères de sélection pour le recrutement ont été utilisés lors de la dernière campagne de recrutement des astronautes.

Les besoins identifiés précédemment demeurent les mêmes et sont encore d'actualité. Toutefois, le contexte dans lequel ces besoins se situent a évolué au cours de la période 2013-2018. En effet, 1) la durée des missions spatiales habitées est de plus en plus longue; 2) les astronautes ont davantage de temps alloué aux recherches scientifiques à bord de la SSI; 3) une réorientation des priorités de recherche vers l'exploration spatiale pour des missions de longue durée a été faite; 4) de nouveaux critères de recrutement pour les astronautes ont été appliqués; et 5) la disponibilité des véhicules spatiaux commerciaux (p. ex. SpaceX) est en accroissement.

Selon les informations récoltées dans les entrevues et la revue documentaire, l'évolution du contexte s'explique par différents facteurs. Lesdits facteurs sont les suivants : 1) le ralentissement économique mondial qui a débuté en 2008 et qui continue d'affecter la disponibilité des fonds attribués par les gouvernements aux activités spatiales; 2) la fin de la période d'assemblage de la SSI en 2010; 3) la fin du programme des navettes spatiales de la NASA en 2011 qui a diminué les opportunités de vols spatiaux; et 4) l'annonce, en 2012, du prolongement de l'engagement du Canada dans le programme de la SSI jusqu'en 2020. Notamment, avec l'achèvement de la SSI, l'ASC et ses partenaires internationaux ont choisi de recentrer leurs efforts sur les missions d'exploration spatiale habitées vers la Lune et Mars au cours des prochaines années. L'ancien président des États-Unis Barack Obama avait d'ailleurs annoncé la réorientation des activités de la NASA en ce sens, dès avril 2010⁴⁴. S'adaptant aux courants macro-économiques autant qu'aux changements d'orientation des partenaires internationaux, l'Agence a modifié ses orientations stratégiques pour la période 2013-2018.

Tenant compte des facteurs qui amènent un nouveau contexte, l'ASC adapte donc ses activités afin de répondre aux besoins identifiés plus haut. Par exemple, il a été mentionné en entrevue que les travaux de recherche relatifs à la santé des astronautes s'intéressent maintenant de plus en plus aux impacts psychologiques et psychosociaux des missions de longue durée.

1) Missions spatiales de longue durée

Lors des entrevues, certains répondants ont mentionné qu'il y avait moins d'opportunités de vol pour les astronautes depuis la mise hors service de la navette spatiale américaine. Les missions spatiales de longue durée sont devenues la norme et l'orbite basse terrestre où orbite la SSI demeure pour le moment la seule

⁴⁴ CENTRE DE GESTION PUBLIQUE INC. (2011). *Environmental Scan and Priorities in Life and Health Sciences : Final Report*, Agence spatiale canadienne, 14 août 2011.

destination pour les vols habités. Ces missions, d'une durée typique de six mois, sont le résultat à la fois de la non disponibilité de moyens de transport d'équipages autre que le Soyouz et permettent de se préparer aux éventuels voyages de longue durée vers des destinations lointaines.

Parmi les avantages des missions de plus longue durée, plusieurs intervenants ont mentionné que la présence humaine à long terme permet d'effectuer des expériences de recherche plus longues et d'étudier l'effet des vols spatiaux de plus longue durée sur la santé humaine. Auparavant, les vols de navette, d'une durée maximale de deux semaines, étaient plutôt limités puisque les expériences devaient être autonomes. Il est maintenant possible d'effectuer différentes recherches dans la SSI (p. ex. les changements de fluides peuvent être examinés sur les humains sur une période de six mois). De plus, un répondant a précisé que l'ASC pouvait maintenant effectuer davantage d'expériences de longue durée.

Par ailleurs, il y a certains désavantages aux vols de longue durée dans le contexte canadien. Puisque le Canada accumule des crédits de vol au rythme de 2,3% du total du temps disponible, plus le vol est long, plus le prochain vol est repoussé dans le temps. Selon certains répondants en entrevue, il pourrait être préférable pour le Canada d'avoir des vols de plus courtes durées de façon à ce que les astronautes canadiens volent plus fréquemment. Un autre désavantage est que les missions de plus longue durée font en sorte que le taux de roulement des astronautes est moins élevé et il faut attendre plus longtemps avant d'avoir un échantillon suffisant de sujets étudiés. Ceci dit, l'objectif des travaux de recherche dans le domaine de la santé dans l'espace est justement d'étudier l'effet des vols de plus longue durée afin de soutenir les projets d'exploration spatiale lointaine. Il s'avère essentiel de poursuivre ces études, bien qu'elles soient fastidieuses à réaliser.

2) Les astronautes ont davantage de temps alloué à l'utilisation de la SSI

La SSI est un laboratoire de recherche en orbite autour de la terre. Le premier module de la SSI a été lancé en 1998 et cette dernière est habitée en permanence depuis novembre 2000⁴⁵. Depuis la fin de la période d'assemblage de la SSI en 2010, les astronautes ont pu concentrer une plus grande partie de leurs efforts sur la réalisation d'expériences scientifiques et médicales, tout en utilisant davantage la SSI. Autrement dit, au début de la SSI, le temps de l'équipage était davantage axé sur l'assemblage et les opérations et moins sur l'utilisation comme c'est le cas aujourd'hui. Maintenant que la construction est terminée, plusieurs personnes interrogées ont mentionné que l'ASC se concentre davantage sur l'utilisation du laboratoire de la SSI et sur l'exploration spatiale en général.

3) Réorientation des priorités de recherche

La période 2013-2018 marque l'émergence de nouvelles priorités de recherche; celles-ci visant de plus en plus l'exploration humaine dans l'espace lointain en utilisant la SSI comme plateforme pour s'y préparer. En effet, il a été mentionné en entrevue que les priorités de recherche ont évolué au cours de la période

⁴⁵ ASC (2016). *Évaluation du Programme d'opérations d'assemblage et d'entretien de la SSI de l'ASC*, Op. cit., p. 2.

2013-2018, principalement à cause de la fin de la période d'assemblage de la SSI, le prolongement de l'implication canadienne dans la SSI jusqu'en 2020 et la prise en considération des futures opportunités reliées à l'exploration spatiale (p. ex. « Gateway » lunaire et Mars). La revue documentaire corrobore ces affirmations. Selon une analyse environnementale visant à identifier les objectifs scientifiques futurs et les questions-clés pour les avis d'offre de participation (AOP) réalisée en 2011⁴⁶, les priorités de l'Agence ont commencé à évoluer pour mieux s'aligner sur les enjeux liés à l'exploration humaine de longue durée (p. ex. architecture médicale avancée pour l'exploration, étude de la santé psychologique et des impacts de l'isolement à long terme sur les membres d'équipage et utilisation de la SSI comme analogue pour les véhicules d'exploration)⁴⁷. Ces priorités de recherche ont également été confirmées en 2016 lors d'une vaste consultation nationale sur le futur de l'exploration spatiale coordonnée par l'ASC⁴⁸. D'ailleurs, l'ASC collabore avec ses partenaires de la SSI (États-Unis, Europe, Russie et Japon) et d'autres agences spatiales au sein du *International Space Exploration Coordination Group* (ISECG) pour discuter et préparer les futures opportunités de collaboration, les destinations de l'exploration humaine et les technologies requises pour y parvenir.

Lors des entrevues, il a été mentionné plus d'une fois que l'ASC a graduellement éliminé son implication dans les sciences physiques à partir de 2010 afin de se concentrer essentiellement sur les enjeux liés à la santé et au bien-être des astronautes. Cette décision de prioriser les recherches liées aux sciences de la vie et de la santé est influencée par la volonté d'effectuer des missions de longue durée dans le futur. En effet, en priorisant les recherches relatives aux sciences de la vie et de la santé, l'ASC souhaite identifier et résoudre les problèmes liés aux missions d'exploration spatiale au-delà de l'orbite basse, telle que l'exploration spatiale à long terme et vivre en microgravité pendant de longues période de temps. L'intérêt de ces recherches est qu'il s'agit de domaines très importants pour la vie et la santé des astronautes, mais qui ont également le potentiel de résoudre des problèmes liés à la vie et à la santé sur Terre⁴⁹. Ainsi, bien que l'ASC ait limité son intervention à la santé, il est à noter qu'il existe encore des chercheurs au Canada qui font de la recherche sur les sciences physiques liées à l'espace.

Cela demeure en conformité avec les recommandations du groupe consultatif qui avait effectué l'analyse environnementale de 2011. Ce dernier avait recommandé sept domaines de recherches scientifiques prioritaires relatifs aux sciences de la vie et de la santé dans l'espace, pour lesquels le Canada peut ou devrait développer un leadership scientifique international au cours des 15 à 20 prochaines années. Il s'agit des domaines suivants : 1) l'atrophie des muscles et des os; 2) la neuroscience; 3) la physiologie et le métabolisme; 4) la radiation; 5) la psychologie spatiale; 6) le maintien de la vie dans un système clos; et

⁴⁶ Bien que l'analyse environnementale de 2011 précède la période d'évaluation, il y a une continuité avec le programme. Ainsi, l'évaluation a considéré cette étude de même que certains résultats des projets survenus après le 1^{er} avril 2018.

⁴⁷ CENTRE DE GESTION PUBLIQUE INC. (2011). *Op. cit.*

⁴⁸ ASC (2016). *Canadian Space Exploration. Science and Space Health for the Next Decade and Beyond*. p. 8.

⁴⁹ CENTRE DE GESTION PUBLIQUE INC. (2011). *Op. cit.*

7) les diagnostics et traitements à distance – soins à distance⁵⁰. Bien que ces domaines de recherche ne soient pas nouveaux et qu'ils aient déjà bénéficié d'appui par le passé, les ateliers de consultation de 2011 ont confirmé qu'ils englobaient des domaines de recherche clés pour les missions d'exploration spatiale, y compris les missions de plus longue durée dans des conditions de microgravité. En effet, ces domaines ont entre autres été sélectionnés pour l'importance de leurs habiletés à garder les astronautes vivants, en santé, alertes et favoriser l'harmonie entre eux afin qu'ils forment une équipe efficace.

D'ailleurs, la période 2013-2018 représente une étape charnière dans le développement des nouvelles technologies (permettant par exemple des diagnostics et traitements à distance) qui permettront de soutenir la santé des astronautes lors des missions de longue durée au-delà de l'orbite basse. En effet, Microflow a été utilisé pour la première fois à bord de la SSI par Chris Hadfield en 2013⁵¹ et le biomoniteur a été envoyé à la SSI en décembre 2018⁵² pour que David Saint-Jacques en fasse une première utilisation. C'est également au cours de cette période que la technologie du bioanalyseur a été développée et utilisée pour la première fois en mai 2019⁵³ par David Saint-Jacques. Ces contributions appuient l'objectif poursuivi par l'ASC de définir et de développer des créneaux d'expertise qui résulteront en contributions significatives et uniques à des missions de grande envergure avec des partenaires spatiaux.

⁵⁰ Ibid.

⁵¹ ASC (2019). *Microflow : technologie de laboratoire miniaturisée envoyée dans l'espace*, [<http://asc-csa.gc.ca/fra/sciences/microflow.asp>].

⁵² ASC (2019). *Le biomoniteur : un maillot qui permet de suivre les signes vitaux des astronautes*, [<http://asc-csa.gc.ca/fra/sciences/biomoniteur.asp>].

⁵³ ASC (2019). *Le bioanalyseur : des résultats biomédicaux en temps quasi réel de l'espace à la terre*, [<https://www.asc-csa.gc.ca/fra/iss/bioanalyseur.asp>].

4) Émergence de nouveaux critères de recrutement pour les astronautes

Considérant que les missions spatiales de longue durée sont devenues la norme, la transition nécessite une planification minutieuse et de nombreux changements dans le programme de recrutement des astronautes. Les critères sur l'état de santé des candidats, tant physique, que psychologique et sociale, ont aussi été resserrés pour soutenir les missions de longue durée. En effet, il a été mentionné en entrevue que l'ASC et les autres agences spatiales recrutent progressivement des individus qui possèdent plus d'une spécialité et qui sont aptes à bien travailler en équipe pendant de longues périodes de temps dans un environnement confiné, ce qui sera d'autant plus important dans le futur lors de missions dans l'espace lointain. Également, les compétences interpersonnelles telles que la capacité à communiquer et à sensibiliser ont été évaluées chez les candidats lors de la dernière campagne de recrutement.

La dernière campagne de recrutement des astronautes

« Les missions spatiales habitées étant appelées à devenir de plus en plus longues, il sera important pour le Canada et ses partenaires d'incorporer au processus de sélection de plus en plus d'éléments mettant en lumière le leadership, la personnalité et le travail d'équipe. » – Entrevue avec des responsables de la dernière campagne de recrutement.

5) Les véhicules spatiaux commerciaux sont de plus en plus utilisés pour le transport d'équipement

Le retrait du programme des navettes spatiales de la NASA en 2011 a réduit le nombre d'opportunités disponibles pour effectuer des missions spatiales habitées. L'ASC collabore présentement avec d'autres agences spatiales pour accéder à l'espace et à la SSI, puis le secteur privé aux États-Unis est en train de développer une capacité de transport spatial. Tous ces changements affectent l'accès et l'utilisation de la SSI par le Canada. Dans le même ordre d'idées, il ressort des entrevues que l'utilisation de véhicules spatiaux commerciaux joue un rôle significatif dans la logistique relative aux cargos. Il a été rapporté que l'ASC prévoit tirer parti de la disponibilité accrue de moyens de transport vers la SSI lorsque les véhicules commerciaux seront testés avec succès. Afin de maintenir un corps des astronautes canadiens actif et hautement compétent, le programme s'est donné pour but d'identifier des occasions de vols spatiaux plus fréquents que la cadence permise par l'allocation d'équipage de la SSI, en prenant avantage de l'arrivée imminente des vaisseaux commerciaux de transport d'équipage dans l'horizon 2020 (SpaceX Crew Dragon et Boeing Starliner).

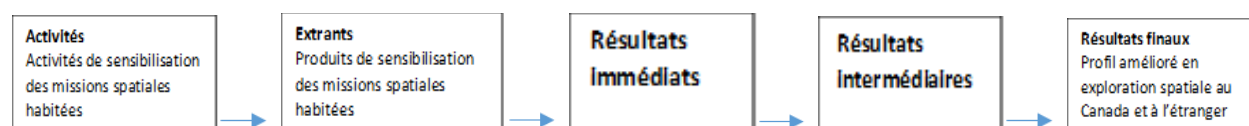
4.1.1.3 Les autres besoins non couverts par le programme

Constat : Les besoins définis et auxquels répond le programme sont exhaustifs.

En entrevue, l'ensemble des répondants étaient d'avis que les besoins identifiés et auxquels répond le programme sont exhaustifs. Aussi, bien que le Canada ait décidé de limiter les champs de recherche aux études sur la santé, l'Agence a dans le passé pris part à certaines études relatives à des champs de

recherche en sciences physiques et en botanique. Par ailleurs, quelques répondants internes ont affirmé que le besoin de sensibiliser les Canadiens envers l'exploration spatiale était un élément-clé du programme, surtout relativement aux astronautes, et que ce besoin devrait être ajouté aux cinq besoins spécifiques du programme. La sensibilisation n'est d'ailleurs pas représentée dans chacun des maillons du modèle logique du programme (voir Figure 1, section 2.2 Modèle logique du programme, activités réalisées, clientèles et partenaires). Selon le modèle logique, le programme prévoit comme activités la planification de produits de sensibilisation qui se traduisent au niveau des extrants par des produits de communications, puis, aux maillons subséquents les résultats ne sont plus directement liés à la sensibilisation.

FIGURE 3. ÉLÉMENTS DU MODÈLE LOGIQUE MONTRANT LE LIEN DES ACTIVITÉS DE SENSIBILISATION VERS LES RÉSULTATS FINAUX Y ÉTANT RELIÉS



En effet, les résultats immédiats et intermédiaires ne reflètent pas la sensibilisation et conséquemment il n'y a pas d'indicateurs de rendement à ces niveaux. Selon les responsables du programme, il est difficile d'identifier des indicateurs probants pour mesurer les résultats liés à la sensibilisation, ce qui explique qu'il n'y ait pas d'éléments représentés à tous les niveaux de la chaîne logique. En effet, le modèle logique avait été conçu de sorte qu'il y avait un saut allant des extrants aux résultats finaux en raison de cette difficulté à bien cerner des résultats et des indicateurs appropriés. Au moment de l'évaluation, des travaux étaient en cours en vue d'établir un modèle logique ministériel intégrant l'ensemble des programmes pour regrouper, entre autres, les activités de l'Agence qui contribuent à sensibiliser le public. Ceci pourrait avoir un impact sur les profils d'information sur le rendement (PIR) des programmes de l'ASC. Par ailleurs, pour certains responsables du programme et autres intervenants de l'ASC, le défi n'est pas de savoir si la sensibilisation doit être représentée dans la logique des activités et des résultats visés mais plutôt de déterminer comment mesurer l'impact réel de cette sensibilisation sur les Canadiens. Les enjeux liés à ces difficultés de mesure sont discutés à la section 4.2 Résultats.

4.1.1.4 Le degré de cohérence entre les activités, la répartition du financement et le modèle de livraison et les besoins

Constat : Le modèle de livraison est jugé adéquat et la nouvelle stratégie spatiale permet de positionner le programme pour le futur. Certains ont mentionné en entrevue que les ressources humaines limitées étaient un risque (perte d'expertise en cas de départ d'employés) mais que la petite taille de l'équipe favorisait néanmoins l'agilité.

De façon générale, le programme permet de répondre aux besoins, en tenant compte des priorités du gouvernement fédéral. Néanmoins, lors des entrevues, plusieurs répondants dont quelques répondants

externes, étaient inquiets quant à l'avenir des missions spatiales habitées dans le contexte de la fin éventuelle du financement de la SSI par les américains. Ces répondants ont mentionné en entrevue qu'il y avait un manque de positionnement stratégique de la part du Canada pour le futur de l'exploration spatiale. Fait important, les entrevues ont été réalisées avant le lancement de la nouvelle stratégie spatiale. En effet, l'annonce du 28 février 2019 par le Premier Ministre est venu jeter les bases à l'engagement du Canada en assurant la pérennité du programme, notamment en confirmant la participation du Canada au « Gateway » lunaire.

Modèle de livraison du programme

Le modèle de livraison du programme est varié; les projets de recherche sont réalisés par l'octroi de subventions et de contributions à des universités ou autres organismes publics, par l'émission de contrats à des entreprises privées qui développent par exemple des instruments ou encore par des contrats et des ententes intergouvernementales pour l'achat de services pour les astronautes (ex : pour la formation). Les spécialistes de programme travaillant à l'Agence coordonnent des activités variées comme la planification des activités de recherche (ex : les avis d'offre de participation), les missions d'astronautes et la gestion administrative du programme. Du côté de la médecine spatiale, l'Agence emploie un médecin-chef, un médecin de vol et des chargés de projet responsables entre autres de la nutrition et de l'entraînement physique des astronautes. Étant donné la taille modeste du programme, les scientifiques, ingénieurs et médecins occupent des postes uniques dans l'équipe, ce qui augmente le risque de ne pas rencontrer les résultats du programme ou de rencontrer les obligations du Canada en tant que partenaire de la SSI advenant la perte d'expertise due au départ d'une ressource. En effet, ces ressources sont difficiles à remplacer étant donné l'expertise spécialisée exigée. Le programme dispose d'un plan de contingence en ressources humaines pour diversifier les expertises des ressources en place et prévoir la relève pour les départs prévus.

Également, les responsables et spécialistes de programme ont affirmé en entrevue qu'au courant des dernières années ils faisaient face à l'enjeu de l'accroissement des exigences administratives pour l'approbation des projets. Selon eux, les exigences du processus d'approbation minent, dans une certaine mesure, la réponse aux besoins ciblés par le programme en créant de longs délais pour l'approbation des projets. En 2016, l'évaluation d'un autre programme de l'ASC avait également décrit le processus d'approbation des projets comme étant long : « le long processus de prise de décisions nécessaire pour l'approbation des missions ont limité la capacité de l'ASC de s'engager dans les missions spatiales proposées et de s'adapter à l'échéancier des agences spatiales partenaires. »⁵⁴ Une piste d'amélioration suggérée serait de mieux planifier les approbations et possiblement de faire des gains d'efficacité en regroupant les approbations requises pour les activités opérationnelles. Cet élément est repris à la section 4.3 sur l'efficience.

⁵⁴ ASC (2016). *Évaluation des programmes de missions d'astronomie spatiale et de missions planétaires*, p. 37.

4.1.2 Dans quelle mesure les objectifs du programme sont conformes aux priorités du gouvernement fédéral?

Constat : Les activités entreprises par le biais du programme cadrent avec la stratégie canadienne misant sur l'innovation comme levier de développement économique. Les missions d'exploration spatiales nécessitent le développement de nouvelles technologies de pointe, dont les applications rejoignent à la fois l'espace et le terrestre. Le recrutement de nouveaux astronautes et la participation canadienne au projet du Gateway lunaire illustrent l'engagement à long terme du Canada dans ce domaine.

Afin de favoriser l'essor économique du Canada, le gouvernement fédéral mise tout particulièrement sur l'innovation et les opportunités économiques qui en découlent. Le dévoilement, en 2017, du Plan pour l'innovation et les compétences reflète cette stratégie, qui englobe la recherche fondamentale et appliquée, le développement de nouveaux produits et services, leur commercialisation et leur positionnement sur les marchés canadiens et étrangers. Les activités entreprises par le biais du programme cadrent avec cette approche. La participation du Canada aux activités d'exploration spatiale ouvre la voie à une panoplie d'activités de recherche, de développement et de commercialisation qui sont parmi les plus innovatrices, ayant des applications tout aussi bien spatiales que terrestres. Comme l'ont souligné des intervenants consultés dans le cadre de l'évaluation, le programme offre non seulement des opportunités professionnelles et économiques à celles et ceux qui œuvrent en appui à des missions d'exploration spatiale, mais il permet également de positionner le Canada dans son ensemble comme l'une des nations s'étant attaquées à des questions et des défis parmi les plus complexes qui soient.

L'ajout en 2017 de deux nouvelles recrues aux corps d'astronautes de l'ASC et le dévoilement de la nouvelle stratégie spatiale pour le Canada en mars 2019 confirment un alignement direct entre le programme et les priorités fédérales. C'est à travers les activités du programme que le Canada pourra, entre autres, maintenir sa participation aux futures missions de la SSI ainsi qu'au projet Gateway lunaire.

4.1.3 Quels sont les rôles et les responsabilités du gouvernement fédéral relativement à l'exécution du programme?

Constat : L'ASC joue un rôle unique qui ne saurait être assumé par d'autres, que ce soit le secteur public, privé ou académique.

La justification de l'intervention publique dans l'exploration spatiale s'explique en partie par les failles d'un marché qui présente plusieurs barrières à l'entrée. Ces barrières étant par exemple, le fait que la prise de risque soit trop élevée pour intéresser des investisseurs privés, que le développement technologique soit long ou que les investissements ne mènent pas nécessairement à des opportunités commerciales.

[Traduction] Dans bien des cas, l'investissement dans une activité spatiale innovante ne produit pas nécessairement des biens, des services ou des procédés industriels qui peuvent être réservés à l'usage exclusif de l'innovateur, même s'il s'agit d'une entité privée. Ce constat est particulièrement vrai pour les missions spatiales qui peuvent inclure de nombreux acteurs, tous en bénéficiant à certains égards⁵⁵.

L'Agence joue un rôle unique en ce qui a trait aux missions spatiales habitées au Canada et à l'utilisation de la SSI et il n'existe aucun autre programme au Canada qui poursuit les mêmes résultats. L'Agence est également l'organisme fédéral ayant comme fonction de « collaborer avec les agences spatiales – ou les organismes œuvrant dans un domaine connexe – d'autres pays à l'exploitation et à l'usage pacifiques de l'espace » (Loi constitutive).

L'Agence bénéficie de nombreux partenariats pour mettre en œuvre le programme, tels que détaillés à la section 4.3.1. Ces partenariats contribuent à mettre en commun les ressources et le financement dans l'atteinte des résultats visés. Selon une responsable du programme, l'alignement avec les priorités et l'impact du programme pourraient être renforcés en collaborant davantage avec les autres ministères.

4.2 Résultats

Constat : Dans l'ensemble, les extrants et les résultats ciblés par le programme ont été atteints et surpassés. Les chercheurs et astronautes canadiens sont reconnus par la communauté internationale et semblent susciter l'intérêt de la population générale. Certains projets ont donné lieu à des utilisations sur Terre et à des réutilisations dans l'espace.

4.2.1 Données sur le rendement

Disponibilité et fiabilité des données sur le rendement

La plupart des données sur le rendement étaient disponibles pour l'évaluation et l'information fournie fiable et valide. Le portrait des résultats permet de statuer sur le rendement du programme. Néanmoins, quelques indicateurs de rendement prévus dans la stratégie de mesure du rendement dont ceux indiqués ci-après n'avaient pas été collectés : des données des médias sociaux et la revue des coupures de presse sur l'implication du Canada en exploration spatiale. Aussi, les données fournies par les communications ne couvraient pas l'ensemble des activités de sensibilisation réalisées, autant au niveau des activités, des extrants que des résultats finaux. Tel que discuté à la section 4.1.1.3, les résultats liés à la sensibilisation sont difficiles à mesurer et plusieurs efforts infructueux visant à identifier des indicateurs de rendement et des méthodes de collecte ont été faits. La conclusion demeure que les données disponibles, comme

⁵⁵ OCDE (2016). *New Trends in Space Innovation*, 27 octobre 2016, p. 17, [https://read.oecd-ilibrary.org/science-and-technology/space-and-innovation/new-trends-in-space-innovation_9789264264014-3-en#page1].

par exemple le nombre d'engagements dans les médias sociaux, comportent d'importantes limites. La sensibilisation sera donc mesurée pour une partie seulement du public visé par les activités du programme, soit les jeunes en utilisation par exemple des données sur la participation des jeunes aux activités liées aux astronautes seront collectées.

En entrevue, quelques répondants ont fait valoir que les données servant à mesurer les résultats de la recherche ne captaient pas l'aspect qualitatif des résultats. Par exemple, un projet de recherche peut mener à des publications et permettre l'emploi de PHQ et des étudiants mais peut également permettre au Canada de se positionner comme chef de file dans un domaine, générer des collaborations avec le milieu de la recherche à l'international et générer de nouvelles connaissances autres que dans les publications. Également, certains ont mentionné que les indicateurs de résultats ne sont pas toujours alignés avec ce que l'Agence cherche à atteindre; par exemple un projet pourrait générer beaucoup de PHQ mais avec un mérite scientifique moindre ou encore ne pas créer de la valeur dans un créneau ayant du potentiel. Pour pallier ces enjeux, les études de cas offrent l'avantage d'approfondir l'information disponible sur les projets et de considérer plusieurs aspects tels que le mérite scientifique, les collaborations et le rayonnement.

Parmi les autres enjeux relatifs aux données sur le rendement, certaines données collectées au niveau corporatif ne sont pas ventilées au niveau des programmes. Annuellement, un sondage auprès des entreprises du secteur spatial est envoyé à toutes les entreprises faisant affaire avec l'Agence pour recueillir entre autres, des informations sur le nombre d'employés, le chiffre d'affaires et les dépenses en recherche et développement (R-D). Ces données ne sont pas utilisables au niveau du programme puisqu'elles concernent l'ensemble des activités de l'entreprise. Le même enjeu s'applique aux données sur les interactions dans les médias sociaux qui ne peuvent être ventilées par programme.

Utilisation des données sur le rendement du programme

L'évaluation s'est penchée sur l'utilisation des données sur le rendement pour mesurer jusqu'à quel point ces données étaient utilisées. Des exemples d'utilisation à divers niveaux ont démontré que les données colligées par le programme sont utilisées pour différentes fins, servant de base commune pour communiquer les résultats :

- Au Comité de revue et d'intégration des investissements (CRII), les données sont présentées pour démontrer les tendances des résultats passés et viennent appuyer la prise de décisions en matière d'investissements.
- Lors de l'élaboration de documents destinés au Conseil du Trésor pour demander de nouveaux investissements (ex : présentation au CT, Mémoire au Cabinet) les données sur le rendement du programme sont imbriquées à un ensemble d'autres données (ex : données économiques de la direction générale Politiques) pour alimenter la section sur les résultats et démontrer les résultats passés.

Les données servent au niveau stratégique et tactique et le fait que certains indicateurs soient mesurés depuis plusieurs années, constituant des séries de données longitudinales, permet de démontrer la pertinence des investissements passés par l'utilisation des données.

Évolution de la mesure du rendement du programme

Des améliorations ont été apportées à la stratégie de mesure du rendement du programme depuis le 1^{er} avril 2013, notamment une rationalisation au niveau du nombre d'indicateurs de rendement. Depuis la mise en œuvre de la Politique sur les résultats (1^{er} juillet 2016), plusieurs changements ont été apportés et la mesure du rendement du programme continue d'être repensée et ce, tant au sein du programme Exploration spatiale qu'à l'échelle de l'Agence grâce à un travail de concertation entre les différents intervenants internes responsables des données sur les résultats (directions Programmes et planification intégrée, Politiques, puis Audit et évaluation).

4.2.2 Dans quelle mesure les extrants attendus ont été réalisés?

De 2013 à 2018, les cibles d'extrants prévues dans la stratégie de mesure du rendement du programme ont été atteintes ou surpassées. Les différentes recherches scientifiques et la conception d'instruments scientifiques et de sous-systèmes spatiaux ont débuté, étaient en cours et ont été réalisées de 2013 à 2018, surpassant les cibles établies dans la stratégie de mesure du rendement tel qu'illustré au tableau 6.

TABLEAU 6. RECHERCHES/INSTRUMENTS SCIENTIFIQUES ET SOUS-SYSTÈMES SPATIAUX DÉBUTÉS, EN COURS OU TERMINÉS ENTRE LE 1^{ER} AVRIL 2013 ET LE 31 MARS 2018.

INDICATEURS	CIBLES	RÉSULTATS
Nombre d'études habilitées (Op 1.1)	8	10
Nombre d'études soutenues en cours d'élaboration (Op 1.2)	5	5
Nombre d'études soutenues en cours (études opérationnelles réalisées conformément aux exigences) (Op 1.3)	9	9
Nombre d'instruments (scientifiques ou médicaux) en cours d'élaboration (Op 2.1)	10	10
Nombre d'instruments fournissant des données sur une base régulière (Op 2.2)	2	2
Nombre d'engins spatiaux ou de sous-systèmes en exploitation (Op 3.2)	1	1

La liste des recherches et des instruments scientifiques est détaillée à l'Annexe A.

Temps d'utilisation de la SSI

L'allocation du Canada en temps d'utilisation de la SSI est de 2,3%, ce qui représente environ 20 heures de temps d'équipage par incrément de six mois. Lorsque les partenaires n'utilisent pas leur allocation en intégralité, les autres partenaires peuvent utiliser le temps restant. Ainsi, la cible de temps d'utilisation de 100% du temps par année a été surpassée sauf en 2015-2016 où 87% du temps alloué a été utilisé. Selon un répondant en entrevue, l'ASC a pratiquement doublé cette allocation en collaborant avec des partenaires de la SSI pour certaines recherches (p. ex., en utilisant un même échantillon pour différentes recherches).

TABLEAU 7. TEMPS D'UTILISATION DE LA SSI ENTRE LE 1^{ER} AVRIL 2013 ET LE 31 MARS 2018

INDICATEUR	CIBLE	RÉSULTATS	DÉTAILS
Temps d'équipage consacré à des expériences scientifiques - temps prévu par rapport au temps alloué (Op 1.4)	100%	En moyenne 116%	La cible de 100% a été surpassée à chaque année sauf en 2015-2016 où 87% du temps alloué a été utilisé.

Missions d'astronautes et Médecine spatiale opérationnelle

Pour la période 2013-2018, les cibles d'extrants sont quasiment toutes atteintes et le corps d'astronautes canadiens comprenait quatre astronautes, soit deux en formation et deux qualifiés et médicalement certifiés, donc prêts à être assignés à une mission spatiale. Lors des entrevues, une forte proportion de toutes les catégories de répondants ont insisté sur la grande qualité des astronautes canadiens. Bien que le Canada compte un petit groupe d'astronautes (le corps d'astronautes actuel est composé de quatre personnes), les répondants dont les partenaires de la SSI et les intervenants externes considèrent que ceux-ci sont hautement qualifiés et capables de bien performer sous pression. Les astronautes canadiens participent à plusieurs activités de sensibilisation et suscitent l'inspiration du public. La qualité des astronautes canadiens a été reconnue et appréciée par les partenaires internationaux et s'est traduite par des rôles de leadership pour ces astronautes. Par exemple, Chris Hadfield a été commandant de la SSI pour les expéditions 34/35; tandis que Jeremy Hansen est actuellement responsable de la nouvelle classe d'astronautes à la NASA; et dans le passé Dave Williams et Steve MacLean ont occupé d'importants postes de gestion à la NASA. Également, Chris Hadfield et David St-Jacques occupaient tous deux le siège gauche du vaisseau Soyouz, ce qui en faisait des copilotes. Du côté des activités de sensibilisation, de 2014-2018, environ 350 présentations ont été effectuées par les astronautes canadiens et plusieurs autres activités de communication ont été réalisées, comme par exemple des entrevues avec les médias et des présentations à des événements scientifiques.

La dernière campagne de recrutement des astronautes

L'annonce des deux nouveaux astronautes a eu diverses retombées médiatiques :

- Le dévoilement des deux nouveaux astronautes au siège social de l'ASC a généré un total de 488 mentions dans les médias entre le 17 et le 30 juillet 2017;

- L'ASC a coordonné plus de 45 entrevues auprès de divers médias tels que The Canadian Press, CBC, GLOBAL, La Presse, etc.

- Le 5 juillet 2017, la publication de la présentation des deux nouveaux astronautes sur Reddit a engendré un nombre important de visites, soit la troisième publication détenant le plus de visites depuis le retour sur Terre de Chris Hadfield.

Le Canada possède des astronautes qui sont médecins, ce qui a été considéré comme particulièrement utile et le deviendra encore plus lors des missions dans l'espace lointain. Par rapport au suivi de santé à long terme des astronautes retraités, celui-ci est effectué par la NASA sur une base volontaire, ce qui explique que le résultat pour cet indicateur est un peu en-deçà de la cible.

Chris Hadfield et les expéditions 34 et 35

Les activités et événements entrepris par l'ASC et ses partenaires lors des expéditions 34 et 35 incluent :

- 33 événements en direct de l'espace (p. ex. un concert en direct avec Chris Hadfield, entrevues médiatiques, le dévoilement du nouveau billet de cinq dollars de la banque du Canada);
- 88 vidéos scientifiques ont été produites avant et pendant la mission et celles-ci ont été visionnées par plus de 42 millions de personnes et utilisées à travers le Canada par des enseignants afin d'inspirer les étudiants à la science;
- 7 000 étudiants d'environ 300 écoles ont communiqué et interagi avec Chris Hadfield dans l'espace;
- une compétition scientifique nationale a eu lieu;
- 12 267 nouveaux items (p. ex. radio, web, TV, revues de presse) ont été mentionnés entre le 11 décembre 2012 et le 12 juin 2013 (un nombre six fois plus élevé que la moyenne annuelle pour l'ASC);
- les nouvelles technologies à bord de la SSI ont été largement diffusées sur les médias sociaux incluant sur Twitter et M. Hadfield a pris part à un Reddit AMA (Ask me Anything);
- un jeu virtuel permettant d'opérer le bras canadien sur le site de l'ASC a été visité plus de 10 000 fois; et
- un partenariat avec l'Office national du film du Canada (ONF) a permis le lancement d'une plateforme Web interactive d'apprentissage sur l'espace destinée aux enseignants et étudiants (265 enseignants s'y sont engagés, rejoignant 20 000 étudiants).

De plus, les entrevues menées auprès d'intervenants internes et externes indiquent que la troisième mission de M. Hadfield est toujours considérée comme étant l'un des grands succès du programme spatial canadien.

TABLEAU 8. RÉSULTATS DES INDICATEURS D'EXTRANTS LIÉS AUX ASTRONAUTES

INDICATEURS	CIBLE	RÉSULTATS	DÉTAILS DES RÉSULTATS 2013-2018
% des astronautes actifs pouvant être affectés à des missions spatiales (jugés aptes sur les plans technique et médical) (Op 4.1)	100%	100%	En 2013-2014, les trois astronautes canadiens Chris Hadfield, Jeremy Hansen et David Saint-Jacques jugés aptes sur les plans technique et médical. Chris Hadfield a pris sa retraite en juillet 2013.
Nombre d'astronautes canadiens affectés à des missions spatiales (Op 4.2)	2	2	Chris Hadfield (C2) de décembre 2012 à mai 2013 David Saint-Jacques (C3) de décembre 2018 à juin 2019
Nombre d'astronautes admissibles dont la santé est surveillée à long terme (Op 4.3)	80% (cible établie depuis 2016-2017 seulement)	72%	Surveillance de la santé à long terme d'astronautes retraités : - En 2013-2014 : 5 des 7 astronautes retraités - En 2014-2015 : 5 des 7 astronautes retraités - Les années suivantes : 6 des 8 astronautes retraités

4.2.3 Dans quelle mesure les résultats immédiats attendus ont été réalisés?

Les résultats immédiats ont été non seulement atteints mais, dans le cas du PHQ et des étudiants, les cibles établies ont été largement surpassées.

TABEAU 9. ATTEINTE DES RÉSULTATS IMMÉDIATS CIBLÉS

INDICATEUR	CIBLE	RÉSULTATS	DÉTAILS DES RÉSULTATS 2013-2018
Nombre de PHQ travaillant avec un chercheur principal ayant reçu du financement.	20 par année	58 par année en moyenne	
Nombre d'étudiants (Baccalauréat., Maîtrise, Doctorat) et post-doctorants travaillant à des projets financés par l'ASC.	5 par année	13 par année en moyenne	
Nombre d'astronautes assignés en tant que membre d'équipage (« <i>principal ou de relève</i> »).	1 aux 5 ans	1	Chris Hadfield a occupé le poste de commandant de la SSI pendant sa mission.
Nombre de missions spatiales dans lesquelles un vaisseau ou sous-systèmes spatial canadien ou un instrument ou recherche scientifique était en opération.	2 par année, soit 10 au total	10 missions	10 missions distinctes : BCAT-1, BPRég, MVIS, Radi-N2, Vascular, AHiS, Marrow, Vascular Echo, Tbone, Wayfinding*.

*Voir l'annexe A pour le détail des instruments et recherches scientifiques.

Les chercheurs principaux travaillant aux projets de recherche qui reçoivent du financement de l'Agence ont employé du PHQ et des étudiants pour les aider dans leurs travaux, en moyenne 71 personnes étaient affectées annuellement à ces projets, contribuant au développement d'une main-œuvre hautement spécialisée au Canada et ultimement à positionner le Canada à la fine pointe de la science et de la technologie.

4.2.4 Dans quelle mesure les résultats intermédiaires attendus ont été réalisés?

Les résultats intermédiaires ont été pour la plupart surpassés, sauf pour les publications scientifiques qui sont très légèrement en-dessous de la cible visée. Ces résultats comprennent la participation du milieu universitaire et de l'industrie, les publications scientifiques et les réutilisations ou applications terrestres d'instruments ou de vaisseaux et sous-systèmes développés pour l'espace.

Résultats liés à la participation du milieu universitaire et de l'industrie

- Chaque année, en moyenne cinq établissements universitaires canadiens (universités et hôpitaux universitaires) ont participé à un ou deux projets de recherche au cours de la période visée surpassant la cible annuelle établie à trois par année. Le nombre d'universités participant aux missions est en croissance, passant de 2-3 en 2013-2014 et 2014-2015 à six de 2015-2016 à 2016-2017 et finalement à huit en 2017-2018.

- Chaque année, en moyenne six entreprises canadiennes ont participé à un projet de recherche au cours de la période visée, surpassant la cible annuelle de trois par année. Le nombre d'entreprises participantes s'est accru, passant de deux en moyenne les deux premières années à huit par année pour les trois années suivantes.
- Également, 17 équipes de recherche d'établissements universitaires ou d'entreprises ont demandé à l'ASC des lettres d'appui pour participer à des missions étrangères, soit pour les projets PerWaves et NASA HERO.

Microflow et le système bioanalyseur (Bio-A)

Le projet Microflow a généré trois publications scientifiques revues par les pairs qui ont été citées au total une douzaine de fois. Par rapport à la visibilité du programme, de multiples articles sur le Microflow ont été publiés sur les sites web de la NASA et de l'ASC ainsi que dans des médias locaux.

En 2019, Alentic Microsciences Inc. a reçu un montant de 2,9 millions de dollars de l'Agence de promotion économique du Canada atlantique afin d'appliquer la technologie de bioanalyse sur Terre et de la promouvoir à travers le monde, permettant de générer des résultats de tests sanguins en moins de cinq minutes, peu importe la localisation, et à l'aide d'une simple gouttelette de sang. Des informateurs clés ont souligné le potentiel du développement d'un secteur de bio analyse et de bio surveillance au Canada.

Applications terrestres et ré-utilisations des résultats issus des projets financés

- Des recherches scientifiques financées par l'ASC, débutées en 1998, ont mené au développement de l'instrument OSTEO. Cet instrument a participé à deux missions de la navette spatiale, en 1998 et en 2003, en tant que e-OSTEO avec l'ASC et avec l'ASE à bord d'un FOTON-BION russe en 2007. Plus récemment, la NASA a adapté la technologie de la SSI en OSTEO-4 qui a été utilisée en 2015. En 2018, l'ASE a fait voler la technologie OSTEO sur la SSI sous le nom InVitroBone. Après la mission STS-107, le matériel a été géré par Calm Technologies.
- Biomonitor : la compagnie Carré Technologies a lancé une version commerciale nommée AstroSkin (Hexoskin étant le produit terrestre), en tant que ligne de vêtements intelligents avancés pouvant être utilisés par des organisations à des fins de recherche en santé, aérospatial, sécurité, défense et en recherche pharmaceutique.

Études relatives au système cardiovasculaire

D'après les données fournies par les chercheurs principaux des six projets, ces projets ont donné lieu à 62 présentations aux médias et ont été présentés lors de 50 conférences. En outre, de 2008 à 2019, les différents projets ont cumulé 29 années de recherche au total employant en moyenne six universitaires par année et deux autres chercheurs. Au total, les projets financés en lien avec le cardiovasculaire ont généré : 10 publications non-revues par les pairs et 44 publications revues par les pairs (entre 2007 et 2018) qui ont été citées en moyenne 16 fois chacune.

Résultats liés aux publications scientifiques

Au cours de la période d'évaluation, soit 2013 à 2018, 47 publications revues par les pairs issues du financement du programme ont été publiées, soit un peu en-deçà de la cible prévue de 50 publications pour la période. Cet écart peut s'expliquer par la nature des publications : la publication des résultats de la recherche en sciences de la santé dans l'espace peut s'avérer difficile parce que les études portent sur moins de sujets et prennent plus de temps que les études comparables menées sur Terre. Par ailleurs, ces publications font l'objet de nombreuses collaborations nationales et internationales étant donné le caractère international de la SSI :

- Au total, ces 47 publications ont été citées 254 fois dans d'autres articles scientifiques, soit en moyenne 5,4 fois chacune;
- 58% des publications ont fait l'objet d'une collaboration internationale avec 10 pays impliquant des co-auteurs provenant de 26 institutions d'enseignement et de recherches étrangères et de quatre agences spatiales étrangères;
- Les 10 pays ayant collaboré à la rédaction des 47 publications sont par ordre d'importance la Russie (11 publications), les États-Unis (10 publications), la France et le Royaume-Uni (quatre publications chacun) et l'Italie (trois publications). Enfin, cinq pays ont collaboré à la rédaction d'une publication chacun : le Danemark, le Japon, l'Allemagne, la Belgique et l'Australie. Les autres agences spatiales ont collaboré au total à la rédaction de sept publications.

En somme, les résultats intermédiaires démontrent une collaboration marquée tant du milieu universitaire canadien et étranger qu'avec l'industrie canadienne. Cette collaboration a des retombées positives sur le profil du Canada à l'étranger et permettent l'avancement des connaissances concernant la capacité des humains à vivre dans l'espace. Également, certains projets donnant lieu à des réutilisations dans l'espace ou à des utilisations sur Terre contribuent à l'économie canadienne et à d'autres bénéfices sociaux comme par exemple les soins de santé dans les régions éloignées.

4.2.5 Dans quelle mesure les résultats finaux attendus ont été réalisés?

Tel qu'expliqué précédemment, peu de données sur les résultats finaux pouvaient être produites lors de l'évaluation, la plupart des données ont été recueillies auprès des répondants en entrevue. Ces résultats partiels sont toutefois positifs et démontrent que le programme atteint les résultats escomptés et ce, surtout en ce qui a trait à la qualité de la science et à la promotion du Canada sur le plan international.

Impact des publications scientifiques et qualité de la science

L'Agence utilise un nouvel indicateur pour faire rapport sur la performance ministérielle en ce qui a trait à la diffusion des publications scientifiques. Il s'agit de la moyenne des citations relatives (MCR)⁵⁶. Dans le domaine de la médecine spatiale et sciences de la vie, la MCR pour l'ensemble des chercheurs au Canada s'élevait à 1,02 (159 publications canadiennes) pour la période 2011 à 2017. En isolant seulement les chercheurs canadiens ayant reçu du financement de l'ASC, la MCR est de 1,46 (66 publications)⁵⁷.

Par rapport à la qualité de la science, le Canada est considéré par les principaux intervenants (y compris un astronaute canadien, de nombreux répondants internes, de nombreux universitaires et représentants de l'industrie et quelques organisations externes) comme un chef de file mondial dans le domaine de la recherche en santé humaine notamment dans des sujets comme l'atrophie musculaire, l'ostéoporose, la perception sensorielle, la psychologie et le système cardiovasculaire.

Études relatives au système cardiovasculaire

Les données partielles des publications de 2009 à 2018, soit pour 27 des 44 publications, démontrent que 26% des publications sont parmi les 10% les plus citées dans le monde, deux articles ayant été cités plus de 60 fois chacun.

En ce qui a trait plus particulièrement au projet BP-Reg, ce projet a permis au docteur Richard Hughson et à son équipe de poursuivre leurs recherches dans le domaine cardiovasculaire et de maintenir une bonne réputation à travers le monde dans ce domaine. Entre 2016 et 2018, le Dr. Hughson a obtenu quatre prix de reconnaissance, dont la médaille pour l'accomplissement scientifique exceptionnel de la NASA qui lui a été décernée.

La recherche menée par le Canada est bien perçue par la communauté internationale, comme souligné par de nombreux répondants internes, quelques répondants du monde universitaire et quelques répondants d'agences externes. Les chercheurs canadiens sont régulièrement invités à présenter des exposés lors de réunions internationales, à publier dans des revues réputées et à faire partie de panels et d'organisations internationales.

Aussi, les partenaires de la SSI utilisent un processus externe d'examen par les pairs pour s'assurer que seules les expériences de recherche de la plus haute qualité sont prises en compte. Un répondant interne et un universitaire ont indiqué que les chercheurs canadiens réussissent généralement bien dans ce processus – la majeure partie des recherches ayant été sélectionnée par un comité international

⁵⁶ La Moyenne des citations relatives se calcule en divisant le nombre de citations reçues pour une publication donnée par le nombre moyen de citations reçues pour les publications publiées la même année dans la même discipline. Une moyenne supérieure à 1 indique qu'une publication est plus citée que la moyenne mondiale dans sa discipline, [<https://sites.google.com/a/etsmtl.net/bibliometrie/indicateurs-bibliometriques>].

⁵⁷ La différence entre le nombre de publication (n=47) vu dans les résultats intermédiaires et les 66 publications de la MCR s'explique par le fait que la période est différentes (2011-2017) vs (2013-2018). Aussi, la méthodologie de la MCR est différente puisqu'elle inclut l'ensemble des publications des chercheurs financés contenant un mot-clé de la requête utilisée pour la MCR alors que ceux des résultats intermédiaires sont validées par les spécialistes du programme de l'ASC responsables des projets financés.

d'examen par les pairs et qu'à chaque mission un astronaute choisi de participer à une ou des expériences de recherche canadiennes, démontrant la pertinence et la conception rigoureuse des expériences canadiennes.

Des chercheurs canadiens ont gagné des prix internationaux (voir encadré sur les prix remportés par le Dr. Hughson), à titre d'exemples :

- Le Dr. Peter Suedfeld a reçu l'Ordre du Canada en 2019⁵⁸. Dr. Suedfeld est professeur émérite au département de psychologie de l'Université de Colombie-Britannique et a notamment été co-chercheur de la première expérience psychosociale du Canada à bord de la SSI⁵⁹.
- Le Dr. Giuseppe Iaria a reçu en 2017 le prix du chercheur établi (« Established Researcher Award ») de l'Université de Calgary, entre autres grâce à ses travaux sur les effets des vols spatiaux sur le cerveau des astronautes⁶⁰.

Un répondant de l'ASC, un astronaute canadien et un répondant d'un organisme externe ont souligné l'importance de ces succès compte tenu du financement limité fourni par l'ASC.

La dernière campagne de recrutement des astronautes

Les résultats finaux en termes de visibilité pour la campagne de recrutement :

- La couverture médiatique a généré une valeur publicitaire de 14 M\$;

- La campagne a généré plus 22 millions d'empreintes médiatiques et 925 000 engagements sur les médias sociaux;

- La page web des astronautes a été vue à plus de deux millions de reprises, les vidéos à 396 000 reprises;

- Plus de 800 jeunes Canadiens ont été rejoints par des présentations données par les candidats.

Profil du Canada à l'étranger et sa visibilité dans la recherche et les activités d'exploration

Selon les répondants, le rôle du Canada en tant que partenaire de la SSI, ainsi que les expériences qu'il a menées et les astronautes qu'il a entraînés, lui ont valu une reconnaissance internationale. Certains éléments de l'image de marque (p. ex., le drapeau canadien sur le Canadarm et placer la robotique canadienne (SEM) sur le billet de cinq dollars) ont considérablement fait connaître les réalisations du Canada dans l'espace. L'engouement du public envers les activités de l'Agence, soit en moyenne 3,2 millions d'interactions sur les médias sociaux par année de 2013 à 2018⁶¹, est élevé et témoigne d'un réel intérêt envers l'espace. Malgré sa modeste contribution financière, le Canada est traité comme un partenaire égal sur la SSI et est considéré comme l'un des principaux pays dans le domaine spatial.

⁵⁸ GOUVERNEUR GÉNÉRAL DU CANADA (2019). *La gouverneure générale annonce 83 nouvelles nominations au sein de l'Ordre du Canada*, Site officiel, [https://www.gg.ca/fr/media/nouvelles/2019/la-gouverneure-generale-annonce-83-nouvelles-nominations-au-sein-de-lordre-du-canada]

⁵⁹ Voir l'étude *At Home in Space : se sentir chez soi à la Station spatiale internationale*, [https://www.asc-csa.gc.ca/fra/sciences/at-home-in-space.asp]

⁶⁰ Voir l'étude *Wayfinding : Les effets des vols spatiaux sur le cerveau des astronautes*, [http://asc-csa.gc.ca/fra/sciences/wayfinding.asp]

⁶¹ Les données sont pour l'ensemble de l'Agence.

Également, un répondant d'un organisme externe et deux répondants internes ont fait remarquer que les Canadiens ont une capacité énorme en matière de diplomatie et de rassemblement.

4.2.6 La mise en œuvre du programme a-t-elle eu des répercussions imprévues négatives ou positives?

L'évaluation n'a identifié aucune répercussion imprévue négative ou positive et des questions telles que les impacts environnementaux du programme (ex : débris spatiaux) n'ont pas été considérés dans la portée de l'évaluation et aucune considération à cet égard n'est ressorti des entrevues. Par ailleurs, certains résultats indirects ont été mentionnés lors des entrevues comme les collaborations internationales dont ont pu bénéficier les chercheurs canadiens suite à la notoriété acquise après avoir réalisé avec succès des recherches dans le cadre du programme. Tel que détaillé dans la section précédente (4.2.5), certains de ces chercheurs ont remporté d'importants prix nationaux et internationaux. Également, des entreprises ayant développé des instruments scientifiques pour le programme ont conclu des contrats subséquents au Canada et à l'étranger, avec d'autres agences spatiales par exemple, grâce à l'expertise et au renom acquis. Par exemple, une entreprise canadienne affirme que son expérience dans l'espace lui a inspiré le développement d'un produit innovant : une prise multifonctions adaptable. La notoriété acquise grâce à la participation de cette entreprise à des projets dans l'espace l'a aidé à attirer des investisseurs. Le produit développé est maintenant vendu sur le site d'un grand détaillant de commerce électronique.

Enfin, selon un répondant interne en entrevue, la crédibilité et l'influence acquise au fil des années par l'expertise des gens travaillant au programme fait en sorte que le Canada est bien perçu sur la scène internationale, par exemple à l'Organisation des Nations unies (ONU) et dans les interactions avec les pays qui développent leur programme spatial. Les missions spatiales habitées sont l'aspect le plus visible du programme et ont un impact positif sur le profil du Canada et le programme spatial dans son entier vis-à-vis des autres pays.

4.3 Efficience et économie

Constat : Le modèle de partenariat de la SSI offre au Canada des opportunités scientifiques et technologiques qui lui permet de bénéficier d'un laboratoire de recherche unique dans l'espace. Les ressources humaines œuvrant au programme sont jugées compétentes et le temps alloué à l'utilisation de la SSI est maximisé.

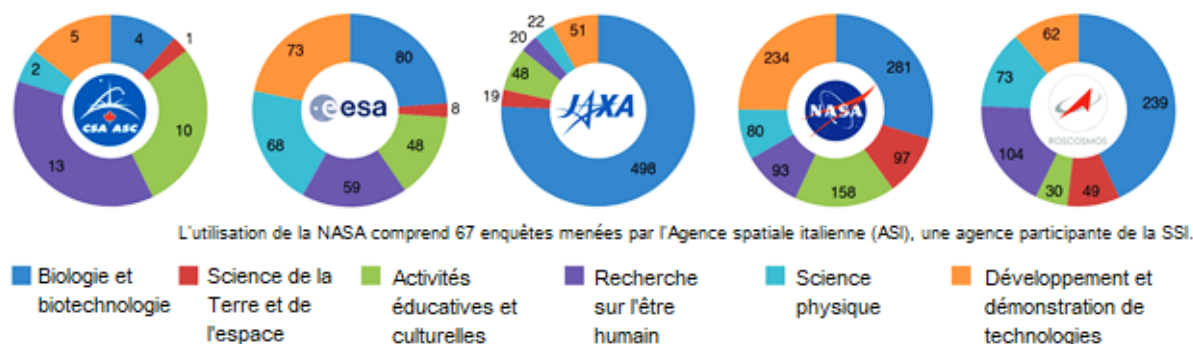
L'évaluation s'est concentrée sur les aspects qualitatifs de l'efficience étant donné l'absence de programme comparable et la nature variée des activités du programme. En effet, la taille du programme de l'ASC est beaucoup plus petite que celle des autres partenaires de la SSI, ce qui rend l'analyse quantitative, par exemple à l'aide de ratio financier, peu significative. L'évaluation s'est attardée aux thématiques suivantes : l'effet de levier des partenariats et les éléments ayant nui ou facilité la mise en œuvre du programme.

4.3.1 Effet levier des partenariats

Partenariats internationaux. La coopération internationale requise pour des projets aussi importants et coûteux que la SSI permet au Canada de participer aux percées scientifiques et technologiques qui en découlent. En effet, grâce à la SSI, le Canada a eu l'opportunité de prendre part au plus grand projet scientifique et technologique qu'ait connu l'humanité jusqu'à présent. De plus, le Canada a fait progresser l'industrie de haute technologie (aérospatial et robotique) en s'impliquant dans la SSI. De manière générale, il a été démontré que les technologies développées pour l'espace ont également conduit à des applications sur Terre, dans des domaines aussi étendus que la prévision météorologique, la micro-électronique, la cartographie des ressources, l'énergie solaire et la chirurgie au laser, pour ne citer que quelques exemples.

Les agences spatiales partenaires de la SSI tendent à prioriser des domaines de recherche particuliers. La figure 4 ci-dessous permet de visualiser à la fois le nombre absolu et la part relative des enquêtes par discipline de recherche menées par les agences partenaires de la SSI. Bien que la capacité de chaque agence à mener des recherches est dictée et limitée par ses crédits de vol d'équipage respectifs⁶², la collaboration avec les autres partenaires de la SSI a permis à chaque agence de multiplier considérablement son impact (voir Tableau 10)⁶³.

FIGURE 4 : DOMAINES DE RECHERCHE POUR CHACUNE DES AGENCES PARTENAIRES DE LA SSI



⁶² Ces crédits sont régis par les accords relatifs à la SSI et sont principalement basés sur la contribution financière ou technologique de chaque agence.

⁶³ ISS PROGRAM SCIENCE FORUM (2018). *International Space Station : Benefits for humanity*, 3^e édition, [En ligne], [https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/benefits-for-humanity_third.pdf].

TABLEAU 10 : LES BÉNÉFICES DE LA SSI AUGMENTENT GRÂCE À LA COLLABORATION INTERNATIONALE⁶⁴

Agence partenaire	Agence seulement	Collaboration (à titre d'hôte)	Études entreprises	Collaboration (à titre de participant)	Nombre total d'études	% de hausse grâce à la collaboration
ASC	25	10	35	29	62	83 %
ASE	250	86	336	301	637	90 %
JAXA	435	223	658	130	788	20 %
NASA*	749	194	943	107	1050	11 %
Roscosmos	324	233	557	251	808	45 %
TOTAUX			2 529	818	3 345	32 %

*L'utilisation de la SSI par la NASA comprend 67 études menées par l'Agence spatiale italienne (ASI), qui participe au programme de la SSI.

En ce sens, de nombreux répondants internes considèrent qu'il serait préférable de renforcer et d'accroître les partenariats internationaux existants, ainsi que de créer de nouveaux partenariats dans le domaine de la recherche en santé et sciences de la vie dans l'espace avec d'autres agences spatiales. Selon un responsable du programme, l'allocation de 2,3% du Canada est trop petite pour pouvoir offrir des occasions commerciales mais il y aurait lieu de considérer un programme de partenariat en recherche sur la santé entre des entités canadiennes et des entités américaines. Ce partenariat pourrait permettre d'offrir du financement à des chercheurs canadiens qui s'associeraient à des chercheurs américains. Ceci constituerait un arrangement avantageux à toutes les parties et ouvrirait un volet privé d'utilisation de la SSI. Également, plusieurs opportunités semblent s'offrir à l'ASC; que ce soit avec les pays ayant déjà une capacité spatiale établie ou avec d'autres pays émergents. Selon l'un des intervenants internes, la coopération internationale sera de plus en plus importante avec les futures missions qui seront elles aussi de plus en plus complexes et coûteuses. Dans le même ordre d'idées, un autre répondant a mentionné qu'il serait plus sensé, d'un point de vue économique, que toutes les agences spatiales jouent « dans la même équipe ».

⁶⁴ Ibid.

Partenariats à l'échelle nationale. Le Canada a tiré parti de la recherche scientifique dans plusieurs domaines liés aux sciences de la vie et de la santé en découvrant des nouvelles façons de traiter les maladies, en créant de la technologie ou en faisant de nouvelles avancées en sciences de la vie et de la santé. Le Canada finance divers programmes tels que le Programme des chaires de recherche du Canada, le Conseil national de recherches du Canada et d'autres subventions et contributions aux leaders de l'industrie, aux chercheurs universitaires et aux centres de recherche publics⁶⁵. Au cours de la période visée par l'évaluation, le programme a collaboré avec de nombreux partenaires à l'échelle nationale, soit d'autres ministères et agences gouvernementales, l'industrie de la recherche et le milieu académique.

Étude de cas bioanalyse – projet Microflow

Plusieurs bonnes pratiques ont été soulignées par les membres ayant participé au projet. Celles-ci incluent :

- *Les équipes chevronnées de l'ASC, de la NASA et d'INO ont travaillé efficacement ensemble; la collaboration était positive et axée sur les résultats.*
- *Les habiletés de gestion du projet et la communication claire et efficace de l'INO et de l'ASC ont été soulevées à de multiples occasions par la NASA. Ceci a contribué à l'efficacité et à la rapidité des délais d'approbation à travers les différentes phases du projet. Le projet a mis en place une structure d'équipes ayant des rôles clairs ainsi que des canaux de communications assurant une compréhension commune des mandats.*

Ministères et autres agences gouvernementales

L'ASC collabore sans cesse avec plusieurs agences et ministères gouvernementaux fédéraux afin de développer et d'effectuer des projets qui bénéficieront non seulement à l'exploration spatiale, mais également au gouvernement du Canada et aux Canadiens en général. Ces ministères et organismes fédéraux ont noué des relations de travail avec l'ASC afin de développer des projets et des programmes dans les domaines des communications par satellite, de l'environnement, de la gestion des ressources, de la sécurité et de la souveraineté, ainsi que de la science et de la technologie. Globalement, ces collaborations ont produit des programmes bénéfiques tout en participant davantage au développement de la technologie spatiale⁶⁶. Il s'agit notamment des agences et ministères fédéraux suivants : les Instituts de recherche en santé du Canada (IRSC), le Ministère de la Défense nationale, Santé Canada et le Conseil national de recherches du Canada (CNRC).

La dernière campagne de recrutement des astronautes

Plusieurs collaborations entre l'ASC avec ses partenaires ont été un gage de succès pour cette campagne. Tout d'abord, la collaboration entre les centres militaires canadiens et l'ASC pour l'évaluation des candidats a été soulevée comme ayant été très efficace, incitant certains partenaires internationaux à explorer la possibilité de procéder de façon similaire en vue de la sélection de leurs propres astronautes.

⁶⁵ CENTRE DE GESTION PUBLIQUE INC. (2011). *Op. cit.*

⁶⁶ *Ibid.*

Recherche industrielle

La recherche industrielle au Canada est concurrentielle au plan international dans plusieurs créneaux des sciences de la vie et de la santé. En effet, les leaders de l'industrie investissent généralement des millions de dollars dans la recherche et le développement. La recherche et les développements intéressants dans le secteur privé comprennent notamment l'étude des cellules osseuses en microgravité (ASC, 2011)⁶⁷.

Un répondant interne a fait valoir qu'il était difficile d'avoir de nouveaux joueurs industriels dans le domaine spatial. Le seuil d'entrée dans le secteur spatial est en général assez élevé. Cela s'explique notamment par le fait que le secteur spatial est une niche très particulière qui limite énormément le nombre de joueurs et qu'il y a peu de chances qu'une entreprise puisse produire à la chaîne dans ce domaine. De plus, les critères requis pour aller dans l'espace sont très exigeants. De ce fait, le répondant considère que s'il y avait une façon d'amener davantage de joueurs, ce serait très bon pour l'économie, car on parle de l'économie de savoir, des gens très qualifiés, mais qui sont dans des domaines de niches.

Le Canada possède des industries robustes dans un grand nombre de domaines différents applicables à l'espace et un répondant a mentionné que l'ASC devrait envisager d'établir des partenariats avec de plus petites compagnies ou avec des organisations faisant partie de secteurs qui ne sont pas traditionnellement liés au secteur spatial.

Milieu académique

Le Canada bénéficie de certaines des plus prestigieuses universités du monde. Les recherches menées dans les universités canadiennes sont novatrices, innovantes et elles portent sur des domaines de recherche. Certaines recherches pourraient s'avérer pertinentes pour le milieu spatial, tels qu'un diagnostic microbiologique portable, la santé mentale, les énergies renouvelables, l'effet des radiations, la recherche génétique ainsi que la physiologie du sommeil⁶⁸, pour ne nommer que quelques exemples.

4.3.2 Modèle de la SSI

Il a été mentionné en entrevue que les protocoles d'entente sous-jacents à l'IGA, de même que la gouvernance et les multiples comités et groupes de travail entre les partenaires, sont efficaces et bien rodés. De plus, considérant que la nécessité d'expédier des échantillons sur Terre pour les analyser est moins efficace que de développer ces capacités d'analyse à bord de la SSI, l'ASC travaille présentement à développer de telles habiletés. La contribution du Canada dans ce domaine est significative. En effet, la période 2013-2018 représente une étape charnière dans le développement des nouvelles technologies canadiennes qui permettront de soutenir la santé des astronautes lors des missions de longue durée au-

⁶⁷ CENTRE DE GESTION PUBLIQUE INC. (2011). *Op. cit.*

⁶⁸ *Ibid.*

delà de l'orbite basse : Microflow⁶⁹ a été utilisé pour la première fois à bord de la SSI par Chris Hadfield en 2013 et le biomoniteur⁷⁰ a été envoyé à la SSI en décembre 2018 pour que David Saint-Jacques en fasse une première utilisation. C'est également au cours de cette période que la technologie du bioanalyseur⁷¹ a été achevée, ce qui lui a permis d'être utilisée pour la première fois en mai 2019 par David Saint-Jacques. Enfin, c'est en 2014 que les ingénieurs et les scientifiques du Conseil national de recherches du Canada (CNRC) ont commencé à concevoir la technologie du MicroPREP⁷², un « laboratoire sur puces » qui est déjà considéré comme un atout significatif pour les futures missions d'exploration habitées dans l'espace lointain.

L'examen documentaire et les entrevues réalisées dans le cadre de la présente évaluation ont toutefois fait ressortir deux facteurs qui pourraient éventuellement représenter un enjeu d'efficacité pour le programme à long terme.

- 1- **Certaines nations ne participent pas aux projets de recherche.** Bien qu'il soit indéniable que les partenariats internationaux existants permettent au Canada d'accroître les bénéfices de ses recherches et de ses investissements (voir section 4.3.1), la quasi-totalité des répondants interrogés souhaiteraient que l'ASC collabore davantage avec d'autres agences spatiales. L'un des répondants internes a par ailleurs précisé qu'il serait plus sensé, d'un point de vue économique, que toutes les agences spatiales jouent « dans la même équipe » et que l'ASC développe des partenariats avec des pays émergents. Selon les répondants en entrevue, l'accroissement des partenariats accentueraient l'effet de levier des partenariats et serait donc bénéfique pour l'efficacité du programme à long terme. Toutefois, la collaboration du Canada avec certains pays représente un enjeu en ce qui a trait aux transferts de technologie ou à la propriété intellectuelle.
- 2- **Contribution et opportunités de vols.** Historiquement, le Canada a négocié ses occasions de vols en pourcentage du temps de vol (qui est de 2,3% en vertu de la contribution initiale du Canada à la SSI) plutôt qu'en terme de quantité de vols, comme l'ont fait d'autres pays (p. ex., l'Italie). À titre d'exemple, la dernière mission de Chris Hadfield en 2008 a été négociée pour une durée de 142 jours en orbite. Il a été mentionné en entrevue que cette façon de procéder pourrait éventuellement devenir un enjeu pour l'ASC au fil du temps. En effet, les missions de longue durée deviennent progressivement la norme et cela fait en sorte que d'autres pays bénéficient aujourd'hui de plus de vols de longue durée vers la SSI que le Canada.

⁶⁹ ASC (2019). *Microflow : technologie de laboratoire miniaturisée envoyée dans l'espace*, Op. cit.

⁷⁰ ASC (2019). *Le biomoniteur : un maillot qui permet de suivre les signes vitaux des astronautes*, Op. cit.

⁷¹ ASC (2019). *Le bioanalyseur : des résultats biomédicaux en temps quasi réel de l'espace à la terre*, Op. cit.

⁷² ASC (2019). *MicroPREP : des percées dans la purification des échantillons*, [<http://asc-csa.gc.ca/fra/sciences/microprep.asp>].

4.3.3 Modèle de l'ASC

Gouvernance de l'ASC

Taille de l'ASC. Le Canada est le plus petit partenaire de la SSI, ce qui ne l'empêche toutefois pas d'accomplir de très grandes réalisations. Également, le Canada fait bonne figure sur la scène internationale en ce qui a trait au domaine spatial; que ce soit pour son apport en science et en robotique, son efficacité, son efficience ou encore pour la qualité de sa collaboration.

Avantages : La petite taille de l'ASC n'est pas un obstacle à son efficience. Au contraire, il semble que cela lui permette d'être agile et efficiente dans certaines situations. Dans le même ordre d'idées, l'Agence s'adapte bien et rapidement aux situations et aux imprévus, car il est souvent facile d'apporter des changements stratégiques ou organisationnels lorsque cela est requis. D'ailleurs, l'efficacité de l'ASC a été soulignée à plusieurs reprises en entrevue, compte tenu de son petit budget. À titre d'exemple, l'ASC est réputée pour la qualité de ses expériences scientifiques qui sont pourtant effectuées avec très peu de moyens comparativement à ceux des autres partenaires de la SSI. Il est donc possible d'affirmer que la petite taille de l'ASC représente un atout en ce qui a trait à l'efficacité et à l'efficience de ses actions.

Inconvénients : Bien que le Canada soit bien perçu à l'international pour ses aptitudes dans le domaine spatial, de nombreux intervenants ont mentionné en entrevue que le pays risque d'être progressivement mis à l'écart par ses partenaires internationaux. Selon eux, la petite contribution de l'ASC est indissociable de sa petite influence dans les stratégies importantes qui touchent la SSI. En effet, le budget alloué à l'ASC représente bien souvent une fraction du budget des autres partenaires de la SSI, ce qui donne moins de poids à l'ASC et moins de capacité à prendre un rôle plus prépondérant en médecine spatiale par exemple. Enfin, selon quelques répondants, la petite taille de l'ASC est un enjeu pour le développement des employés (compétences opérationnelles) et leurs opportunités de carrière. En effet, ce sont souvent les mêmes employés qui effectuent les mêmes rôles au sein des mêmes équipes pendant plusieurs années. Vu les limites sur l'enveloppe salariale du programme, cela peut également avoir des conséquences sur l'Agence, puisqu'il devient alors plus difficile de renouveler et de rajeunir le personnel du programme à long terme.

Charge administrative relative aux processus d'approbation. En entrevue, certains ont indiqué que l'augmentation des exigences administratives des dernières années avait créé une pression supplémentaire sur les ressources humaines; d'une part par l'augmentation des délais d'approbation et d'autre part par la mise en place d'un nouveau processus d'approbation. En effet, depuis octobre 2017 chaque proposition d'investissement dépassant 75 K\$ est présentée au Comité de revue et d'intégration des investissements (CRII). Les présentations sont formalisées et les spécialistes de programme doivent s'assurer de rassembler toute l'information nécessaire, et de manière itérative, ce qui demande beaucoup de temps selon eux. Ceci étant dit, les répondants en entrevue sont d'accord sur le bien-fondé du processus qui, plus exigeant qu'auparavant en terme de préparation, est tout de même plus rigoureux.

Priorités et objectifs de l'Agence à long terme. Il a été mentionné plus d'une fois en entrevue qu'il serait préférable d'obtenir une planification des activités du programme à long terme qui soit mandatée par le gouvernement fédéral, afin de connaître la vue d'ensemble et la portée générale de ces activités. L'annonce de la Stratégie spatiale pour le Canada au printemps 2019 et les travaux actuels concernant la planification à long terme devraient avoir un impact positif sur cet élément.

Gouvernance du programme et livraison

Personnel hautement qualifié et reconnu. Une forte majorité de répondants reconnaît que les ressources humaines affectées au programme sont très compétentes, collaboratives et efficaces. En particuliers, les astronautes sont généralement très satisfaits du travail qui est effectué sur Terre pour les assister lors des missions spatiales. Ils se sentent écoutés et considèrent que l'ASC les soutient de manière efficace dans l'atteinte de leurs objectifs. Par ailleurs, il a été suggéré en entrevue que l'ASC pourrait créer davantage d'opportunités pour favoriser le développement et la mobilité de ses employés. Par exemple, l'ASC gagnerait à effectuer des rotations de personnel du programme par le biais d'affectations internationales afin de leur donner une vue plus globale de la situation mondiale et d'aider le Canada à entretenir de bonnes relations avec ses principaux partenaires internationaux.

La dernière campagne de recrutement des astronautes

Le comité de sélection a été décrit comme ayant été grandement motivé, professionnel et détenant les compétences requises pour accomplir son mandat. Les principes de gestion de projets ont été appliqués de façon rigoureuse, maximisant la tenue d'activités parallèles et l'engagement de l'équipe. La communication claire et efficace par l'adoption d'outils visuels rappelant les différents échéanciers et livrables utilisés par tous les partenaires impliqués a contribué à instaurer une vision commune et stratégique pour tous les membres.

L'équipe de recrutement a reçu le Prix d'excellence de service public du Gouverneur général. La distinction mentionne notamment que tous ses membres ont grandement contribué au professionnalisme, à l'esprit de corps, à la créativité et à l'engagement envers l'excellence de l'équipe.

Chris Hadfield et les expéditions 34 et 35

L'approche du Canada par rapport à l'entraînement de ses astronautes est perçue très favorablement par les intervenants consultés, puisque ce processus est multidimensionnel, couvrant un large éventail de compétences intellectuelles et comportementales (compétences spécialisées et générales).

La capacité des astronautes canadiens d'assumer des responsabilités croissantes en lien avec les activités de la SSI reflète ce constat.

Astronautes compétents : Tous les intervenants interrogés sur le sujet sont d'avis que les astronautes de l'ASC sont compétents et très bien formés. Cela est d'ailleurs mis en exergue par le fait que les astronautes canadiens bénéficient de plus en plus de positions prestigieuses au sein des missions spatiales auxquelles ils participent. À titre d'exemple, Chris Hadfield a été le premier canadien à devenir commandant de la SSI lors de l'Expédition 35, puis David Saint-Jacques a occupé le rôle de copilote du Soyouz quelques années plus tard.

Temps d'utilisation de la SSI et temps inutilisé des partenaires récupéré par l'ASC. Le programme maximise le temps d'utilisation de la SSI, soit en moyenne 116% du temps alloué au Canada pour la recherche a été utilisé au cours de la période évaluée (voir 4.2.2 Extrants). Par ailleurs, il ressort des entrevues que l'ASC dispose des conditions idéales pour effectuer beaucoup de sciences de manière intensive avant 2024, année à laquelle le financement de la SSI pourrait cesser si le Canada décidait de ne pas poursuivre sa participation à la SSI. La prochaine station spatiale prendra beaucoup de temps à atteindre le niveau actuel de la SSI, il semble donc y avoir une certaine urgence d'agir. De plus, les missions spatiales qui s'inscriront dans le « Gateway » lunaire seront beaucoup plus contraignantes en ce qui concerne les opportunités de recherche. La période qui s'étend d'aujourd'hui à 2024 est donc une période charnière pendant laquelle il faut exploiter le temps des astronautes au maximum.

Cela dit, il a été rapporté en entrevue que lorsque du temps d'utilisation se libère en temps réel sur la station (à cause d'un imprévu, d'un bris ou autre raison), les partenaires sont invités à proposer des activités de réserve pour combler ce temps. Dans certains cas, l'ASC a réussi à utiliser ces occasions pour réaliser des expériences scientifiques supplémentaires. L'ASC réussit donc à saisir les occasions qui se présentent. De plus, il a été mentionné que l'Agence possède des façons de maximiser le temps par collaboration, que ce soit en combinant des activités avec ses partenaires ou en faisant des ententes de partenariats. Il peut également y avoir des échanges en contribuant à différents aspects du programme de la SSI et ainsi obtenir du temps supplémentaire pour nos astronautes. L'Agence favorise les activités aptes à donner des résultats probants, car le principal critère de sélection est la qualité.

Aspect stratégique et consultatif. Les informations recueillies dans les entrevues laissent penser qu'il serait bénéfique de choisir des objectifs à long terme (p. ex., sur une période d'au moins cinq ans), de déterminer quels sont les moyens avec lesquels le programme peut y arriver ainsi que de documenter la planification stratégique à long terme de l'ASC. Il importe de préciser que des travaux sont déjà en cours pour élaborer cette dernière.

4.3.4 Existe-il des moyens plus rentables d'exécuter le programme actuel?

Participer à des vols commerciaux est l'une des alternatives proposées par certains répondants lors des entrevues. En effet, il a été mentionné que les vols commerciaux augmenteraient le temps d'utilisation mais que cela engendrerait des coûts élevés. Toutefois, d'autres répondants ont mentionné que cette option serait difficile à envisager puisque notre temps d'utilisation est calculé en fonction de notre contribution à la SSI. Le Canada a donc un temps d'utilisation de 2,3%, indépendamment de l'éventuelle possibilité d'amener un astronaute sur la station au moyen d'un vol commercial. Ces considérations montrent qu'il faudrait encore mener des analyses pour démontrer la rentabilité de l'utilisation de vols commerciaux, dans le but d'augmenter l'utilisation de la SSI par le programme.

Par ailleurs, selon les plans prévus du programme de la SSI, de nouveaux véhicules de transport des astronautes qui seront exploités par les firmes privées SpaceX et Boeing permettront d'avoir un quatrième astronaute affecté à la station. L'ajout du quatrième astronaute ajoutera 35 heures d'utilisation aux 35

heures existantes, qui seront partagées entre les partenaires, doublant le temps pour effectuer des expériences.

4.4 Quelles sont les répercussions du programme sur les groupes de l'ACS+?

Constat : L'ASC a intégré directement des considérations liées à l'ACS+ dans sa campagne de recrutement des deux nouveaux astronautes de même que dans certaines études.

Durant l'exercice financier 2016-2017, le gouvernement fédéral a publié sa *Politique sur les résultats* et sa *Directive sur les résultats*, lesquelles clarifient les attentes relatives à l'analyse comparative entre les sexes plus (ACS+) que les agences et ministères fédéraux doivent mettre en œuvre. Ce cadre politique exige, entre autres, que les gestionnaires de programmes intègrent les considérations liées à l'ACS+ dans la gestion de leurs programmes et activités et que l'évaluation de ces programmes et activités intègre également ces considérations. En mars 2017, l'ASC a adopté sa propre directive relative à l'ACS+, qui permet d'opérationnaliser cette exigence dans le cadre précis de l'agence.

Dans ce contexte, il est important de noter, d'abord, que ces différentes initiatives relatives à l'ACS+ ont été mises en œuvre à la fin de la période couverte par la présente évaluation. Tout de même, les constats ayant émergé de l'évaluation indiquent que l'ASC a géré ses activités liées aux missions spatiales habitées et à l'utilisation de la SSI de façon à ce qu'il n'y ait pas d'incidence négative sur les groupes diversifiés de femmes et d'hommes.

Les efforts de l'ASC se sont particulièrement manifestés lors de la dernière campagne de recrutement d'astronautes, où Jennifer Sidey-Gibbons et Joshua Kutryk sont venus rejoindre, en 2017, les rangs du groupe d'astronautes canadiens. En particulier, les activités suivantes ont été entreprises :

- Tous les membres du comité de recrutement ont reçu une formation sur l'ACS+ avant d'entreprendre leur mandat;
- L'ASC s'est assurée que toutes les régions du pays, ainsi que les femmes et les minorités visibles soient directement ciblées par la campagne de recrutement. Des consultations ont été tenues à cet égard avec Condition féminine Canada (maintenant le ministère Femmes et Égalité des genres Canada);
- Des efforts ont également été déployés pour engager les communautés nordiques et les communautés autochtones. À cet égard, des consultations ont eu lieu avec Relations Couronne-Autochtones et Affaires du Nord Canada.
- Finalement, la campagne de recrutement incluait des activités de promotion auprès de domaines professionnels qui ne sont pas traditionnellement associés au programme d'exploration spatiale (par exemple dans le domaine de la nutrition).

L'évaluation indique que les considérations liées à l'ACS+ ont également été intégrées à d'autres activités liées à l'exploration spatiale, dont les études sur l'alitement et l'isolement appuyées par le groupe des Sciences de la santé et de la vie de l'ASC, en collaboration avec l'ASE.

L'intégration de l'ACS+ dans les activités entreprises pour les Missions spatiales habitées et l'Utilisation de la SSI est un processus continu qui nécessitera des efforts soutenus de l'Agence. Les entrevues menées dans le cadre de l'évaluation confirment que, bien que les objectifs de l'ACS+ sont généralement bien compris, les intervenants souhaitent parfaire leur compréhension de l'étendue de cette exigence et la façon la plus adéquate d'intégrer ces considérations à leur travail. Un appui continu apparaît donc comme étant nécessaire et souhaité.

5 Plan d'action

	Responsabilités Organisation/ Fonction	Réponse de la direction	Détail du plan d'action	Calendrier
Recommandation				
S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.

ANNEXE A : Liste des recherches scientifiques et instruments ayant reçu du financement du programme entre le 1^{er} mars 2013 au 31 mars 2018

Nom de la recherche/ instrument	Description	Années	Chercheur principal	Université ou entreprise	Partenaire(s)	Domaine(s)
Recherches scientifiques						
BCAT	Cette série d'expériences a permis d'étudier les effets de la microgravité sur les colloïdes - des particules microscopiques en suspension dans un autre milieu, tel un liquide. On retrouve des colloïdes dans différents produits commerciaux, comme la peinture, les composés de polissage de matériel électronique et la mayonnaise. Les résultats de l'étude pourraient inclure des façons novatrices de produire des plastiques ou de prolonger la durée de vie de différents produits de consommation.	2009-2014	Barbara Frisken	Université Simon Fraser	ZIN Technologies Incorporated (USA)	Sciences physiques
Radi-N	Les expéditions Radi-N utilisent des détecteurs à bulles pour mesurer le rayonnement neutronique à bord de l'ISS, afin d'aider les chercheurs à mieux comprendre les risques d'exposition pour les astronautes. Les détecteurs à bulles conçus au Canada sont les dosimètres de rayonnement neutronique les plus précis au monde. Ces études servent à identifier la partie du rayonnement spatial qui est composée de neutrons et à mieux comprendre le rôle que joue le rayonnement neutronique dans les dommages ou les mutations génétiques pouvant causer des cataractes et le cancer.	2009-2010	Harry Ing	Bubble Technology Industries Inc.	Institute of Biomedical Problems Russian Academy of Sciences	Risques pour la santé associés aux vols spatiaux
Radi-N2		2012-2014	Martin Smith	Bubble Technology Industries Inc.	Institute of Biomedical Problems Russian Academy of Sciences, UOIT	Risques pour la santé associés aux vols spatiaux
Vascular	L'étude Vascular vise à déterminer l'impact du vol spatial de longue durée sur les vaisseaux sanguins qui tendent à durcir dans l'espace, ce qui ressemble beaucoup au processus de vieillissement qu'on connaît sur Terre. En comparant des échantillons de sang prélevés avant, pendant et après les vols dans l'espace, les chercheurs espèrent élaborer des contre-mesures empêchant les problèmes cardiovasculaires chez les astronautes et appliquer ces connaissances à la lutte contre ces même problèmes cardiovasculaires associés au vieillissement sur Terre.	2009-2014	Richard Lee Hughson	Université de Waterloo		Corps humain dans l'espace
BP Reg	L'adaptation du système circulatoire à l'espace a une incidence sur la pression artérielle, de sorte que les astronautes courent un risque d'évanouissement et d'étourdissement lorsqu'ils reviennent sur Terre. L'expérience BP Reg a pour but de prédire quels astronautes seraient susceptibles de subir la plus grande chute de pression artérielle et auraient besoin de contre-mesures pour aider à atténuer les effets secondaires. BP Reg a une incidence importante sur le diagnostic de personnes sur Terre, en particulier chez les aînés, qui sont susceptibles de s'évanouir.	2012-2015	Richard Lee Hughson	Université de Waterloo		Corps humain dans l'espace
Microflow	Microflow était le tout premier cytomètre de flux miniaturisé mis à l'essai à bord de la SSI. Par cet essai, l'ASC démontrait la technologie de la cytométrie en flux qui permet de mesurer différents éléments biologiques, comme certains types de cellules sanguines ou d'hormones. Le but ultime de ce projet est de créer un petit instrument sécuritaire pouvant être utilisé pour prodiguer des soins médicaux en temps réel pendant les vols spatiaux et dans des communautés éloignées sur Terre.	2013	Luchino Cohen	ASC	Ozzy Mermut (INO)	Technologie d'essai
At Home in Space	L'étude At Home in Space (Chez soi dans l'espace) vise à comprendre comment se développe une culture commune à bord de la SSI, où cohabitent pendant des mois des membres d'équipage d'origines diverses, et comment les astronautes modifient leur environnement pour qu'il soit plus accueillant. Les résultats pourraient contribuer à rendre le séjour spatial plus confortable et à diminuer le stress des astronautes et de leur famille lié aux longues séparations. De nombreuses personnes sur Terre pourraient bénéficier des résultats de cette étude, dont les aînés vivant seuls ou en résidence, les militaires et les gens qui habitent ou travaillent dans des endroits éloignés, confinés ou isolés.	2015-2018	Phyllis Jonson	UBC		Sciences humaines et sociales

Nom de la recherche/ instrument	Description	Années	Chercheur principal	Université ou entreprise	Partenaire(s)	Domaine(s)
Recherches scientifiques (suite)						
Marrow	Dans l'espace, la microgravité transforme la moelle osseuse et les cellules sanguines qu'elle produit. Les risques d'anémie, d'infections et de sensibilité accrue aux rayonnements guettent les astronautes en mission de longue durée. Pour atténuer ces risques, l'étude MARROW permet de mesurer les changements subis par les astronautes en microgravité grâce à l'imagerie par résonnance magnétique et à des échantillons de sang et d'haleine. Les résultats pourraient également aider à contrer les effets de la sédentarité sur Terre, et faciliter la réadaptation des patients alités, des personnes à mobilité réduite et des aînés.	2015-2020	Guy Rudel et Odette Laneuville	Université d'Ottawa		Corps humain dans l'espace
T-Bone	L'étude Tbone étudie l'effet de la microgravité sur la qualité des os, qui subissent un vieillissement accéléré dans l'espace. La masse osseuse perdue par les astronautes lors d'une mission spatiale est presque entièrement récupérée à leur retour sur Terre. On connaît toutefois peu les conséquences des vols spatiaux sur la solidité des os. La nouvelle technologie d'imagerie 3D utilisée permet de mesurer non seulement la densité des os, mais aussi d'examiner leur structure et leur solidité. En plus d'aider les astronautes, les découvertes de Tbone pourraient contribuer à déterminer quelles sont les personnes prédisposées à la perte osseuse sur Terre et à formuler des stratégies de traitement personnalisées.	2015-2020	Steven Boyd	Université de Calgary		Corps humain dans l'espace
Vascular Echo	L'étude Vascular Echo s'intéresse aux mécanismes sous-jacents au durcissement accéléré des artères des astronautes afin de mettre au point des interventions permettant de ralentir le vieillissement de leur système vasculaire, mais aussi de celui des humains sur Terre. Elle permet d'examiner les changements que subissent le cœur et les vaisseaux sanguins pendant un séjour dans l'espace et de suivre le rétablissement des astronautes à leur retour.	2015-2020	Richard Lee Hughson	Université de Waterloo	Philippe Arbeille, Université de Tours Kevin Shoemaker, Université Western	Corps humain dans l'espace
Vection	À travers l'utilisation d'un système de réalité virtuelle, Vection examinera comment la microgravité influe sur la manière dont les astronautes perçoivent leurs mouvements dans l'espace. Le phénomène 'vection' est une sensation induite de mouvement provoquée lorsqu'un individu observe un ou des objets en mouvement alors que celui ou celle-ci est bel et bien immobile. On y attribue certains risques opérationnels dans l'espace comme par exemple une mauvaise estimation de la direction et la vitesse des objets. Les astronautes sont confrontés à ce risque lors de l'exécution de tâches de robotique comme la saisie de vaisseaux sans pilote avec le Canadarm2. Cette étude vise à déterminer comment les membres d'équipage évaluent les distances et leurs propres mouvements lorsqu'ils sont plongés dans une réalité virtuelle. Les connaissances tirées de l'étude seront utiles dans la mise au point de méthodes de déplacement plus sécuritaires à bord de la Station spatiale internationale. Vection comporte trois objectifs tels que suit : (1) Eclaircir comment l'information visuelle crée l'illusion de déplacement en microgravité. (2) Explorer si la microgravité influe sur la manière dont les astronautes perçoivent leur environnement. (3) Modéliser les effets de l'environnement spatial sur le traitement de l'information visuelle. L'étude pourrait également permettre des interventions/applications bénéfiques sur Terre, notamment : (1) une meilleure compréhension de la maladie de Parkinson, qui affecte le mouvement et la posture. (2) Un potentiel d'utilisation de la réalité virtuelle comme outil permettant le rétablissement des victimes d'AVC, ainsi que des patients affectés par des troubles de l'équilibre en général. (3) Une meilleure compréhension des effets du vieillissement sur la perception visuelle. (4) Amélioration potentielle des robots utilisés en télé-chirurgie.	2016-en cours	Laurence Harris	Université York		Corps humain dans l'espace
Wayfinding	Pour créer une carte mentale précise de sa position et de son environnement, le cerveau traite de l'information visuelle, somesthésique et vestibulaire (oreille interne). Un milieu en apesanteur comme celui de la Station spatiale internationale (SSI) est déroutant pour le système d'orientation interne des astronautes. En microgravité, le cerveau ne peut pas utiliser ses signaux habituels pour cartographier l'emplacement d'éléments importants comme les modules spatiaux et les sorties de secours. Les difficultés d'orientation et de navigation des astronautes peuvent influencer leur capacité d'exécuter des tâches complexes dans l'espace, comme des manœuvres de robotique. Les résultats de l'étude Wayfinding nous permettront d'en savoir davantage sur les modifications structurelles et fonctionnelles subies par le cerveau dans ces conditions particulières. Ils aideront les astronautes à mieux se préparer aux missions spatiales et à s'en remettre plus facilement.	2016-2022	Giuseppe Iaria	Université de Calgary	Jacob Bloomberg (NASA)	Corps humain dans l'espace

Nom de la recherche/ instrument	Description	Années	Chercheur principal	Université ou entreprise	Partenaire(s)	Domaine(s)
Recherches scientifiques (suite)						
Vascular Aging	L'étude Vascular Aging porte sur le système cardiovasculaire et cherche, entre autres, à déterminer pourquoi précisément les artères des astronautes perdent de leur élasticité. Vascular Aging, se penchera aussi sur d'autres risques pour la santé auxquels sont exposés les astronautes, comme le rayonnement et la résistance à l'insuline, un facteur de risque du diabète de type 2. En étudiant comment le système cardiovasculaire réagit dans l'espace, nous pouvons mieux comprendre le processus de vieillissement de nos artères sur Terre. Finalement, elle suivra le rétablissement des astronautes après leur retour de la station.	2017-2023	Richard Lee Hughson	Université de Waterloo	Kevin Shoemaker, Université Western Danielle Greaves, Université de Waterloo, Ontario Philippe Arbeille, Université François-Rabelais Martina Heer, Université de Bonn, Allemagne Carole Leguy, Centre aérospatial allemand Laurence Vico, Université de Lyon	Corps humain dans l'espace
ImmunoProfile	Immuno Profile sera la première expérience scientifique visant à surveiller le système immunitaire des astronautes durant toute la durée de leur mission à bord de la Station spatiale internationale (SSI). Elle permettra d'examiner les changements dans les hormones du système immunitaire et les globules blancs, la première ligne de défense contre les pathogènes comme les bactéries et les virus.	2017-Fin de la SSI	Chen Wang	Sinai Health System	NASA	Risques pour la santé associés aux vols spatiaux
Étude HANA - Blaber	Les astronautes ressentent souvent un vertige et des étourdissements lorsqu'ils se mettent debout après l'atterrissage et peuvent ainsi s'évanouir et tomber. Cette étude a examiné les interactions entre le contrôle des contractions musculaires posturales et la régulation du cœur et des vaisseaux sanguins en réponse aux changements de la pression sanguine d'une personne qui se lève debout. L'alitement en position inclinée tête vers le bas (APITB) a servi à simuler les changements physiologiques qui surviennent chez l'humain durant les vols spatiaux. Les effets de l'APITB sur les interactions cardioposturales ont été évalués avant et après une période d'APITB. La régulation cardiovasculaire a également été suivie durant la période d'alitement. D'après l'étude, les changements adaptatifs dans les contrôles cardiovasculaires et posturaux durant l'APITB au déconditionnement après l'APITB.	2016-2019	Andrew Blaber	Université Simon Fraser		Corps humain dans l'espace
Étude HANA - Trudel (alitement)	Les conditions qui éliminent les charges mécaniques comme l'alitement et le vol spatial, ont un effet négatif sur les populations de cellules de la moelle osseuse et leurs fonctions. La moelle osseuse abrite des cellules mésenchymateuses et des cellules hématopoïétiques essentielles à la survie. En situation de microgravité, la composition générale de la moelle change de façon irréversible, passant de la domination de la moelle rouge (cellules hématopoïétiques) à celle de la moelle jaune (gras), ce qui nuit à la production de cellules sanguines. L'étude a utilisé des méthodes non invasives pour mesurer la teneur en gras de la moelle et des analyses biochimiques pour mesurer les cellules sanguines en circulation chez les sujets étudiés. Les résultats de l'étude pourraient servir à évaluer de possibles contremesures pour limiter l'accumulation de gras dans la moelle.	2016-2019	Guy Trudel	Université d'Ottawa		Corps humain dans l'espace
Étude HANA - Jasmin	L'atrophie musculaire est associée à une diminution de la qualité de vie et de l'espérance de vie. Pour mieux comprendre les mécanismes qui mènent à l'atrophie musculaire, il est essentiel d'en comprendre les fondements génétiques, cellulaires et moléculaires. Cette connaissance est également nécessaire pour mettre au point des contremesures et approches de réadaptation efficaces. Cette étude visait à découvrir de nouvelles cibles d'interventions thérapeutiques pour contrer ou prévenir les changements nuisibles touchant la masse, la structure et le fonctionnement des muscles squelettiques qui sont causés par la maladie ou la microgravité.	2016-2018	Bernard Jasmin	Université d'Ottawa		Corps humain dans l'espace

Nom de la recherche/ instrument	Description	Années	Chercheur principal	Université ou entreprise	Partenaire(s)	Domaine(s)
Recherches scientifiques (suite)						
Étude HANA - Suedfield	Les équipages de deux stations de l'Antarctique ont enregistré des conversations ainsi que des journaux intimes et autres textes lus à haute voix. Les chercheurs ont analysé le contenu et les aspects techniques (rythme, vitesse, tonalité, volume, etc.) de ces enregistrements pour y détecter le stress, les émotions positives et négatives, les problèmes et les solutions, les relations interpersonnelles, etc. L'étude a permis d'élaborer des mesures combinatoires de la façon dont les gens réagissent lorsqu'ils passent un an ensemble en milieu confiné et isolé. Les résultats permettront de détecter les premiers signes de détresse ou de mauvaise adaptation et d'intervenir rapidement pour améliorer le bien-être dans les stations polaires, les vaisseaux spatiaux et dans divers types de situations de vie isolée, y compris les conditions de vie de nombreuses personnes âgées.	2016-2019	Peter Suedfeld	UBC		Corps humain dans l'espace
Matroyska III - Rando	L'ASC a conclu une entente de mise en œuvre avec le DLR pour participer à l'étude pluriannuelle Matroyska III. Dans cette étude, on se servira d'une plateforme Phantom (Rando) pour simuler un torse humain et mesurer des doses de rayonnement au niveau des organes internes. Ces données sont importantes pour évaluer plus exactement les risques et mettre au point des contremesures de radioprotection. La participation canadienne comprend l'intégration de technologies canadiennes, à commencer par les détecteurs à bulles. Les données provenant de plusieurs autres instruments seront mises à la disposition de la communauté canadienne de radioprotection dans l'espace.	2018-Fin de la SSI	Martin Smith	BTI	DLR	Risques pour la santé associés aux vols spatiaux
Jasmin – uOttawa	Bernard Jasmin, de l'Université d'Ottawa, a collaboré avec Angèle Chopard (France) à une série d'études d'alitement parrainées par l'ASE. Une subvention non sollicitée a été accordée au Dr Jasmin pour qu'il lui permette de terminer des études sur l'expression génique dans des tissus musculaires recueillis au cours de l'étude d'alitement avec supplémentation en protéines et en bicarbonate qui a été réalisée au DLR en 2011-2012.	2012-2013	Bernard Jasmin	Université d'Ottawa	Dr. Chopard était chercheur invité à l'Université d'Ottawa à ce moment	Risques pour la santé associés aux vols spatiaux
Hughson - Waterloo Étude CCISS	Six objectifs ont été visés; les données recueillies au cours de l'étude CCISS (Cardiovascular Control on ISS) ont été analysées pour atteindre ces objectifs, ce qui a permis d'accroître l'impact de l'étude CCISS.	2010-2011	Richard Hughson	Université de Waterloo		Risques pour la santé associés aux vols spatiaux
Instruments						
Essai du système biomonitor Astroskin	Le premier prototype du maillot de biosurveillance Astroskin a été développé dans le cadre d'un contrat avec Carré Technologies. Le dispositif a été mis à l'essai dans le cadre de plusieurs activités : 1) dans des laboratoires de l'UQAM et dans le cadre de l'expédition Antarctik; 2) le cadre de la mission Human Exploration Research Analog (HERA) de la NASA; 3) le dispositif a été intégré à l'AMES's Medical Data Architecture (MDA) de la NASA, un prototype d'infrastructure de gestion des données médicales pour les futures missions au-delà de l'orbite terrestre basse. Les essais en laboratoire et les essais d'utilisation pendant la mission Antarctik ont été effectués dans le cadre d'un contrat avec l'Université du Québec à Montréal (UQAM). Le soutien technique pour tous les essais a été assuré par un contrat de service avec Carré Technologies. À la suite de ces essais, Carré Technologies a pu apporter des améliorations à ses dispositifs expérimentaux et commerciaux.	2014-2019	UQAM: Dr. Alain Comtois Carré: Jean-Francois Roy	Université du Québec à Montréal Carré Technologies	NASA Ames	Risques pour la santé associés aux vols spatiaux Soins médicaux autonomes
PRET Validation	L'ASC a développé un prototype d'outil PRET (Performance Readiness Evaluation Tool) afin de fournir un outil d'évaluation neurocognitive pour les missions spatiales de longue durée qui évaluerait objectivement l'état de préparation des astronautes avant d'exécuter des tâches critiques. L'outil a été conçu pour offrir une capacité d'évaluation neurocognitive au moyen d'un simulateur de réalité virtuelle en 3D comprenant des tests neurocognitifs intégrés de façon transparente. Les tests sont conçus pour évaluer la mémoire de travail, la concentration, le balayage et la perception visuels, l'attention divisée, la planification et la prise de décision, la connaissance de la situation, l'attention soutenue et la fatigue. Le prototype a été soumis à des essais d'utilisation et de validation dans le cadre de la mission M500 de l'IBMP (Russie) de 2010 à 2012 et au Cognitive Engineering Lab de l'Université Carleton de 2012 à 2016. Les résultats ont été publiés dans le site Web Gouvernement ouvert du Canada.	2010-2016	Matthew Brown	Université de Carleton		Risques pour la santé associés aux vols spatiaux

Nom de la recherche/ instrument	Description	Années	Chercheur principal	Université ou entreprise	Partenaire(s)	Domaine(s)
Instruments (suite)						
LSRS : Carré	Cinq études de concepts ont été effectuées au début du projet LSRS. C'est une première étape dans le but d'identifier des systèmes canadiens de recherche en science de la vie qui ont une assez grande maturité pour être adaptés à l'utilisation dans l'espace, sur la SSI, pour supporter l'identification, la caractérisation et la mitigation de risques associés au vol spatial humain. Deux technologies sont retenues pour l'étape suivante et sont devenues le Bio-Analyzer et le Bio-Monitor.	2013-2014	N.d.	Carré Technologies	N.d.	Risques pour la santé associés aux vols spatiaux
LSRS : Comdev			N.d.	ComDev	N.d.	Risques pour la santé associés aux vols spatiaux
LSRS : Calm			N.d.	Calm Technologies	N.d.	Risques pour la santé associés aux vols spatiaux
LSRS : Bubble Technology			N.d.	Bubble Technologies	N.d.	Risques pour la santé associés aux vols spatiaux
LSRS : INO			N.d.	INO		Risques pour la santé associés aux vols spatiaux
LSRS - Bio M	Une nouvelle technologie prêt-à-porter a été conçue pour mesurer et enregistrer les signes vitaux des astronautes à bord de la Station spatiale internationale (SSI) pendant leurs activités quotidiennes. Ce système, qui consiste en un maillot intelligent et une application mobile spécialisée pour tablette, aidera à surveiller l'état de santé des astronautes et permettra de nouvelles découvertes scientifiques en mesurant continuellement leurs données physiologiques.	2017-Fin de la SSI	N.d.	Carré Technologies/Calm Technologies	N.d.	Risques pour la santé associés aux vols spatiaux
LSRS - Bio A	Le bioanalyseur est un nouvel outil de la taille d'une console de jeu vidéo que les astronautes à bord de la Station spatiale internationale (SSI) utiliseront pour analyser facilement divers fluides corporels, comme le sang, la salive et l'urine. Il suffit de quelques gouttes – pas besoin de seringue! – pour obtenir rapidement les résultats d'analyses biomédicales clés.	2017-Fin de la SSI	N.d.	Honeywell	N.d.	Risques pour la santé associés aux vols spatiaux
Spectomètre de neutrons compact canadien	Les détecteurs à bulles sont des dosimètres neutroniques passifs fabriqués par Bubble Technology Industries (Chalk River, Ontario). Ils contiennent des gouttelettes d'un liquide surchauffé dispersées dans un gel de polymère élastique. Les particules à haut transfert d'énergie linéaire interagissent avec les gouttelettes pour former des bulles. Les détecteurs à bulles sont utilisés pour surveiller les neutrons dans l'espace depuis 1989 à partir des satellites russes récupérables Biocosmos (Bion), de la station spatiale Mir, de la navette spatiale et de la SSI.	1989-présent	Harry Ing/Lianne Ing	BTI	Institute of Biomedical Problems Russian Academy of Sciences, UOIT, AECL/CNL, NASA, DLR	Risques pour la santé associés aux vols spatiaux
CNRC – MicroPREP	Un protocole d'entente a été établi avec le CNRC de Boucherville dans le cadre duquel le CNRC et l'ASC collaborent au développement d'une capacité d'analyse automatisée d'échantillons biologiques.	2015-2019	Teodor Veres	CNRC Boucherville		Analyses biomédicales

Système médical avancé pour équipage (ACMS)	SonixTelemed est une solution logicielle qui permet de télécommander un échographe Ultrasonix sur un réseau IP et de transmettre en temps réel les images de l'échographe aux clients connectés. Le logiciel comprend une interface utilisateur graphique qui offre des commandes visuelles (boutons, etc.) permettant à l'utilisateur d'interagir avec l'échographe et modifier sa configuration à distance, comme si l'utilisateur utilisait les boutons de l'échographe. L'interface affiche une vidéo en direct des images échographiques, de sorte que l'utilisateur se sent comme s'il était assis devant l'écran de l'échographe lui-même. Le logiciel a été mis au point dans le cadre d'un contrat avec Ultrasonic Medical Corporation, le seul fabricant canadien d'appareils médicaux à ultrasons. Le logiciel Telemed a été mis à l'essai dans le cadre d'un autre contrat (Dr. Andrew Kirkpatrick Inc.) dans un scénario d'urgence réaliste en collaboration avec le Calgary Foothills Hospital.	Développement 2011-2013 Essai 2014-2015	Ultrasonic Medical Corporation & Dr. Andrew Kirkpatrick	Enterprise	N.d.	Imagerie médicale /Autonomie médicale
---	---	--	---	------------	------	---------------------------------------

