



Évaluation du Programme d'opérations d'assemblage et d'entretien de la Station spatiale internationale de l'Agence spatiale canadienne

Pour la période allant de mars 2008 à mars 2015

N° de projet 14/15 – 02-01

Document préparé par la Direction, Audit et évaluation

Février 2016

Table des matières

Liste des tableaux et des figures	ii
Liste des sigles et acronymes utilisés dans le rapport	iii
Résumé	v
Contexte.....	v
Approche et méthodes	vi
Conclusions et recommandations.....	vii
Pertinence/besoin.....	vii
Atteinte des résultats.....	viii
Efficience et économie.....	xi
Prestation du programme.....	xii
1 Introduction	1
2 Contexte.....	2
2.1 Aperçu	2
2.2 Gouvernance, rôles et responsabilités	4
2.3 Affectation des ressources.....	5
2.4 Théorie du programme	7
2.5 Évaluations et vérifications antérieures du programme	9
3 Approche et méthodes d'évaluation	10
3.1 But, portée et enjeux de l'évaluation	10
3.2 Approche et méthodes	11
3.3 Limites	14
4 Résultats.....	15
4.1 Pertinence	15
4.2 Rendement.....	20
4.3 Prestation du programme – rôles et responsabilités	50
5 Conclusions et recommandations.....	52
5.1 Pertinence	52
5.2 Rendement.....	53
5.3 Efficience et économie.....	56
5.4 Prestation du programme.....	57
Réponse et plan d'action de la direction	58

Annexe A : Exposé narratif du modèle logique.....	60
Annexe B : Bibliographie	66
Annexe C : Sommaire des constatations des études de cas	71
Annexe D : Vidéos concernant les opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS et statistiques de visionnement de 2011 à 2015	88

Liste des tableaux et des figures

Tableau 1 : Budget du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS, de 2008-2009 à 2014-2015 (en milliers de \$)	6
Tableau 2 : Dépenses du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS, de 2008-2009 à 2014-2015 (en milliers de \$)	6
Tableau 3 : Écarts entre le budget et les dépenses, SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS, de 2008-2009 à 2014-2015 (en milliers de \$).....	6
Tableau 4 : Nombre d'astronautes canadiens dans l'espace, de 2008-2009 à 2014-2015	21
Tableau 5 : Nombre d'expériences/de projets de recherche scientifique menés à bord de l'ISS et auxquels a participé le Canada, de 2008-2009 à 2014-2015	22
Tableau 6 : Nombre d'heures d'exploitation du MSS, de 2008-2009 à 2014-2015.....	23
Tableau 7 : Nombre d'ETP de l'ASC affectés à l'exploitation du MSS, de 2008-2009 à 2014-2015	28
Tableau 8 : Formation fournie aux astronautes et au personnel au sol, de 2008-2009 à 2014-2015	30
Tableau 9 : Visites uniques du site Web de l'ASC, de 2008-2009 à 2014-2015	31
Tableau 10 : Types d'activités de communications portant sur l'ISS réalisées par l'ASC, de 2008-2009 à 2014-2015	31
Tableau 11 : Matériel pédagogique portant sur l'ISS ayant été distribué, par mission Expedition, de 2008-2009 à 2014-2015	33
Tableau 12 : Coût par heure d'exploitation du MSS, 2008-2009 à 2014-2015.....	47
Figure 1 – Modèle logique du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS.....	8

Liste des sigles et acronymes utilisés dans le rapport

AAP	Architecture d'alignement des programmes
APEX	Expérience avancée sur les plantes en orbite
ASC	Agence spatiale canadienne
AVU	Unité de vision artificielle
BISE	Expérience Bodies in Space
CASIS	Centre for Advancement of Science in Space
CELTIS	Conscious Emotional Learning Tutoring
CGES	Comité de gestion de l'exploration spatiale
CIGITI	Centre for Image-Guided Innovation and Therapeutic Intervention
CIIC	Centre pour l'invention et l'innovation en chirurgie
CNRC	Conseil national de recherches du Canada
CoFR	Certification d'aptitude au vol
CSOC	Coûts communs d'exploitation des systèmes
CT	Conseil du Trésor
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
DG	Directeur général
É.-U.	États-Unis
ELC	Palette logistique Express
ESA	Agence spatiale européenne
ESL	Chef du soutien technique
ETP	Équivalent temps plein
EVA	Activités extravéhiculaires
EVR	Robotique extravéhiculaire
F et E	Fonctionnement et entretien
FPL	Chef de la planification du vol
GCE	Groupe consultatif d'évaluation
HEOMD	Human Exploration & Operations Mission Directorate (NASA)
HTV2	Véhicule de transfert H-II
IGA	Entente intergouvernementale
IMC	Increment Management Center
IRM	Imagerie par résonance magnétique
ISDE	Innovation, science et développement économique
ISECG	Groupe international de coordination de l'exploration spatiale
ISS	Station spatiale internationale
JAXA	Agence japonaise d'exploration spatiale
L et SI	Logistique et ingénierie de soutien
LEO	Orbite basse terrestre
LGFP	Loi sur la gestion des finances publiques

MJANR	Mise à jour annuelle des niveaux de référence
MBS	Base mobile
MCB	Commission multilatérale de coordination
MDA	MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd
MER	Local d'évaluation de la mission
MIEMS	Minimally-Invasive Endoscopic Manipulator System
MOC	Centre d'exploitation de mission
MSEF	Installation d'ingénierie de soutien du MSS
MSS	Système d'entretien mobile
NASA	National Aeronautics and Space Agency
NGC	Nouvelle génération de Canadarm
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
OCS	Logiciels de contrôle des opérations
OEC	Centre d'ingénierie d'exploitation
ORU	Unité de remplacement en orbite
PCSS	Programme canadien de la station spatiale
PDTS	Programme de développement des technologies spatiales
PE	Protocole d'entente
PEMO	Plan d'exploitation et de mise en œuvre
PGC	Prochaine génération du Canadarm
PHQ	Personnel hautement qualifié
PI	Propriété intellectuelle
R et D	Recherche et développement
RASE	Régime d'avantages sociaux des employés
R-MPSR	Centre de contrôle multifonctions
RMR	Rapport ministériel sur le rendement
RPCM	Module de télécommande et d'alimentation
RWS	Poste de travail robotique
SCT	Secrétariat du Conseil du Trésor
S et T	Science et technologie
SIS	Entretien de l'infrastructure spatiale
SP	Sous-programme
SPAC	Services publics et Approvisionnement Canada
SPDM	Manipulateur agile spécialisé
SSP	Sous-sous-programme
SSRMS	Télémanipulateur de la station spatiale
STS	Sciences et technologies spatiales
SVS	Système de vision spatiale

Résumé

Contexte

Le présent rapport fournit les résultats de l'évaluation du sous-sous-programme (SSP) Opérations d'assemblage et d'entretien de la Station spatiale internationale (ISS) de l'Agence spatiale canadienne (ASC). L'évaluation a eu lieu entre les mois de décembre 2014 et de février 2016 et a couvert la période allant de mars 2008 à mars 2015.

Le Programme de la station spatiale a débuté en 1984 lorsque le président des États-Unis (É.-U.) Ronald Reagan a invité ses « amis et alliés » (les membres du G7) à contribuer à l'élaboration du complexe orbital. Les partenaires originaux étaient les É.-U. (leader), le Canada, l'Europe (représentée par l'Agence spatiale européenne [ESA]) et le Japon. En 1985, le gouvernement du Canada a confirmé sa participation au programme et l'entente intergouvernementale (IGA pour *Intergovernmental Agreement*) originale a été signée en 1988. Une IGA mise à jour, qui incluait la Russie, a été signée en 1998.

La contribution du Canada à l'ISS prend la forme du Système d'entretien mobile (MSS). Les principaux éléments du MSS sont : le télémanipulateur de la station spatiale (SSRMS, ou Canadarm2 de deuxième génération, lequel est un imposant bras robotique lancé en 2001); une base mobile (MBS) transportant les robots canadiens et les charges utiles de l'ISS le long de la poutrelle principale de la station, lancée en 2002; et le manipulateur agile spécialisé (SPDM, ou Dextre), lequel est un robot agile à deux bras qui a été lancé en mars 2008. Des unités de vision artificielle (AVU) et un logiciel de contrôle des opérations (OCS) ont aussi été fournis en appui aux activités d'exploitation du MSS menées par les membres d'équipage en orbite depuis le poste robotique (RWS) de la National Aeronautics and Space Agency (NASA), lesquelles activités font partie des responsabilités de l'ASC en matière d'ingénierie de soutien. Le MSS est appuyé par des installations d'exploitation et de formation situées au siège social de l'ASC à Saint-Hubert, au Québec, ainsi que par une installation d'ingénierie de soutien au MSS (MSEF) exploitée par MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd (MDA, l'entrepreneur principal) et située à Brampton, en Ontario.

Conformément aux dispositions du protocole d'entente (PE) conclu entre la NASA et l'ASC, le Canada est tenu :

- d'appuyer l'exploitation du MSS;
- de fournir une formation sur le MSS aux membres d'équipage ainsi qu'au personnel de soutien au sol;
- d'élaborer et de mettre en œuvre des procédures pour assurer l'exploitation sécuritaire, efficiente et efficace du MSS;
- de fournir des services de logistique et d'ingénierie de soutien pour chacun des éléments canadiens pendant tout le cycle de vie de l'ISS;
- de fournir les pièces de rechange nécessaires et de réparer le matériel du MSS qui cesse de fonctionner en orbite.

En contrepartie de sa contribution et du respect de ses obligations, 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. Le Canada a aussi le droit de désigner ses astronautes pour former 2,3 % des équipages qui s'envoleront à destination de l'ISS.

Outre ses obligations, le Canada est tenu de compenser la NASA pour 2,3 % des coûts communs d'exploitation des systèmes de l'ISS (CSOC). Ces derniers représentent les coûts liés à l'exploitation de l'ISS dans son ensemble. Chaque partenaire du projet est tenu de payer sa part respective. Les partenaires ont convenu de « réduire les échanges de fonds » en fournissant des biens et des services en nature (c.-à-d., du troc) afin de compenser leurs obligations en matière de coûts communs. À ce jour, toutes les agences collaboratrices ont compensé leurs obligations en matière de CSOC au moyen de telles ententes.

Le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS est une activité continue qui est financée par les services votés de l'ASC. Le budget d'exploitation du MSS est géré par l'entremise de la structure financière existante de l'ASC, conformément à l'ensemble des politiques relatives à la *Loi sur la gestion des finances publiques* (LGFP) qui s'appliquent. Les budgets sont décentralisés et confiés aux gestionnaires chargés de réaliser des activités spécifiques. Le budget total consacré au SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS entre 2008-2009 et 2014-2015 était de 323,6 millions de dollars, tandis que les dépenses se sont élevées à 330,6 millions de dollars.

La portée du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS englobe l'exploitation et l'entretien du MSS. Il importe de souligner que l'évaluation exclut le **SSP Utilisation de l'ISS** et le sous-programme (SP) **Missions spatiales habitées et soutien connexe**. Ces deux composantes seront évaluées au cours de l'exercice financier de 2016-2017.

Le SSP Utilisation de l'ISS englobe la mise en œuvre d'études scientifiques, opérationnelles, médicales et technologiques dans des domaines spécifiques, tels les sciences de la vie, le rayonnement, les sciences des matériaux ou des fluides, que des organismes du gouvernement fédéral, des universités et des entreprises du secteur privé réaliseront à bord de l'ISS.

Le SP Missions spatiales habitées et soutien connexe englobe les activités nécessaires au recrutement, au développement, à la formation et au maintien en place d'un corps d'astronautes canadiens en santé et hautement qualifiés, capables de participer à des missions d'exploration spatiale. Il comprend aussi toutes les activités visant à atténuer les risques que ces missions présentent pour la santé, notamment le développement de technologies de pointe destinées à appuyer les missions spatiales habitées.

Approche et méthodes

L'équipe d'évaluation a travaillé en étroite collaboration avec un groupe consultatif d'évaluation (GCE) interne formé de représentants du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS et de la Direction, Audit et évaluation.

Les sources de données utilisées pour l'évaluation comprenaient notamment : un examen de la documentation, des entrevues réalisées auprès de 25 intervenants de l'ASC et de l'extérieur, un sondage de suivi visant la collecte de données quantitatives auprès de l'entrepreneur principal (MDA Brampton), et trois études de cas de technologies issues du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS (soit le NeuroArm, l'IGAR et le KidsArm).

Conclusions et recommandations

Pertinence/besoin

Nécessité de maintenir le programme

La participation du Canada aux missions spatiales habitées est perçue comme une décision positive pour plusieurs raisons sur les plans politique, scientifique, économique et de l'innovation. Les astronautes canadiens présents dans l'espace inspirent la nation et motivent les jeunes scientifiques et ingénieurs en devenir.

La décision du Canada de prendre part au programme de l'ISS a constitué une étape logique dans l'évolution de la relation de longue date entre le Canada et la NASA, laquelle remonte à 1969, année où la NASA a invité le Canada à participer au programme de la navette spatiale.

L'évaluation a démontré que la décision de participer au programme de l'ISS a été motivée en grande partie par des préoccupations géopolitiques. À l'époque, les É.-U. comptaient assembler une station spatiale avec l'aide de leurs alliés occidentaux en réponse à la station spatiale soviétique Mir, lancée en 1986. Le Canada a été invité à prendre part au programme puisqu'il appuyait depuis longtemps le programme de la navette spatiale et qu'il comptait une expertise unique en robotique spatiale – une capacité que les É.-U. ne possédaient pas à l'époque.

Bien que les personnes interviewées considèrent que la décision de prolonger la participation du Canada au programme de l'ISS jusqu'en 2024 soit la bonne et qu'elles endossent la participation continue du Canada dans les missions spatiales internationales habitées, cette participation a une incidence budgétaire sur l'ASC. Plus les années passeront, plus l'ISS aura besoin de pièces de remplacement. Bon nombre de personnes interviewées dans le cadre de cette évaluation estiment que l'ISS pourrait demeurer opérationnelle au-delà de 2024, ce qui est positif selon elles puisque cela accroîtrait l'utilisation potentielle de l'ISS à des fins scientifiques.

La participation continue du Canada au programme de l'ISS autorisera une utilisation accrue du complexe orbital et permettra au Canada de prendre part au dialogue portant sur les étapes qui viendront après le déclassement de l'ISS, maintenant ainsi la participation du Canada dans les vols spatiaux habités. Ces discussions entourant l'avenir de l'exploration spatiale après la fin du programme de l'ISS illustrent la stature que le Canada a acquise dans le cadre de sa participation au programme de l'ISS.

Le programme de l'ISS continue de fournir des possibilités de participation avec des partenaires internationaux partageant des objectifs similaires en matière d'utilisation pacifique de l'espace lointain et ce, malgré les conflits ou les situations difficiles sur le plan géopolitique qui règnent à l'échelle de la planète.

Harmonisation avec les rôles, les responsabilités et les priorités fédérales

L'examen de la documentation et les entrevues réalisées auprès des répondants clés ont démontré que la participation continue du Canada au programme de l'ISS est bien alignée sur les priorités du gouvernement fédéral. Ces priorités sont mises en évidence dans le *Cadre de la politique spatiale du Canada*¹, la *Stratégie en matière de sciences, de technologie et d'innovation* et le *Budget de 2015* dans lequel a été annoncée la prolongation, jusqu'en 2024, de la participation du Canada au programme de l'ISS. Le maintien de la participation du Canada dans le programme de l'ISS s'harmonise également avec la volonté du gouvernement du Canada de concentrer ses activités autour de l'innovation et des sciences, tel qu'indiqué dans le récent *Discours du Trône* (décembre 2015)², bien que ce dernier ne soit pas visé par la portée de l'évaluation.

L'évaluation a permis d'établir que la gestion de la portion canadienne du programme de l'ISS constituait un rôle approprié pour le gouvernement du Canada puisque la participation du Canada est encadrée par une entente internationale ne pouvant être signée et gérée que par le gouvernement du Canada. De plus, les résultats de l'évaluation indiquent que la responsabilité de l'ASC à l'égard du programme cadre avec les pouvoirs que lui confère la *Loi sur l'ASC*, laquelle énonce que l'Agence est autorisée à « collaborer avec les agences spatiales — ou les organismes œuvrant dans un domaine connexe — d'autres pays à l'exploitation et l'usage pacifiques de l'espace. »

Atteinte des résultats

Résultats immédiats

Possibilités de vols spatiaux habités et d'utilisation de l'ISS

Même si le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS n'a aucune incidence directe sur le nombre d'occasions de missions spatiales habitées ou sur l'exploitation de l'ISS, il permet directement l'atteinte de ces objectifs. Les résultats de l'évaluation indiquent que le Canada a pu participer à des missions spatiales habitées et utiliser les installations de l'ISS. Ces possibilités ne se seraient pas présentées à lui sans le programme de l'ISS. Ce programme représente la seule et unique occasion pour le Canada de participer à des vols spatiaux habités. Au total, six astronautes canadiens ont réalisé des missions à bord de l'ISS.

¹ Agence spatiale canadienne. (2014). *Cadre de la politique spatiale du Canada : L'envol de la prochaine génération*. Consulté le 20 juillet 2015 à l'adresse <http://www.asc-csa.gc.ca/fra/publications/politique-spatiale/default.asp>

² Gouvernement du Canada. (2015). Réaliser le vrai changement. *Discours du Trône ouvrant la première session de la quarante-deuxième législature du Canada*. Le 4 décembre 2015. Consulté le 17 décembre 2015 à l'adresse <http://discours.gc.ca/fr/contenu/realiser-le-vrai-changement>

Rôle de chef de file du Canada en robotique spatiale

Le Canada a été invité à participer au programme de l'ISS en raison de son leadership en robotique spatiale, et la réalisation du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS a permis d'asseoir ce rôle. Cependant, le leadership du Canada dans le créneau de la robotique spatiale ne peut pas être tenu pour acquis puisque d'autres pays développent également leurs capacités dans le domaine de la robotique spatiale. La participation au SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS a donné lieu à de nombreuses innovations en robotique spatiale au Canada, la plus importante étant la capacité de commander Dextre et le Canadarm2 depuis le sol. Le leadership du Canada en robotique spatiale a engendré des invitations à prendre part à d'autres missions, mais la capacité du Canada à participer à ces missions a été restreinte par la disponibilité des fonds à l'ASC. La plupart des personnes interviewées s'entendent pour dire que sans l'appui financier continu du gouvernement fédéral, le Canada pourrait perdre ce rôle de leader en robotique spatiale.

Recommandation 1 : L'ASC devrait évaluer l'importance de maintenir le rôle de chef de file du Canada en robotique spatiale et les mesures à prendre si le Canada veut maintenir sa position de leader en robotique spatiale.

La réputation du Canada parmi les partenaires

La documentation et les entrevues menées auprès d'intervenants clés indiquent que la réputation du Canada auprès des partenaires internationaux s'est maintenue ou s'est améliorée grâce aux solutions novatrices de réparation ou d'entretien de l'ISS mises au point par le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS. Même si la contribution du Canada ne représente que 2,3 % du programme de l'ISS, le Canada est perçu par ses partenaires comme ayant une influence plus importante que sa contribution ne pourrait laisser paraître sur la scène internationale.

Capacités du secteur spatial et PHQ

Les entrevues et les données sur le rendement du programme indiquent que le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS a directement contribué à l'emploi de personnes hautement qualifiées (PHQ³) au Canada au cours de la période visée par l'évaluation. Outre l'emploi, le SSP a également contribué à la formation des PHQ, y compris des astronautes et du personnel au sol (canadien et international).

À la lumière des entrevues qui ont été menées, les employés du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS de l'ASC estiment que leur potentiel professionnel est limité par l'absence d'autres missions de grande envergure à l'ASC et au Canada. L'avancement professionnel pourrait également être quelque peu limité en raison des équipes relativement petites à l'ASC. Certaines entrevues réalisées auprès de représentants de l'ASC tendent à indiquer que le Canada perdrait des PHQ au profit des É.-U. Il incombe toutefois d'indiquer que cette hypothèse ne s'appuie que sur un nombre restreint

³ À l'ASC, et dans la présente évaluation, on entend par PHQ les scientifiques, les ingénieurs et les techniciens.

d'entrevues et qu'elle pourrait ne pas représenter l'opinion de tous les employés de l'ASC faisant partie de ce SSP.

Sensibilisation du public aux technologies de l'ISS

Le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS n'a pas pour mandat de sensibiliser le public aux technologies de l'ISS – ce rôle incombe à la Direction des communications de l'ASC. Les statistiques fournies par la direction et les entrevues menées auprès de répondants clés indiquent que la population canadienne est tenue informée sur les technologies utilisées à bord de l'ISS par l'entremise de divers moyens (vidéos, informations diffusées en ligne, communiqués de presse, événements publics, etc.). L'ASC a mis au point des outils et des trousseaux pédagogiques destinés aux jeunes et ce, pour les trois plus récentes missions auxquelles ont participé des astronautes canadiens (Bob Thirsk, Julie Payette et Chris Hadfield).

Résultats intermédiaires

Transfert de savoir-faire à partir des activités menées à bord de l'ISS

Les données issues des entrevues, des examens de la documentation et des études de cas réalisées dans le cadre de la présente évaluation indiquent fortement qu'il y a un transfert de savoir-faire entre le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS et les applications non liées à l'espace. Les données, et plus particulièrement celles émanant des trois études de cas, indiquent que le transfert du savoir-faire est un processus de longue haleine qui nécessite de nombreuses années (possiblement des décennies) et des investissements considérables. Malgré le fait qu'il y ait bel et bien un transfert de savoir-faire, certains répondants estiment que le Canada n'en fait pas assez pour tirer pleinement profit des retombées des technologies de robotique spatiales mises au point pour le compte du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS. Toutefois, l'ASC est limitée dans sa capacité de faciliter directement la commercialisation des technologies puisque l'entrepreneur principal détient la licence unique pour commercialiser les technologies destinées à l'ISS qu'il a élaborées.

Recommandation 2 : L'ASC devrait évaluer les options permettant d'accroître la commercialisation et le transfert de technologies du programme de l'ISS à d'autres secteurs. Des discussions devraient avoir lieu avec d'autres ministères et organismes fédéraux concernés, de même qu'avec l'entrepreneur principal. Cette évaluation devrait tenir compte des pratiques exemplaires et des leçons retenues d'autres partenaires du programme de l'ISS, tout particulièrement la NASA.

Mise à profit, par l'industrie, de l'expérience acquise dans le cadre du programme de l'ISS

Des données probantes indiquent que l'entrepreneur principal a été en mesure de mettre à profit l'expérience qu'il a acquise dans le cadre du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS afin d'obtenir des contrats dans le secteur spatial et ce, tant à l'échelle nationale qu'internationale. MDA a été en mesure de tirer profit des liens tissés dans le cadre du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS. En ce qui concerne les technologies et les produits élaborés dans le cadre des

travaux menés en appui au SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS, MDA indique qu'elle a tiré certains revenus de la vente de bornes électromécaniques à d'autres entreprises et agences spatiales. Toutefois, MDA signale qu'elle n'a tiré aucun revenu de nouveaux produits, services ou processus bien que de nombreux brevets aient été déposés.

Base élargie d'intervenants dans le domaine spatial

Les travaux de recherche examinés dans le cadre de la présente évaluation indiquent que l'inspiration suscitée par l'exploration spatiale contribue, à long terme, à accroître l'intérêt des jeunes et de la population générale envers les sciences et la technologie. À long terme, le fait d'inspirer les jeunes contribue à accroître la proportion de ces derniers qui poursuivront une carrière en science et en génie. Le volet inspiration du programme de l'ISS est souligné dans le *Cadre de la politique spatiale du Canada*.

Résultat final

Contribution à la croissance socioéconomique

Des données probantes indiquent que le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS a contribué au développement socioéconomique et qu'il continuera de le faire. La documentation portant sur le sujet reconnaît qu'il existe un lien entre l'exploration spatiale et les retombées socioéconomiques. Toutefois, les tentatives de quantification de ces retombées ont été plutôt infructueuses puisqu'elles ne se concrétisent qu'à long terme et que les liens sont souvent indirects entre les technologies spatiales et les avantages qu'elles procurent au final.

Résultats inattendus

Le principal résultat inattendu du programme de l'ISS dans son ensemble (c.-à-d., non spécifique au SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS) est la portée de la coopération internationale qui en découle. Au fil des ans, le programme de l'ISS a su surmonter plusieurs défis politiques et économiques, dont les récentes tensions entre la Russie et la communauté internationale. Il est remarquable que la coopération avec la Russie dans le cadre du programme de l'ISS ait été maintenue malgré la présence de tensions géopolitiques avec ce pays. En outre, cette coopération a permis de maintenir ouvertes les voies de communication entre la Russie et la communauté internationale.

La visibilité du Canadarm2 et de Dextre dans les médias canadiens et internationaux a constitué un autre exemple de résultats inattendus, celui-ci découlant spécifiquement du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS.

Efficiences et économie

En se basant sur les éléments de preuve disponibles, l'évaluation conclut que le SSP est exécuté de la façon la plus efficace qui soit. Dans l'ensemble, le SSP a gagné en efficacité au cours de la période couverte par l'évaluation en raison de l'accroissement de l'automatisation et de l'expérience pratique acquise par l'équipe formée de représentants du gouvernement et de l'entrepreneur. Toute tentative

supplémentaire d'accroître l'efficacité en réduisant le nombre d'employés pourrait entraîner un risque pour le programme, et toute diminution additionnelle des niveaux de dotation pourrait éliminer les redondances fonctionnelles en place et mettre le programme en péril. L'évaluation n'a cerné aucune solution viable susceptible d'accroître l'efficacité du SSP. Le contrat avec l'entrepreneur principal est géré de manière très rigoureuse, comme le sont tous les contrats de cette ampleur et de cette durée, et les profits, qui font l'objet d'une surveillance, sont limités selon les clauses du contrat ce qui offre à la population canadienne un bon rapport qualité-prix.

Le SSP ne dispose pas d'une réserve pour imprévus et, à la lumière des conclusions de l'évaluation, il n'existe aucune raison d'en créer une. L'ASC gère les risques liés au programme en réaffectant les ressources à l'interne. Ce processus fonctionne bien puisque la nature des projets spatiaux fait en sorte que les retards sont fréquents et que la capacité à réaffecter les ressources à l'interne minimise le risque de non-utilisation des fonds.

Prestation du programme

L'évaluation n'a décelé aucun manque de clarté dans la définition des rôles et des responsabilités des partenaires du programme de l'ISS ni des rôles et des responsabilités au sein de l'ASC.

L'entente intergouvernementale (IGA) sur l'ISS et le PE⁴ énoncent les rôles, les tâches, les engagements et les responsabilités de chacune des parties dans le partenariat. De plus, le Plan de mise en œuvre des opérations de l'ASC fournit une description détaillée de la structure de gestion du programme, des responsabilités organisationnelles et des processus clés qui ont été mis en place par l'ASC pour respecter ses obligations envers le MSS de l'ISS⁵.

⁴ *Memorandum of Understanding between the Canadian Space Agency and the National Aeronautics and Space Administration of the United States of America Concerning Cooperation on the Civil International Space Station*. ASC, NASA (28 janvier 1998).

⁵ Agence spatiale canadienne. (2012). *Canadian Space Station Program Operations Implementation Plan - MSS-Operations*. Révision B (14 mars 2012). (N° de document de l'ASC : CSA-SS-PL-0195)

1 Introduction

Le présent rapport fait état des résultats de l'évaluation du sous-sous-programme (SSP) Opérations d'assemblage et d'entretien de la Station spatiale internationale (ISS) de l'Agence spatiale canadienne (ASC). L'évaluation a été réalisée pour le compte de la Direction, Audit et évaluation de l'ASC par Kelly Sears Consulting Group, en collaboration avec Beechwood Consulting and Research Inc., BBMD Consulting Inc. et Hickling Arthurs Low Corp. entre décembre 2014 et février 2016. L'évaluation, qui répond à une exigence du Plan d'évaluation quinquennal de l'ASC, a été menée conformément à la *Politique sur l'évaluation* (2009) du Conseil du Trésor qui exige que tous les programmes fédéraux soient évalués tous les cinq ans.

2 Contexte

Ce chapitre présente brièvement le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS de l'ASC.

2.1 Aperçu

2.1.1 Histoire et contexte

Le Programme de la station spatiale a débuté en 1984 lorsque le président des États-Unis (É.-U.) Ronald Reagan a invité ses « amis et alliés » (les membres du G7) à contribuer à l'élaboration du complexe orbital. Les partenaires originaux étaient les É.-U. (leader), le Canada, l'Europe (représentée par l'Agence spatiale européenne [ESA]) et le Japon. En 1985, le gouvernement du Canada a confirmé sa participation au programme et l'entente intergouvernementale (IGA pour *Intergovernmental Agreement*) originale a été signée en 1988. Une IGA mise à jour, qui incluait la Russie, a été signée en 1998.

À la fin de la Guerre froide en 1994, les partenaires originaux, à l'initiative du président américain Bill Clinton, ont invité la Russie à se joindre au programme. Ainsi fût établi le programme de l'ISS. En 1998, le Canada signait l'IGA mis à jour conclu entre les gouvernements des É.-U., du Canada, de la Russie, du Japon et des États membres de l'ESA au sujet de la coopération à l'assemblage et à l'exploitation d'une station spatiale internationale civile. L'IGA chapeaute quatre protocoles d'entente (PE) conclus entre la National Aeronautics and Space Agency (NASA) et chacune des agences coopérantes (NASA-Canada, NASA-Japon, NASA-Europe et NASA-Russie). Une loi fédérale, soit la *Civil International Space Station Implementation Act*, visant la mise en œuvre de l'IGA, a été approuvée et signée en 1999.

L'ISS est un laboratoire de recherche installé en orbite autour de la Terre. Le premier module de l'ISS a été lancé en 1998 et depuis, la station effectue 16 fois le tour de la Terre par jour. La Station spatiale internationale est habitée en permanence depuis novembre 2000.

À titre de partenaire à part entière du programme de l'ISS, le Canada assume, avec les gouvernements des É.-U., de la Russie, du Japon et de l'Europe, une part de la responsabilité quant à la gestion des activités menées à bord de l'ISS.

À titre de contribution, le Canada a fourni le Système d'entretien mobile (MSS), soit le système robotique extérieur qui a été essentiel à l'assemblage et à l'entretien de l'ISS depuis 2001. Les principaux éléments du MSS sont : le télémanipulateur de la station spatiale (SSRMS, ou Canadarm2 de deuxième génération, lequel est un imposant bras robotique lancé en 2001); une base mobile (MBS) transportant les robots canadiens et les charges utiles de l'ISS le long de la poutrelle principale de la station, lancée en 2002; et le manipulateur agile spécialisé (SPDM, ou Dextre), lequel est un robot agile à deux bras qui a été lancé en mars 2008. Des unités de vision artificielle (AVU) et un logiciel de contrôle des opérations (OCS) ont aussi été fournis en appui aux activités d'exploitation du MSS menées par les membres d'équipage en orbite depuis le poste robotique de la NASA (RWS), lesquelles activités font partie des tâches d'ingénierie de soutien qui incombent à l'ASC. Le MSS est appuyé par des installations

d'exploitation et de formation situées au siège social de l'ASC à Saint-Hubert, au Québec, ainsi que par une installation d'ingénierie de soutien au MSS (MSEF) exploitée par MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd (MDA, l'entrepreneur principal) et située à Brampton, en Ontario.

Conformément aux dispositions du protocole d'entente conclu entre la NASA et l'ASC, le Canada est tenu⁶ :

- d'appuyer l'exploitation du MSS;
- de fournir une formation sur le MSS aux membres d'équipage ainsi qu'au personnel de soutien au sol;
- d'élaborer et de mettre en œuvre des procédures pour assurer l'exploitation sécuritaire, efficiente et efficace du MSS;
- de fournir des services de logistique et d'ingénierie de soutien pour chacun des éléments canadiens pendant tout le cycle de vie de l'ISS;
- de fournir les pièces de rechange nécessaires et de réparer le matériel du MSS qui cesse de fonctionner en orbite.

En contrepartie de sa contribution et du respect de ses obligations, le Canada se voit accorder 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. Le Canada a aussi le droit de fournir ses astronautes pour former 2,3 % des équipages qui s'envoleront vers l'ISS.

Outre ces obligations, le Canada est tenu de compenser la NASA pour 2,3 % des coûts communs d'exploitation des systèmes de l'ISS (CSOC). Ces derniers sont des coûts liés à l'exploitation de l'ISS dans son ensemble. Chaque partenaire du projet est tenu de payer sa part respective. Les partenaires ont convenu de « réduire les échanges de fonds » en fournissant des biens et des services en nature (c.-à-d., ententes de troc) afin de compenser leurs obligations en matière de coûts communs. À ce jour, toutes les agences collaboratrices ont compensé leurs obligations en matière de CSOC au moyen de telles ententes.

Le Canadarm2 a été essentiel au succès des activités d'assemblage et d'installation des éléments fournis par les partenaires du programme de l'ISS, activités qui, une fois terminées, ont donné lieu au plus imposant complexe spatial occupé en permanence. L'ajout de Dextre a permis d'améliorer les capacités robotiques de l'ISS et du MSS. Il a notamment permis la réalisation de tâches nécessitant une dextérité fine, comme le retrait et le remplacement de divers composants de l'ISS, essentielles à l'exploitation continue de la station, et il a permis de soutenir les démonstrations scientifiques et technologiques. Dextre a permis de réduire le recours aux sorties extravéhiculaires (EVA, ou sorties dans l'espace), réduisant du coup les risques connexes pour les astronautes. En outre, la base mobile permet d'accroître la portée des robots le long de la poutrelle principale de l'ISS.

⁶ *Memorandum of Understanding between the Canadian Space Agency and the National Aeronautics and Space Administration of the United States of America Concerning Cooperation on the Civil International Space Station. ASC, NASA (28 janvier 1998).*

L'objet de la présente évaluation, soit le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS, relève du Programme d'exploration spatiale de l'ASC et du sous-programme (SP) Station spatiale internationale.

Le **SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS** vise l'exploitation et l'entretien du Système d'entretien mobile (MSS). La portée de ce SSP englobe :

- le télémanipulateur de la station spatiale (SSRMS), aussi désigné Canadarm2;
- le manipulateur agile spécialisé (SPDM), aussi désigné Dextre;
- la base mobile (MBS), qui constitue la contribution du Canada au programme de l'ISS.

On s'attend à ce que le soutien fourni par le Canada soit maintenu pendant toute la durée de vie du projet, laquelle a été récemment prolongée jusqu'en 2024⁷. De plus, depuis janvier 2016, le Canada exploite également le poste de travail robotique (RWS) et fournit les services d'ingénierie de soutien connexe.

Il importe de souligner que l'évaluation ne vise pas le **SSP Utilisation de l'ISS** ni le **SP Missions spatiales habitées et soutien connexe**. Ces composantes feront l'objet d'une évaluation au cours de l'exercice financier 2016-2017.

Le SSP Utilisation de l'ISS englobe la mise en œuvre d'études scientifiques, opérationnelles, médicales et technologiques dans des domaines spécifiques, tels les sciences de la vie, le rayonnement et les sciences des matériaux ou des fluides, que des organismes du gouvernement fédéral, des universités et des entreprises du secteur privé réaliseront à bord de l'ISS.

Le SP Missions spatiales habitées et soutien connexe englobe les activités requises pour recruter, développer, former et maintenir en place un corps d'astronautes canadiens en santé et hautement qualifiés capables de participer à des missions d'exploration spatiale. Il comprend aussi toutes les activités visant à atténuer les risques que ces missions présentent pour la santé, notamment le développement de technologies de pointe destinées à appuyer les missions spatiales habitées.

2.2 Gouvernance, rôles et responsabilités

Tel qu'énoncé dans la loi ayant constitué l'ASC (L.C., 1990, ch. 13), l'Agence assume ses fonctions, qui sont, notamment, « de concevoir, réaliser, diriger et gérer des programmes et travaux liés à des activités scientifiques et industrielles de recherche et développement dans le domaine spatial et à l'application des techniques spatiales ». Le gouvernement du Canada, par le biais de l'ASC, a organisé son programme d'exploration spatiale de telle façon que ses SP et SSP satisfont le mandat et les fonctions de la loi.

⁷ Ministère des Finances du Canada. *Plan d'action économique du Canada - Un leadership fort*. Voir le budget 2015 du gouvernement du Canada. Consulté le 22 juillet 2015 à l'adresse <http://www.budget.gc.ca/2015/docs/plan/ch3-1-fra.html>

Lorsque le Grand projet de l'État ISS (c.-à-d., l'assemblage de l'ISS) a pris fin, l'ASC a été tenue par le gouvernement fédéral d'assumer la responsabilité de l'ISS à même son budget de services votés.

2.3 Affectation des ressources

Le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS est une activité continue qui est financée par les services votés de l'ASC. Le budget d'exploitation du MSS est géré par l'entremise de la structure financière existante de l'ASC, conformément à l'ensemble des politiques relatives à la *Loi sur la gestion des finances publiques* (LGFP) qui s'appliquent. Les budgets sont décentralisés et confiés aux gestionnaires chargés de réaliser des activités spécifiques.

Le budget total consacré au SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS entre 2008-2009 et 2014-2015 était de 323,6 millions de dollars, tandis que les dépenses se sont élevées à 330,6 millions de dollars. Le budget du programme, les dépenses et les écarts pour la période allant de 2008-2009 à 2014-2015 sont présentés en détail aux tableaux 1 à 3 qui figurent à la page suivante.

Tableau 1 : Budget du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS, de 2008-2009 à 2014-2015 (en milliers de \$)

	Fonds	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015	Total
Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS	Salaire – F et E	10 596 \$	11 899 \$	8 636 \$	8 125 \$	8 411 \$	9 366 \$	10 245 \$	67 278 \$
	F et E	33 499 \$	34 842 \$	34 461 \$	30 290 \$	28 467 \$	38 804 \$	34 744 \$	235 107 \$
	Capital	444 \$	250 \$	250 \$	250 \$	250 \$	- \$	6 358 \$	7 802 \$
	Contribution	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$
	RASE (20 %)	2 119 \$	2 380 \$	1 727 \$	1 625 \$	1 682 \$	1 873 \$	2 049 \$	13 456 \$
Total		46 658 \$	49 371 \$	45 074 \$	40 290 \$	38 810 \$	50 043 \$	53 396 \$	323 642 \$

Source : Direction des finances de l'ASC, Mise à jour annuelle des niveaux de référence (MJANR) pour les années de référence, juin 2015.

Tableau 2 : Dépenses du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS, de 2008-2009 à 2014-2015 (en milliers de \$)

	Fonds	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015	Total
Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS	Salaire – F et E	9 338 \$	9 402 \$	7 341 \$	7 726 \$	7 864 \$	8 037 \$	7 982 \$	57 690 \$
	F et E	44 913 \$	39 738 \$	32 870 \$	32 722 \$	29 908 \$	37 850 \$	41 361 \$	259 361 \$
	Capital	817 \$	38 \$	61 \$	- \$	40 \$	8 \$	1 172 \$	2 135 \$
	Contribution	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$
	RASE (20 %)	1 868 \$	1 742 \$	1 468 \$	1 545 \$	1 573 \$	1 607 \$	1 596 \$	11 400 \$
Total		56 935 \$	50 919 \$	41 740 \$	41 993 \$	39 386 \$	47 503 \$	52 111 \$	330 587 \$

Source : Direction des finances de l'ASC, base de données SAP, juin 2015.

Tableau 3 : Écarts entre le budget et les dépenses, SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS, de 2008-2009 à 2014-2015 (en milliers de \$)

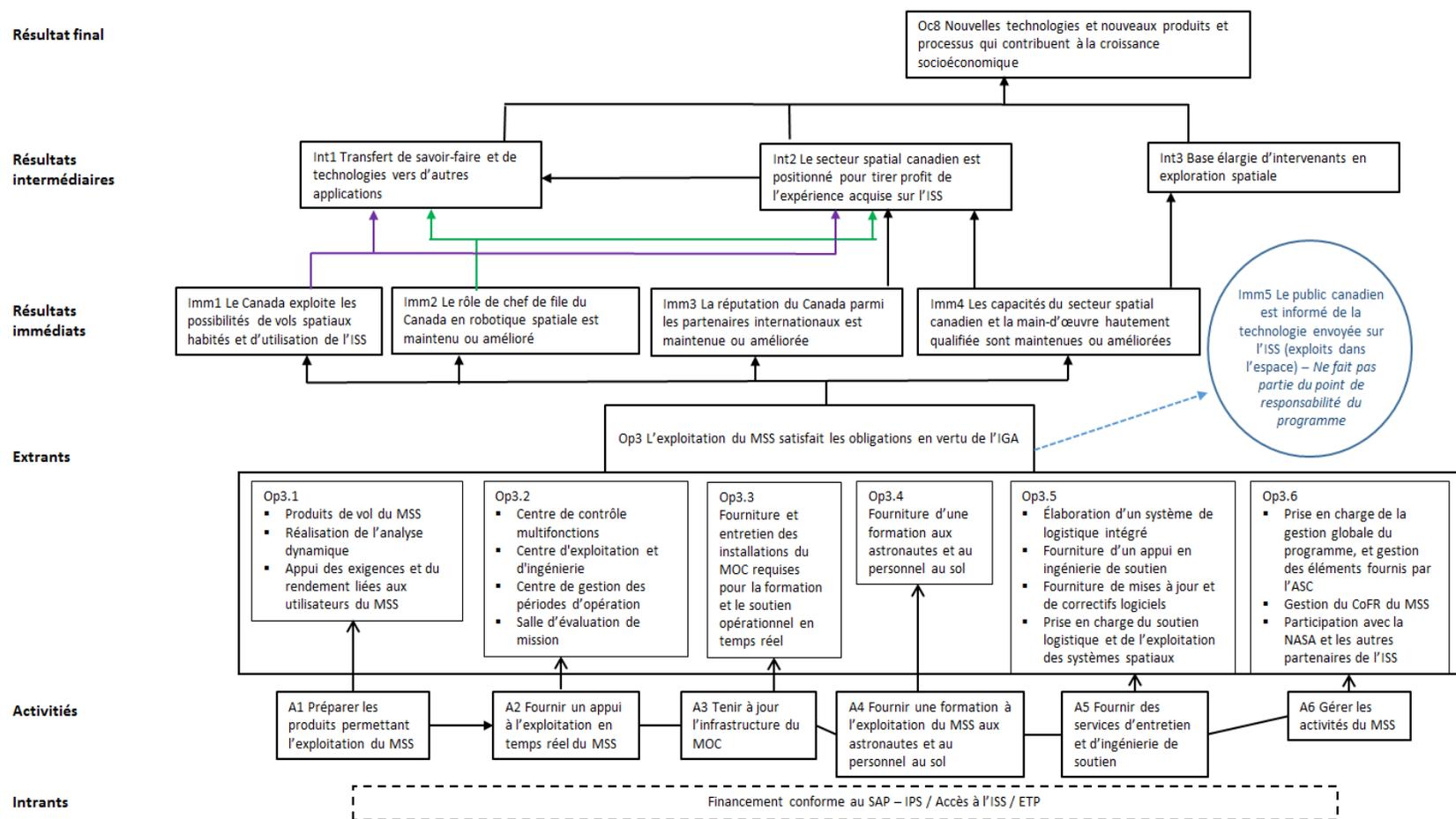
	Fonds	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015	Total
Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS	Salaire – F et E	1 258 \$	2 497 \$	1 295 \$	399 \$	547 \$	1 329 \$	2 263 \$	9 587 \$
	F et E	(11 414 \$)	(4 896 \$)	1 591 \$	(2 432 \$)	(1 441 \$)	954 \$	(6 617 \$)	(24 254 \$)
	Capital	(373 \$)	212 \$	189 \$	250 \$	210 \$	(8 \$)	5 186 \$	5 667 \$
	Contribution	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$
	RASE (20 %)	252 \$	638 \$	259 \$	80 \$	109 \$	266 \$	453 \$	2 056 \$
Total		(10 277 \$)	(1 548 \$)	3 334 \$	(1 703 \$)	(575 \$)	2 541 \$	1 285 \$	(6 943 \$)

Nota : Les nombres ayant été arrondis, leur somme pourrait ne pas correspondre exactement aux totaux indiqués dans les tableaux 1, 2 et 3.

2.4 Théorie du programme

Cette section décrit le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS et présente le modèle logique élaboré par l'équipe de consultants. Le modèle logique élaboré pour l'évaluation est fortement aligné avec le modèle logique mis au point par la Direction générale d'exploration spatiale de l'ASC pour le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS. D'après les discussions tenues avec le responsable du projet et le groupe consultatif d'évaluation (GCE), il a été convenu que le modèle logique devrait être révisé afin de fournir davantage de détails et de granularité quant aux extrants et aux résultats. Il a également été convenu que les activités et les résultats devaient être peaufinés plutôt que d'être modifiés à grande échelle. La description du modèle logique est fournie à l'annexe A.

Figure 1 – Modèle logique du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS



2.5 Évaluations et vérifications antérieures du programme

Le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS n'a fait l'objet d'aucune évaluation auparavant.

Une vérification interne du SSP a été réalisée en septembre 2012⁸. Cette vérification avait pour objectif de déterminer si le cadre de gestion en place permettait au programme d'atteindre ses objectifs et de respecter les politiques, la réglementation et les lignes directrices émises par l'ASC et les organismes centraux. La vérification a conclu que le cadre de gestion en place permettait au programme d'atteindre ses objectifs et de respecter les politiques, la réglementation et les lignes directrices émises par l'ASC et les organismes centraux.

La vérification a cerné quelques possibilités d'améliorations et formulé les recommandations suivantes :

1. Consolider dans un document les informations établissant tous les coûts exceptionnels anticipés associés au prolongement de la participation du Canada au projet de l'ISS jusqu'en 2020.
2. Améliorer la documentation pour le processus d'analyse des risques, surtout en ce qui a trait à l'évaluation de la probabilité d'atteinte des résultats escomptés et des répercussions potentielles.
3. Discuter avec le Secrétariat du Conseil du Trésor (SCT) afin de fournir des informations plus précises sur les indicateurs utilisés dans le Cadre de mesure du rendement (CMR) pour la sous-sous-activité « Programme d'opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS » (1.2.1.1) de l'Architecture d'activités de programme (AAP), et examiner les indicateurs, au besoin.
4. Achever l'élaboration de la Stratégie de mesure du rendement du programme et la mettre en œuvre.

Les quatre recommandations ont été mises en œuvre ou sont sur le point de l'être, et la documentation pertinente a été passée en revue au cours de l'évaluation.

⁸ Agence spatiale canadienne. Direction, Audit et évaluation. (2012). Vérification du cadre de gestion du programme d'assemblage et d'entretien de la Station spatiale internationale (1.2.1.1). Projet n° 11/12 01-02. Saint-Hubert, Québec : Agence spatiale canadienne.

3 Approche et méthodes d'évaluation

3.1 But, portée et enjeux de l'évaluation

L'évaluation du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS est conforme aux exigences formulées dans la *Politique sur l'évaluation* et la *Loi sur la gestion des finances publiques*. Le rapport de l'évaluation devrait être approuvé d'ici le 31 mars 2016, tel qu'indiqué dans le Plan d'évaluation de l'ASC de 2015-2016 à 2019-2020.

L'évaluation vise la période allant de la certification de Dextre, en mars 2008, jusqu'au mois de mars 2015. La période d'évaluation a été établie en collaboration avec les membres du Groupe consultatif d'évaluation (GCE). L'évaluation porte sur les cinq éléments fondamentaux identifiés dans la *Directive sur la fonction d'évaluation* (2009) du Conseil du Trésor, laquelle traite de questions touchant la pertinence (besoin continu et harmonisation avec les priorités, le rôle et les responsabilités du gouvernement fédéral) et le rendement (obtention des résultats escomptés, démonstration d'efficience et d'économie). La liste des questions abordées dans le cadre de l'évaluation est donnée ci-dessous.

Pertinence

1. Quels besoins (politiques, économiques, scientifiques, etc.) ont amené le Canada à s'engager dans l'exploitation et l'entretien du MSS en 1988 (c.-à-d., qu'est-ce qui a précipité la participation du Canada? Ces besoins sont-ils toujours présents? Comment ces besoins ont-ils évolué au fil des années?)
2. Le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS est-il harmonisé avec les priorités du gouvernement fédéral?
3. Le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS cadre-t-il avec les rôles et les responsabilités du gouvernement fédéral?

Rendement

4. Dans quelle mesure le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS a-t-il atteint ses résultats immédiats?
5. Dans quelle mesure le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS a-t-il atteint ses résultats intermédiaires?
6. Dans quelle mesure le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS a-t-il atteint son résultat final – Nouvelles technologies et nouveaux produits et processus qui contribuent à la croissance socioéconomique?
7. Le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS a-t-il produit des résultats inattendus (positifs ou négatifs)?
8. Le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS produit-il ses extrants et ses résultats (immédiats) de la façon la plus efficace possible?
9. Y a-t-il des possibilités d'amélioration de l'économie globale du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS?

Prestation du programme

10. Les rôles et les responsabilités du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS sont-ils clairs et appropriés?

3.2 Approche et méthodes

3.2.1 Approche

L'équipe d'évaluation a travaillé en étroite collaboration avec le GCE. Parmi les membres du GCE, on retrouve des gestionnaires et des employés du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS ainsi que des représentants de la Direction, Audit et évaluation. L'équipe d'évaluation a sollicité la rétroaction du GCE au sujet des produits à livrer de l'évaluation, dont : le plan de travail du projet, le plan d'évaluation, les guides d'entrevue, le guide et les thèmes d'entrevues associées aux études de cas, la présentation des résultats préliminaires et les rapports préliminaires et finaux. Le GCE a également fourni le nom des personnes à interviewer.

3.2.2 Sources de données

3.2.2.1 Examen de la documentation

La documentation relative au SSP a été examinée afin de régler les enjeux liés à la pertinence, à l'efficacité, à l'efficience et à l'économie. L'examen de la documentation a compris les documents fournis par l'autorité de projet ainsi que les documents publics cernés par notre équipe de recherche. Une bibliographie est fournie à l'annexe B.

3.2.2.2 Entrevues avec les intervenants clés

Les entrevues approfondies menées auprès des intervenants clés permettent de recueillir des opinions et des observations éclairées à propos de la plupart des questions de l'évaluation, et elles aident à interpréter et à comprendre les données qualitatives et quantitatives recueillies grâce aux autres méthodes d'évaluation.

Sept guides d'entrevue distincts ont été élaborés, soit un pour chacune des catégories de répondants. Les premières entrevues réalisées ont servi à mettre à l'essai les guides d'entrevue. Au terme de cette étape, aucune autre modification n'a été apportée aux guides.

Les entrevues ont visé une multitude d'intervenants internes et externes. Parmi les intervenants internes, on retrouvait :

- Les gestionnaires du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS – qui sont présentement chargés de la gestion au quotidien du programme.
- Les cadres supérieurs de l'ASC – lesquels sont responsables de l'orientation stratégique globale du programme, y compris les gestionnaires antérieurs du programme.
- D'autres représentants de l'ASC fournissant un appui au programme, y compris des membres des finances et des communications, d'anciens astronautes ayant séjourné à bord de l'ISS et d'anciens présidents de l'ASC.
- De jeunes chercheurs ayant commencé leur carrière au SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS.

Parmi les intervenants externes, on retrouvait :

- Des représentants d'autres ministères participant à la réalisation du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS – y compris du ministère de l'Innovation, des Sciences et du Développement économique (ISDE – anciennement Industrie Canada) et Services publics et Approvisionnement (SPAC, anciennement Travaux publics et Services gouvernementaux Canada), lesquels sont responsables de la gestion du contrat avec l'entrepreneur principal).
- Des représentants de l'industrie – MDA, qui est l'entrepreneur principal chargé du SSP portant sur l'assemblage et l'entretien de l'ISS, et Neptec qui, bien qu'elle ne soit ni entrepreneur principal ni sous-traitant, a élaboré un système de vision qui a été utilisé pour l'assemblage de l'ISS.
- La NASA – qui est le partenaire principal et qui supervise la gestion du programme de l'ISS.

Le tableau ci-dessous présente sommairement le nombre d'entrevues réalisées par catégorie de répondants. L'échantillonnage en vue des entrevues a été dirigé⁹ – les représentants de l'ASC et notre équipe de projet ont proposé des répondants qui connaissaient le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS ou qui étaient familiers avec celui-ci. Dans quelques cas, les personnes proposées avaient déjà quitté leur poste et ne pouvaient être jointes pour une entrevue, alors que d'autres répondants proposés ont indiqué, après avoir pris connaissance de nos questions d'entrevue, qu'ils ne pouvaient pas y répondre adéquatement. Un petit nombre de répondants n'ont pas pu être joints/n'ont pas pu être interviewés au cours de la période visée par l'évaluation. Lorsque cela était possible, ces répondants ont été remplacés par d'autres répondants potentiels, selon qu'ils travaillaient ou non pour l'ASC.

⁹ Les techniques d'échantillonnage dirigé sont principalement utilisées dans le cadre d'études qualitatives. Elles visent la sélection d'unités (p. ex., individus, groupes d'individus, institutions) en fonction d'objectifs spécifiques associés aux questions d'une étude. Maxwell (1997) définit l'échantillonnage dirigé comme un type d'échantillonnage dans lequel des paramètres, des personnes ou des événements particuliers sont volontairement retenus pour la qualité des informations qu'ils peuvent fournir et qui ne peuvent être obtenues d'autres sources. (Maxwell, J. (1997). *Designing a qualitative study*. Tiré de L. Bickman & D. J. Rog (Eds.) *Handbook of applied social research methods* (pp. 69-100). Thousand Oaks, CA: Sage, p. 87).

Entrevues réalisées par catégorie

Catégorie de répondants	Nombre d'entrevues réalisées
Cadres supérieurs de l'ASC	4
Gestionnaires de programmes de l'ASC	5
ASC autres (p. ex., membres des Communications, anciens astronautes, anciens présidents)	5
Industrie (MDA – entrepreneur principal et Neptec)	5
Autres ministères	2
Jeunes chercheurs/diplômés/étudiants de deuxième cycle ayant travaillé au projet de l'ISS	2
NASA	2
Total	25

La pondération relative des réponses a été consignée au moyen de l'échelle ci-dessous. Les divers points de vue et commentaires fournis par les répondants de chacun des groupes ont aussi fait l'objet d'une analyse et d'une synthèse.

- « **Tous/presque tous** » – Les constatations correspondent à l'opinion de 90 % ou plus des répondants du groupe.
- « **Grande majorité/la plupart** » – Les constatations correspondent à l'opinion d'au moins 75 %, mais de moins de 90 % des répondants clés du groupe.
- « **Majorité** » - Les constatations correspondent à l'opinion d'au moins 50 %, mais de moins de 75 % des répondants du groupe.
- « **Certains** » - Les constatations correspondent à l'opinion d'au moins 25 %, mais de moins de 50 % des répondants.
- « **Quelques** » - Les constatations correspondent à l'opinion de moins de 25 % des répondants clés du groupe.

3.2.2.3 Questionnaire de suivi

Certaines des informations obtenues des répondants clés étaient de nature quantitative. Un court sondage a été rempli par l'entrepreneur principal.

3.2.2.4 Études de cas

Des études de cas ont été élaborées afin d'analyser en profondeur certains aspects du SSP ainsi que les technologies qui ont émané des opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS. Trois technologies ont été choisies pour faire l'objet d'analyses de cas dans le cadre de la présente évaluation, soit celles du NeuroArm, de l'IGAR et du KidsArm. Il est connu que l'élaboration de technologies spatiales et de technologies connexes nécessite beaucoup de temps (c.-à-d., les travaux portant sur les technologies visées par ces études de cas ont commencé avant la période visée par l'étude). Un sommaire des conclusions des études de cas figure à l'annexe C.

3.3 Limites

La plupart des répondants ont un intérêt direct dans le SSP. Cette limite a été atténuée en exigeant des 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, analyse documentaire, données de rendement du programme, données financières et études de cas).

La rétroaction fournie par l'industrie spatiale provenait principalement d'une seule entreprise, soit MDA. Cette limite était incontournable puisque MDA a été l'entrepreneur principal pendant toute la période couverte par l'évaluation. En fait, MDA a été le seul entrepreneur principal pour le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS pendant la grande majorité de la période au cours de laquelle le Canada a participé au programme de l'ISS. Bien que MDA ait pris part à cette évaluation par le biais d'entrevues avec des intervenants clés et la réalisation d'un sondage de suivi, le fait que l'information ne provienne que d'une seule entreprise a une incidence quant à la confidentialité de l'information fournie. L'équipe d'évaluation a travaillé avec des représentants de MDA et l'autorité de projet afin de protéger la confidentialité et de maximiser la solidité des conclusions de l'évaluation.

Il est trop tôt pour quantifier/évaluer les avantages socioéconomiques du programme. En raison de la nature même des technologies spatiales, le transfert d'une technologie vers d'autres secteurs nécessite plusieurs années et souvent, il n'est pas directement lié à une technologie spatiale en particulier. En l'absence de données quantitatives sur les avantages socioéconomiques des technologies élaborées pour le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS, l'équipe d'évaluation a tenté de cerner et de décrire ces avantages de façon qualitative.

Il est difficile d'isoler les répercussions relevant spécifiquement du programme. Tel qu'indiqué ci-dessus, le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS autorise la mise en œuvre d'autres éléments de l'AAP de l'ASC, plus spécifiquement le SSP Utilisation de l'ISS et le SP Missions spatiales habitées et soutien connexe. En ce sens, le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS est un programme opérationnel ou habilitant dont le résultat principal est l'exploitation fructueuse de l'ISS. Ainsi, il est difficile d'isoler les répercussions de ce SSP des autres programmes portant sur l'ISS ou, même, des autres programmes de l'ASC (p. ex., le Programme de développement de technologies spatiales) et d'autres facteurs contributifs (p. ex., financement fourni par d'autres partenaires de l'ISS, telle la NASA).

Il est difficile de calculer le rendement de l'investissement. Le calcul du rendement des investissements dans le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS et la comparaison avec les autres partenaires participants est une entreprise complexe qui nécessite des informations et des données qui ne sont pas publiquement disponibles ni comparables d'une administration à l'autre en raison des différences dans la manière dont chacun des partenaires réalise le programme de l'ISS, des variations du taux de change, etc.

4 Résultats

4.1 Pertinence

La nécessité de maintenir ou non le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS a été évaluée en identifiant et en examinant les besoins qui ont amené le Canada à maintenir sa participation dans le programme de l'ISS, et en déterminant si le programme de l'ISS relève du gouvernement fédéral et de l'ASC.

4.1.1 Nécessité de maintenir le programme

4.1.1.1 *Besoins qui ont justifié la participation du Canada au programme de l'ISS*

Les intervenants clés de l'ASC et de la NASA qui étaient au fait de la longue histoire de l'ISS se sont entendus pour dire que la décision du gouvernement du Canada de participer au programme de l'ISS constituait une étape logique dans l'évolution de la relation de travail étroite nouée entre la NASA et le Canada en 1969 lorsque la NASA a invité le Canada à participer au programme de la navette spatiale. À cette époque, une petite entreprise canadienne (DSMA Atcon) avait élaboré un robot spécialisé dans le chargement de combustibles dans les réacteurs nucléaires CANDU et ce robot a capté l'attention de la NASA¹⁰. En 1975, le Conseil national de recherches Canada (CNRC) et la NASA ont signé un PE qui, avec le concours du Canada, allait donner lieu au télémanipulateur robotique de la navette spatiale, aussi désigné Canadarm. Le CNRC a attribué le contrat à Spar Aérospatiale. Le premier Canadarm a été livré à la NASA en avril 1981.

Certains hauts représentants de l'ASC et de la NASA ont expliqué que la décision prise par les É.-U. et le Canada au milieu des années 1980 de collaborer à l'assemblage d'une station spatiale internationale était grandement motivée par des intérêts géopolitiques. Les É.-U. avaient l'intention de construire un complexe orbital avec la participation de leurs alliés occidentaux en réponse à la station spatiale soviétique Mir qui avait été lancée en 1986. Le Canada trouvait également séduisante cette possibilité de se joindre à un « club sélect » composé des autres pays membres du G7. Les répondants ont indiqué que le Canada a été invité à participer au programme en raison de ses excellents antécédents en matière de prestations de services de soutien au programme de la navette spatiale et de son expertise unique dans le créneau de la robotique spatiale – une capacité que les É.-U. ne possédaient pas à cette époque. Les répondants de la NASA ont insisté pour dire que la participation du Canada était essentielle. Au cours de la phase de conception, il est devenu évident que l'assemblage de la station spatiale nécessiterait l'utilisation d'un bras robotique.

Certains répondants clés (de l'ASC et d'ailleurs) ont également indiqué qu'une participation au programme permettrait au Canada de tirer profit des retombées socioéconomiques qui découleraient des futurs développements en robotique spatiale.

¹⁰ <http://www.asc-csa.gc.ca/fra/canadarm/debut.asp>

4.1.1.2 Répercussions découlant du prolongement du programme de l'ISS jusqu'en 2024

Tel qu'indiqué à la section 2, le budget de 2015 a annoncé le prolongement de la participation du Canada à la mission de l'ISS jusqu'en 2024. Selon les modalités actuelles, le programme de l'ISS est financé au moyen du budget de services votés de l'ASC jusqu'en 2020. La décision du gouvernement du Canada de maintenir sa participation dans le cadre du programme de l'ISS jusqu'en 2024 nécessite l'affectation de fonds. Par conséquent, l'Agence devra étudier d'éventuels mécanismes de financement. Même si tous les répondants clés affirment appuyer cette décision (qui, selon l'avis de certains, a été prise relativement tôt), quelques répondants externes ont souligné que les intervenants n'ont pratiquement pas été consultés avant l'annonce de la décision. Ils se demandent d'ailleurs si le Canada aurait pu négocier une meilleure entente avec la NASA s'il avait pris plus de temps (p. ex., s'approprier un rôle plus important à bord de l'ISS ou établir un rôle dans le cadre des futures missions).

Le principal enjeu lié au prolongement de la participation du Canada est que ce dernier pourrait exercer des pressions budgétaires sur l'ASC. Plusieurs répondants internes et externes ont expliqué que plus l'ISS vieillit, plus elle aura besoin de réparations et de pièces de rechange (c.-à-d., que les risques de défaillance augmenteront). Par exemple, la NASA a indiqué que les huit batteries branchées aux panneaux solaires sont sur le point d'atteindre la fin de leur durée de vie utile et que les travaux visant leur remplacement viennent à peine de commencer (avec l'aide de Dextre). Ces travaux se poursuivront d'ailleurs au cours de la prochaine année. Les représentants de l'ASC ont indiqué que l'ASC et le gouvernement du Canada devront planifier de façon détaillée les coûts potentiels afin de s'assurer que des ressources suffisantes sont affectées pour la période supplémentaire de quatre ans.

Les représentants de l'ASC et de la NASA ont également souligné que l'ISS peut continuer d'être exploitée tant et aussi longtemps qu'il sera possible de la maintenir opérationnelle sur les plans technologique et financier (c.-à-d., qu'il est concevable qu'elle puisse être exploitée au-delà de 2024 et qu'elle soit utilisée pour appuyer de nouvelles missions, tel qu'indiqué dans la présente section). Comme l'a expliqué un représentant de l'ASC, lorsque le programme de l'ISS est passé de la phase de l'assemblage à celle de l'exploitation (l'assemblage s'est terminé en 2010), il a fallu accorder suffisamment de temps à l'industrie et aux chercheurs pour concevoir des expériences et les réaliser à bord de l'ISS. Et cette réalité demeure aujourd'hui. La composante du programme de l'ISS qui mise sur l'utilisation du complexe orbital est perçue comme un facteur clé permettant de tirer pleinement profit de l'ISS. Ainsi, la décision de prolonger le programme jusqu'en 2024 permet à tous les partenaires de l'ISS de profiter de ces retombées. Les É.-U. déploient des efforts considérables pour maximiser ces retombées en impartissant au Center for Advancement of Science in Space (CASIS) une partie de la gestion de l'utilisation de son laboratoire national.

4.1.1.3 Justification du maintien de la participation au programme de l'ISS

Tel que mentionné ci-dessus, le Canada a déclaré qu'il avait l'intention de participer au programme de l'ISS jusqu'en 2024, et les représentants de l'ASC ont indiqué que le programme de l'ISS pourrait potentiellement être prolongé au-delà de cette date. Un représentant de l'ASC a indiqué que bien que le Canada puisse se retirer du projet de l'ISS au moment voulu, l'IGA exigerait du Canada qu'il accorde aux

É.-U. (la NASA) l'accès à l'ensemble de la propriété intellectuelle (PI) associée au MSS afin de permettre à la NASA de continuer à exploiter ce dernier sans l'intervention du Canada (il incombe de souligner qu'aucun répondant de l'ASC n'a exprimé une volonté de se retirer du programme).

La capacité de tirer pleinement profit des possibilités de recherche à bord du complexe orbital pour faire progresser les technologies canadiennes par le biais de démonstrations en orbite, et la possibilité de continuer d'envoyer des astronautes canadiens à bord de l'ISS, tel qu'expliqué ci-dessus, sont deux des principaux facteurs justifiant le maintien de la participation du Canada au programme de l'ISS. De plus, la participation continue du Canada à ce programme lui permettra de se joindre aux discussions qui ont déjà cours entre les partenaires de l'ISS au sujet de l'orientation que prendra l'exploration spatiale une fois le programme de l'ISS terminé. Les partenaires du programme de l'ISS discutent de cet enjeu afin de déterminer les objectifs d'exploration qu'ils ont en commun et d'élaborer un calendrier axé sur la nécessité d'entreprendre les travaux avant le déclassement de l'ISS. La Station spatiale internationale pourrait appuyer une autre mission (p. ex., elle pourrait servir de plateforme orbitale pour le développement et l'essai de solutions de ravitaillement robotique afin de faire évoluer les concepts de systèmes avant de les envoyer dans l'espace lointain). L'une des missions éventuelles mentionnées par les répondants clés serait l'établissement d'un avant-poste à l'un des points Lagrange (point d'équilibre entre la Terre et la Lune). Cependant, ces points sont beaucoup plus loin dans l'espace que ne l'est présentement l'ISS, qui évolue en orbite basse terrestre (LEO). L'installation d'un avant-poste ou d'un habitat à l'un de ces points permettrait de surveiller et de coordonner les communications avec une autre mission lunaire. Un système ancré à l'un de ces points serait idéal pour la gestion des situations de crise (p. ex., en cas de situation d'urgence sur la Lune). Une telle plateforme pourrait également servir d'escale, notamment pour accueillir des touristes lunaires, ou de station de réparation pour de futures missions. Tel qu'indiqué dans la Feuille de route mondiale pour l'exploration¹¹, les missions précurseuses qui visent à démontrer les capacités et les technologies en vue de missions lunaires appuient les objectifs à long terme, et plus spécifiquement celui d'atteindre la planète Mars.

Des représentants de l'industrie ont également indiqué que le maintien de la participation du Canada au programme de l'ISS contribue à améliorer l'expertise en robotique spatiale du Canada sur une base continue. Par exemple, en délaissant l'assemblage au profit de l'utilisation du complexe orbital, de nombreuses charges utiles seront envoyées vers l'ISS, certaines en vue d'expériences menées à bord de la station, certaines autres pour des expériences menées dans le vide spatial (lesquelles nécessiteront l'utilisation du MSS). Chacune des charges utiles possède un élément technique, ce qui permet à l'industrie (et à l'ASC) de continuer à élaborer ses capacités en robotique spatiale.

¹¹ International Space Exploration Coordination Group (ISECG). (Septembre 2011). *The Global Exploration Roadmap*. Consulté le 17 novembre 2015 à l'adresse http://www.nasa.gov/pdf/591067main_GER_2011_small_single.pdf.

4.1.2 Harmonisation avec les priorités fédérales

Le *Cadre de la politique spatiale du Canada*¹² énonce les priorités du gouvernement fédéral en ce qui a trait aux activités menées dans l'espace. La plupart des répondants de l'ASC et de l'extérieur estiment que le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS est généralement harmonisé avec le cadre. En fait, l'ISS, le Canadarm2 et Dextre occupent une place importante dans le *Cadre de la politique spatiale du Canada*.

Le Cadre s'articule autour de cinq principes clés (les intérêts canadiens d'abord; le positionnement du secteur privé à l'avant-plan des activités spatiales; le progrès grâce aux partenariats; l'excellence dans les capacités clés et une source d'inspiration pour les Canadiens). La majorité des répondants a indiqué que le programme de l'ISS s'harmonise avec les thèmes de l'inspiration, des partenariats, des capacités clés et de l'innovation. Ils ont fréquemment indiqué que le programme des astronautes canadiens inspire grandement la population canadienne et que le programme de l'ISS constitue, à l'heure actuelle, le seul mécanisme par lequel le Canada peut envoyer ses astronautes dans l'espace. Bien entendu, les partenariats ont constitué la pierre d'assise sur laquelle la NASA, le Canada et les autres agences coopérantes ont fondé la mission de l'ISS. Le programme de l'ISS est passablement aligné sur le thème des capacités clés puisqu'il est axé sur le développement des capacités en robotique spatiale du Canada, mais il ne soutient aucune autre capacité, telles les télécommunications et la télédétection qui sont des champs d'activité soutenus par d'autres programmes de l'ASC. L'innovation est démontrée de nombreuses façons, notamment par l'évolution du Canadarm. Le Canadarm1 faisait partie intégrante du programme de la navette spatiale; le Canadarm2 est un élément essentiel du programme de l'ISS; le programme Nouvelle génération de Canadarm (NGC) a vu le jour afin de stimuler le développement plus poussé des capacités en robotique spatiale; et les possibilités d'envoyer des missions d'exploration habitées au-delà de l'orbite basse terrestre constituent la prochaine étape logique pour la technologie à créneau canadienne. Un autre exemple est la dépendance de plus en plus forte de la mission de l'ISS envers les éléments robotiques commandés depuis le sol plutôt que par des astronautes, ce qui libère du temps d'équipage en orbite. Ainsi, les astronautes peuvent passer plus de temps à réaliser des expériences plutôt que d'exécuter des tâches quotidiennes d'entretien. Plusieurs technologies, qui sont aujourd'hui utilisées dans des secteurs d'activités n'ayant aucun lien avec l'espace, sont issues du programme de l'ISS (il est question de ces applications dans la section du présent chapitre portant sur le rendement).

La *Stratégie en matière de sciences, de technologie et d'innovation*, qui a été publiée récemment, indique que les initiatives comme celles de l'ISS et du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS sont nécessaires. La stratégie présente les résultats d'un récent sondage international évaluant les compétences d'étudiants en littérature, en mathématiques et en sciences. Il ressort de ce sondage que les jeunes Canadiens se situent au-delà de la moyenne de l'Organisation de coopération et de

¹² Agence spatiale canadienne. (2014). *Cadre de la politique spatiale du Canada : L'envol de la prochaine génération*. Consulté le 20 juillet 2015 à l'adresse suivante : <http://www.asc-csa.gc.ca/fra/publications/politique-spatiale/default.asp>

développement économiques (OCDE). Toutefois, puisque les autres pays accordent beaucoup d'importance à l'éducation, le rendement du Canada en sciences et en mathématiques doit suivre le rythme. La Stratégie souligne également que l'attitude des jeunes envers ces matières pourrait constituer un problème potentiel. Seulement deux jeunes sur cinq disent qu'ils seraient intéressés à travailler dans le domaine de la science, de la technologie, de l'ingénierie et des mathématiques. Même si l'éducation relève des compétences provinciales, le gouvernement fédéral peut stimuler l'intérêt pour la science, la technologie, l'ingénierie et les mathématiques chez les jeunes Canadiens, en dehors des classes. Grâce à sa grande capacité à inspirer la population, l'exploration spatiale cadre avec cet objectif¹³.

Quelques répondants clés ont fait valoir qu'on pourrait dire que le programme de l'ISS est moins harmonisé avec le thème « Les intérêts canadiens d'abord » puisque le programme n'est pas lié à la sécurité ou à la souveraineté nationales et que les investissements faits dans les créneaux des communications par satellites et de la télédétection profiteraient davantage à l'industrie canadienne. Néanmoins, tous les répondants clés estiment que le programme est harmonisé, dans son ensemble, avec la *Cadre de la politique spatiale*.

Bien que ce soit très récent, et donc non compris dans la période d'évaluation, il incombe de souligner que le maintien de la participation du Canada au programme de l'ISS cadre également avec la priorité accordée par le gouvernement du Canada à l'innovation et aux sciences, tel qu'énoncé dans le *Discours du Trône* (décembre 2015)¹⁴.

4.1.3 Harmonisation avec les rôles et les responsabilités du gouvernement fédéral

Tous les répondants clés conviennent qu'il est approprié pour le gouvernement fédéral de gérer la portion canadienne du programme de l'ISS puisque l'IGA est un accord international qui ne peut être signé et géré que par le gouvernement du Canada.

Que l'ASC soit chargée du programme de l'ISS est conforme aux pouvoirs qui lui sont conférés en vertu de la *Loi sur l'ASC*, laquelle loi énonce que l'Agence est autorisée à : « collaborer avec les agences spatiales — ou les organismes œuvrant dans un domaine connexe — d'autres pays à l'exploitation et l'usage pacifiques de l'espace. »

¹³ Industrie Canada. (2014). Un moment à saisir pour le Canada : Aller de l'avant dans le domaine des sciences, des technologies et de l'innovation 2014. Consulté le 20 juillet 2015 à l'adresse [https://www.ic.gc.ca/eic/site/icgc.nsf/vwapj/Moment_saisir_rapport_ST-I-2014-fra.pdf/\\$file/Moment_saisir_rapport_ST-I-2014-fra.pdf](https://www.ic.gc.ca/eic/site/icgc.nsf/vwapj/Moment_saisir_rapport_ST-I-2014-fra.pdf/$file/Moment_saisir_rapport_ST-I-2014-fra.pdf)

¹⁴ Gouvernement du Canada. (2015). Réaliser le vrai changement. *Discours du Trône* ouvrant la première session de la quarante-deuxième législature du Canada. Le 4 décembre 2015. Consulté le 17 décembre 2015 à l'adresse <http://discours.gc.ca/fr/contenu/realiser-le-vrai-changement>

4.2 Rendement

Cette section traite des questions de l'évaluation portant sur le rendement du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS, y compris de l'atteinte des résultats, de l'économie et de l'efficacité.

4.2.1 Atteinte des résultats immédiats

Cette section présente les constatations relatives à l'atteinte des résultats immédiats, soit à savoir si :

- le Canada a tiré profit des possibilités d'exploitation de l'ISS et de vols spatiaux habités;
- le rôle de chef de file du Canada en robotique spatiale a été maintenu ou amélioré;
- la réputation du Canada parmi les partenaires internationaux a été maintenue ou améliorée;
- les capacités du secteur spatial canadien et le PHQ ont été maintenus ou améliorés;
- le public canadien a été informé au sujet de la technologie utilisée sur l'ISS (exploits dans l'espace).

Il est important de souligner que bien que cette évaluation porte sur le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS, un certain nombre de résultats identifiés, dont les résultats immédiats, pour ce SSP ne sont pas directement influencés par le SSP. Plus spécifiquement, le SSP n'a aucune influence sur les possibilités de vols spatiaux habités et d'utilisation de l'ISS, ni sur la mesure dans laquelle le public canadien est informé des technologies associées à l'ISS. Le SSP peut autoriser ou faciliter la réalisation de ces résultats immédiats, bien que ceux-ci relèvent d'autres programmes de l'ASC. Or, les résultats sont influencés par la participation globale de l'ASC au programme de l'ISS. Tel que mentionné précédemment, les résultats associés aux vols spatiaux habités et à l'utilisation de l'ISS seront abordés plus en profondeur dans le cadre d'une évaluation distincte, conformément au Plan d'évaluation ministériel de l'ASC de 2015-2016 à 2019-2020.

4.2.1.1 Possibilités de vols spatiaux habités et d'utilisation de l'ISS

L'ISS est occupée en permanence depuis le 2 novembre 2000. En 2009, le nombre d'astronautes vivant à bord de la station spatiale a été accru de trois à six. Les systèmes de vol fournissent un environnement sécuritaire, confortable et habitable dans lequel les membres d'équipage peuvent mener des travaux de recherche scientifique. Ces systèmes de vol comprennent des logements, des contrôles environnementaux, un soutien sur le plan médical et de la santé et la gestion des données et des calculateurs¹⁵.

Les répondants (de l'ASC et de l'extérieur) s'entendaient pour dire que le programme de l'ISS constitue la seule option possible pour envoyer des Canadiens dans l'espace. Un des représentants de l'ASC a expliqué que le programme de l'ISS a permis au Canada de participer directement à des vols spatiaux et

¹⁵ National Aeronautics and Space Administration. (Novembre 2010) Reference Guide to the International Space Station: Assembly Complete Edition. (Novembre 2010). Consulté le 19 août 2015 à l'adresse http://www.nasa.gov/pdf/508318main_ISS_ref_guide_nov2010.pdf.

que ceci est un indicateur de l'importance du Canada en tant que partenaire dans le programme de l'ISS. Un autre représentant de l'ASC a mentionné qu'il serait difficile et coûteux pour le Canada d'obtenir des possibilités de vols spatiaux habités par d'autres moyens – par exemple par le biais des programmes de l'ESA. Toutefois, un des répondants ne faisant pas partie de l'ASC a indiqué que sans l'ISS, le Canada disposerait de fonds pour réaliser d'autres missions spatiales habitées. En somme, cet intervenant voulait dire qu'il y a toujours des compromis.

Les astronautes canadiens qui sont allés dans l'espace au cours de la période visée par l'évaluation sont les suivants :

- Julie Payette – du 15 au 31 juillet 2009 (16 jours);
- Robert Thirsk – du 27 mai au 1^{er} décembre 2009 (188 jours);
- Chris Hadfield – du 19 décembre 2012 au 1^{er} mai 2013 (146 jours).

Le tableau ci-dessous présente le nombre total d'astronautes canadiens qui ont séjourné à bord de l'ISS pendant la période visée par l'évaluation, ainsi que le nombre total de jours-astronautes canadiens dans l'espace.

Tableau 4 : Nombre d'astronautes canadiens dans l'espace, de 2008-2009 à 2014-2015

	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015
Nombre d'astronautes canadiens dans l'espace	0	2	0	0	1	1	0
Nombre de jours-astronautes canadiens à bord de l'ISS	0	204	0	0	103	43	0

Source : Données de l'ASC sur le rendement du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS, août 2015.

Selon un document produit par le personnel de l'ASC en 2012¹⁶, le MSS est de plus en plus commandé depuis le sol, ce qui libère du temps d'équipage en orbite pour les activités d'exploitation du complexe orbital. Ainsi, les ressources de l'ISS continuent d'être exploitées et le Canada prend part à plusieurs expériences à bord de la station.

Les répondants (de l'ASC et de l'extérieur) s'entendent pour dire que les activités d'exploitation du MSS ont régulièrement satisfait toutes les demandes du programme de l'ISS. Plus particulièrement, des représentants de la NASA ont souligné que le MSS a fourni à la NASA de très bons services de soutien et que l'utilisation du Canadarm2 est devenue monnaie courante sur l'ISS. La quasi-totalité des répondants a indiqué que les activités d'exploitation du MSS ont été réalisées « à la perfection ». Les informations et

¹⁶ Metcalfe, L., M. Ciaramicoli, P. Jean, P. Johnson-Green et E. Tabarah (2012). *Canada and the International Space Station Program: Overview and Status since IAC 2011*. 63rd International Astronautical Congress 2012 (IAC 2012), Naples, Italie, du 1er au 5 octobre 2012, IAC-11.B2.2.1.

les données sur la mesure du rendement contenues dans les *Rapports ministériels sur le rendement (RMR)* de l'ASC¹⁷ soutiennent ce point de vue.

Une présentation effectuée par des gestionnaires de l'ASC lors du Congrès international d'astronautique de 2009¹⁸ a fait état d'une utilisation record des ressources de l'ISS et de plusieurs expériences embarquées parrainées par le Canada. L'expérience Corps en milieu spatial (BISE, pour Bodies in Space Environment) a continué de recueillir des données en vue d'évaluer l'influence de la pesanteur sur la perception du haut et du bas, et les expériences avancées sur les plantes en orbite (APEX) ont étudié l'incidence de la pesanteur sur la formation du bois. Les expériences VASCULAR et HYPERSOLE, quant à elles, se penchent sur les effets de la microgravité sur le corps humain. Le Canada a choisi de concentrer principalement ses activités d'utilisation de l'ISS sur la réalisation d'expériences liées à la santé.

Le tableau ci-dessous résume le nombre d'expériences/de projets de recherche réalisés à bord de l'ISS et auxquels le Canada a participé au cours de la période visée par l'évaluation. Il importe de souligner que le nombre d'expériences réalisées ne reflète pas la complexité ou l'importance/la valeur scientifique de celles-ci. Il incombe également de rappeler que le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS n'a aucune influence sur le nombre d'expériences réalisées à bord de l'ISS. Il facilite plutôt l'exploitation fructueuse du complexe orbital. Les expériences menées à bord de l'ISS seront traitées en détail dans l'évaluation du SSP Utilisation de l'ISS de l'ASC qui aura lieu à une date ultérieure.

Tableau 5 : Nombre d'expériences/de projets de recherche scientifique menés à bord de l'ISS et auxquels a participé le Canada, de 2008-2009 à 2014-2015

	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015
Nombre d'expériences menées à bord de l'ISS	2	7	4	2	4	5	3

Source : Données de l'ASC sur le rendement du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS, août 2015.

Le tableau ci-dessous présente sommairement le nombre d'heures d'utilisation du MSS au cours de la période visée par l'évaluation. Le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS n'a aucun contrôle direct sur le nombre d'heures de fonctionnement du système; le SSP satisfait les besoins du programme de l'ISS tels que cernés par la NASA. Bien que, la plupart du temps, les besoins opérationnels sont établis d'avance, il arrive que le SSP soit mobilisé pour réaliser des activités imprévues, comme des travaux de réparation de l'ISS (p. ex., déchirures dans les panneaux solaires).

¹⁷ Agence spatiale canadienne. Rapports ministériels sur le rendement. Consultés à l'adresse <http://www.asc-csa.gc.ca/fra/publications/rp.asp>

¹⁸ Sponder, L., G. Leclerc, P. Jean, P. Johnson-Green et T. H. Braithwaite (2010). *Canada and the International Space Station Program: Overview and Status since IAC 2009. Proceedings of the 61st International Astronautical Congress (IAC 2010)*, Prague, République tchèque, du 27 septembre au 1^{er} octobre 2010. IAC-10.B3.1.3.

Tableau 6 : Nombre d'heures d'exploitation du MSS, de 2008-2009 à 2014-2015

	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015
Nombre d'heures d'exploitation	570	680	735	545	840	640	600

Source : Données de l'ASC sur le rendement du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS, octobre 2015.

4.2.1.2 Rôle de chef de file du Canada en robotique spatiale

4.2.1.2.1 Leadership en robotique spatiale

Les bras robotiques (Canadarm2 et Dextre) installés sur l'ISS sont essentiels au déroulement des activités suivantes : assemblage et entretien de l'ISS, appui aux expériences menées à l'extérieur de l'ISS, saisie de véhicules de réapprovisionnement et manipulation des charges utiles envoyées à la station, appui aux activités extravéhiculaires et aide à la réalisation des autres activités scientifiques. Ces systèmes robotiques peuvent réaliser des tâches simples, comme positionner des caméras, ainsi que des tâches complexes comme la manipulation et l'installation de modules pesant 20 000 kg. Les contrôles de sécurité et la formation sont des éléments clés essentiels à l'utilisation fructueuse des systèmes robotiques dans des environnements spatiaux habités¹⁹.

Les intervenants (de l'ASC et de l'extérieur) qui ont répondu à cette question s'entendaient tous pour dire que le Canada constitue toujours un chef de file en robotique spatiale et que le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS a directement contribué à améliorer cette position de chef de file. Certains représentants de l'ASC ont signalé que le Canada a été invité à participer au programme de l'ISS en raison de son expertise de longue date en robotique spatiale. Ce point de vue est partagé par un cadre supérieur de la NASA qui a expliqué « qu'avec le recul, peut-être que la NASA ou un autre pays aurait pu construire un bras robotique, mais la participation du Canada était naturelle : le Canada possédait les outils et la NASA avait une confiance totale envers le Canada vu l'expérience de ce dernier avec le Canadarm de la navette spatiale ». Un des répondants a indiqué que même si le Canada n'est pas le seul pays à avoir installé des outils robotique sur l'ISS, les systèmes robotiques de ce dernier « captent toute l'attention médiatique » puisqu'ils exécutent tous les travaux les plus importants et les plus médiatisés. L'évaluation de 2003 visant le Grand projet de l'État – Programme canadien de la station spatiale confirme ce point de vue. L'évaluation a conclu que le programme a permis au Canada de maintenir sa position de chef de file en robotique spatiale, en grande partie grâce aux succès du Canadarm²⁰.

Bien que le Canada maintienne une position de chef de file en robotique spatiale, certains répondants (de l'ASC et de l'extérieur) ont indiqué que cette position ne peut pas être tenue pour acquise. D'autres pays comme le Japon, la Russie et les États membres de l'ESA rattrapent le retard. Plus spécifiquement,

¹⁹ Chang, V. and L. Evans (2009). Robotic systems safety. *Safety Design for Space Systems*: 301-318.

²⁰ Agence spatiale canadienne. Direction, vérification et évaluation (avril). Évaluation du grand projet de l'État – Programme canadien de la Station spatiale (GPÉ-PCSS). Rapport d'évaluation. Projet n° 02/03-02-01. Saint-Hubert (Québec) : Agence spatiale canadienne.

un des représentants de l'ASC a mentionné que les É.-U. ont une politique exigeant de la NASA qu'elle élabore des systèmes robotiques – cette exigence fait partie d'une directive présidentielle²¹. Pour certains répondants, cela indique qu'une concurrence accrue se pointe à l'horizon dans le créneau de la robotique spatiale. Toutefois, un représentant de l'ASC était quelque peu en désaccord avec cette affirmation. Ce dernier a mentionné que le fait que d'autres pays se lancent dans le créneau de la robotique spatiale ne constitue pas une menace immédiate pour le Canada – cette menace ne se concrétisera que si le Canada cesse d'apporter des améliorations continues au Canadarm2 et à Dextre et s'il cesse de fournir des systèmes robotiques novateurs aux futures missions spatiales. Ce répondant ne croyait pas qu'à l'heure actuelle, d'autres pays investissent massivement en robotique spatiale dans le but de prendre la place de leader du Canada.

4.2.1.2.2 Innovations technologiques émanant du programme

Selon les répondants (de l'ASC et de l'extérieur), la capacité de commander les systèmes robotiques depuis le sol constitue l'innovation la plus importante et la plus tangible ayant découlé du MSS. Cette innovation signifie que la majorité des activités peuvent désormais être réalisées depuis un poste au sol sans l'intervention d'un humain en orbite, ce qui permet de libérer du temps d'équipage pour que les astronautes puissent réaliser d'autres activités, comme des expériences et des travaux scientifiques. Un article publié par S. Aziz²² en 2013 soulignait que l'ajout de Dextre bonifiait les capacités du MSS et introduisait une importante complexité aux activités robotiques de l'ISS. Bien que le concept original de Dextre prévoyait un contrôle avec humain dans la boucle (un astronaute en orbite), la complexité de l'entretien robotique et les coûts connexes associés à la formation des opérateurs et au maintien des compétences nécessaires à l'utilisation de Dextre ont exigé la révision de ces concepts. Une nouvelle approche à l'entretien robotique de l'ISS a été élaborée afin d'utiliser efficacement et en toute sécurité les capacités de Dextre tout en réduisant le coût des activités menées en orbite.

Les répondants ont indiqué que la capacité de commander Dextre et le Canadarm2 depuis le sol avait accru la sécurité des astronautes. Quelques représentants de l'ASC ont expliqué que lorsque Dextre a été lancé, il était conçu pour être commandé entièrement depuis le sol – au départ, cette conception a été accueillie non sans résistance. Le Canada a apporté d'importants changements au logiciel – les modifications ont toujours été faites en collaboration avec la NASA, et le contrat/l'entente avec la NASA a fourni à l'équipe canadienne toute la souplesse dont elle avait besoin pour mettre au point ces améliorations. Quelques représentants de l'ASC ont indiqué que le gouvernement impose présentement une immense pression sur la NASA pour qu'elle utilise davantage l'ISS. Donc, le fait de libérer du temps d'équipage a été très bénéfique à cet égard.

Un représentant de l'ASC a expliqué que lorsque le MSS a été élaboré puis construit, il a fallu satisfaire un ensemble d'exigences. Le système a été spécifiquement construit pour satisfaire ces exigences, mais dès 2001, certaines conditions ont obligé les responsables du SSP Opérations d'assemblage et

²¹ Voir <https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2010/edu.html>.

²² Aziz, S. (2013). "Development and verification of ground-based tele-robotics operations concept for Dextre." *Acta Astronautica*. 86: 1-9.

d'entretien de l'ISS à planifier et à élaborer des améliorations afin de rendre le système davantage sécuritaire et d'accroître la probabilité de succès de la mission. Par exemple, l'extrémité du Canadarm2 tend à osciller lorsque cette partie du bras robotique est accélérée ou ralentie (un peu comme si l'on plaçait un poids lourd à l'extrémité d'une canne à pêche). Des ingénieurs en logiciels de l'ASC ont résolu ce problème en ajoutant une rétroaction dans le système de commande de logiciel et en assurant le contrôle et la précision du positionnement de l'extrémité du bras robotique.

4.2.1.2.3 Systèmes robotiques spatiaux du Canada destinés à d'autres missions

Les répondants ont été en mesure de fournir des exemples de missions ou de projets pour lesquels on a demandé au secteur spatial canadien de fournir des éléments robotiques, mais certains de ces exemples remontent à plusieurs années. Certains répondants ont mentionné la réparation du télescope spatial Hubble pour laquelle MDA avait obtenu un contrat de la NASA en vue de l'utilisation du bras de rechange de Dextre, qui était alors situé dans les installations de MDA. La NASA devait choisir entre désatelliser Hubble en le faisant retomber sur Terre ou le réparer afin de prolonger sa durée de vie utile. Après mûres réflexions, elle avait décidé d'investir dans le télescope et de mettre sur pied une mission spécialisée de réparation robotique; mais au final, la NASA a repris confiance envers une mission d'amarrage entre la navette et Hubble et donc, la mission robotique a été annulée. Les répondants ont indiqué que MDA avait effectué avec succès des démonstrations illustrant que le concept de réparation robotique fonctionnait.

Certains autres répondants (de l'ASC et d'ailleurs) ont fourni l'exemple de la technologie de ravitaillement de satellites, aussi connue sous le nom d'Infrastructure de dépannage spatial (SIS pour Space Infrastructure Servicing). Le concept est simple. Un engin spatial serait envoyé à la rencontre d'un satellite et un système robotique serait mis à profit pour ravitailler ce dernier en combustible et ainsi accroître sa durée de vie. Toutefois, un représentant de l'ASC a indiqué que les coûts associés à la construction et au lancement de satellites ont considérablement diminué, ce qui pourrait nuire à la viabilité commerciale de cette technologie. Des représentants de l'industrie ont mentionné que MDA continue de développer le potentiel commercial de cette solution de ravitaillement de satellites. Ces répondants ont souligné que la technologie a fait l'objet de démonstrations fructueuses, et un des répondants a indiqué que la mentalité des opérateurs de satellites commerciaux est en train de changer et qu'ils sont davantage ouverts à l'idée d'utiliser la SIS. Comme l'ont fait savoir quelques représentants de l'industrie, dans l'avenir, les satellites seront construits de manière à être réparés et ravitaillés en orbite.

Quelques répondants (de l'ASC et d'ailleurs) ont décrit l'Unité de vision artificielle (AVU) construite par Neptec et qui se trouve sur le laboratoire américain. Selon l'un des répondants, l'AVU a déjà été un outil clé fournissant des données supplémentaires et précises de positionnement pour les charges utiles fixées à l'extrémité du Canadarm2, lors de l'assemblage de l'ISS. L'AVU a été déclassée en 2010, mais l'ASC songe à la remettre en service afin d'introduire une souplesse supplémentaire au MSS en lui conférant une plus grande autonomie, ce qui simplifierait l'exploitation de ce dernier. Le projet n'en est cependant qu'à la phase de conception et porte surtout sur l'élaboration de nouvelles technologies destinées aux systèmes robotiques futurs.

Un des répondants a indiqué qu'il arrive souvent que le Canada soit invité à participer à des missions et à des projets nécessitant des systèmes robotiques spatiaux, sans que celui-ci ne puisse le faire en raison de contraintes budgétaires. Exemples de missions et de projets où des systèmes robotiques spatiaux canadiens ont été sollicités sans que cela ne se concrétise : systèmes robotiques requis pour la mission Mars 2020 de la NASA, mission Phoenix de la Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) des É.-U., et mission Lunar Resource Prospector (prospection des ressources lunaires). Un accroissement du financement permettrait le recours à des systèmes robotiques canadiens dans un plus grand nombre de missions et de projets. En d'autres termes, selon ce répondant, l'adoption des systèmes robotiques canadiens dépend du financement accordé par le gouvernement canadien et non pas de la technologie, qui elle est bien élaborée.

4.2.1.3 Réputation du Canada auprès de ses partenaires

4.2.1.3.1 Réputation auprès des partenaires

Les répondants (représentants de l'ASC et de l'extérieur) se sont entendus pour dire que la réputation du Canada s'est améliorée suite aux travaux réalisés dans le cadre du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS. Plus spécifiquement, des représentants de la NASA ont dit que le Canada est perçu comme un solide partenaire et que la NASA et les autres agences spatiales accordent une très grande valeur à son expertise. Un représentant de la NASA a souligné le fait que le Centre de contrôle canadien, installé à St-Hubert, au Québec, représente un arrangement unique avec la NASA (cet arrangement permet d'avoir une fonction névralgique à l'extérieur du territoire des É.-U.). Comme preuve additionnelle de la bonne réputation du Canada, quelques répondants de l'extérieur de l'ASC ont indiqué que le Canada s'est fait offrir de prendre part à des missions spatiales de plus grande envergure en raison de son expertise en robotique spatiale. Ces invitations sont notamment venues de la DARPA et du Goddard Space Flight Centre, un centre de la NASA. Ces derniers ont offert au Canada la possibilité de participer au développement d'un projet d'entretien en orbite de prochaine génération.

Quelques représentants de l'ASC ont indiqué que bien que le Canada ne contribue qu'à hauteur de 2,3 % pour les coûts liés à l'ISS (c.-à-d., que le Canada n'est qu'un très petit partenaire sur le plan du financement), il n'est pas traité comme tel par la NASA – en fait, le Canada est perçu par ses partenaires comme ayant davantage d'influence à l'international que sa taille ou l'ampleur de sa contribution technologique au programme de l'ISS pourraient le laisser croire. Comme l'a dit Chris Hadfield : « Nous sommes le plus petit partenaire du programme de l'ISS et malgré cela, nous avons le rôle le plus essentiel. Le Canada bénéficie d'une position tout à fait enviable, et j'en suis l'incarnation. Un astronaute canadien a été nommé au poste de commandant de l'ISS, et il n'est pas exclu que cela se reproduise à nouveau ».

4.2.1.3.2 Solutions novatrices de réparation et d'entretien

Les répondants (c'est-à-dire des représentants de l'ASC et d'ailleurs) ont fourni quelques exemples de solutions novatrices de réparation et d'entretien de l'ISS mises au point par le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS, dont les suivantes :

- Avant 2008, s'il y avait une défaillance de la poutrelle (c.-à-d., une panne d'électricité touchant le MSS), il fallait réaliser une sortie extravéhiculaire d'urgence. Un nouveau boîtier électrique a été ajouté afin de pallier ce risque.
- Plusieurs mises à jour logicielles ont été faites afin de réduire la charge imposée aux systèmes robotiques et d'accroître la durée de vie utile de ces derniers.
- Un système d'inspection de la coque extérieure de la navette spatiale au moyen d'une perche a été élaboré. Cette solution a contribué directement au retour en vol de la flotte des navettes spatiales après la catastrophe de la navette Columbia.
- Une déchirure dans un des panneaux solaires a été réparée au moyen des systèmes robotiques canadiens de la navette spatiale et de l'ISS, avec le concours d'un astronaute en sortie extravéhiculaire et d'outils fabriqués à la main.
- Des interfaces pour le transfert robotique de charges utiles ont été élaborées (p. ex., au moyen du sas japonais).
- Des solutions de contournement (p. ex., retrait de systèmes électroniques défaillants n'ayant pas été nécessairement construits pour être compatibles avec des systèmes robotiques) ont été mises au point.

D'autres solutions novatrices pour la réparation de l'ISS et élaborées par le SSP ont été cernées dans l'examen de la documentation. Un article publié par Poynter et Keenan (2012)²³ décrit comment, le 28 août 2011, le robot agile spécialisé Dextre, appuyé par le Canadarm2, a retiré avec succès un module de télécommande et d'alimentation (RPCM) défaillant à même un segment de la poutrelle intégrée de l'ISS. Ces manipulations fines ont nécessité une infime précision dans l'environnement extérieur inhospitalier et thermiquement variable de l'ISS, ainsi qu'une capacité de retour de force et de contrôle de l'équipement. Au final, la première activité de démonstration d'entretien entièrement robotique de l'ISS a été couronnée de succès.

Un article de R. Rembala (2011)²⁴ décrit comment, le 27 janvier 2011, le Canadarm2, commandé par un astronaute à bord de l'ISS, a suivi et saisi avec succès le véhicule de transfert japonais H-II (HTV2) de 10 500 kg alors qu'il flottait librement à moins de 10 mètres de la station spatiale. Après avoir guidé avec précision le HTV2 jusqu'à son port d'amarrage sur l'ISS, le Canadarm2 et Dextre ont entrepris de décharger les pièces de rechange destinées à l'ISS et à les transférer et de les ranger sur une palette logistique Express (ELC). Ces activités de télérobotique, réalisées par des opérateurs au sol installés aux É.-U. et au Canada, ont nécessité une extrême précision ainsi que des capacités de retour de force et de contrôle de l'accommodation. Elles ont d'ailleurs permis de démontrer avec succès certaines des tâches de robotiques les plus perfectionnées réalisées dans l'espace à ce jour.

²³ Poynter, L. and P. A. Keenan (2012). *The role of dexterous robotics in ongoing maintenance of the ISS*. 63rd International Astronautical Congress 2012 (IAC 2012), Naples, Italie, du 1^{er} au 5 octobre 2012, Volume 5 de 14 : IAC-12.B3.4-B6.5.6

²⁴ Rembala, R. (2011). *The evolution of tele-robotics on ISS and enabling of unmanned on-orbit services*. 62nd International Astronautical Congress 2011 (IAC 2011), Cape Town, Afrique du Sud, du 3 au 7 octobre 2011, Volume 4 de 12 : IAC-11.B3.4.-B6.6.10

Un article publié par S. Aziz²⁵ en 2010 décrit le succès de la mission d'assemblage STS-120/ISS 10A. Contrairement aux missions antérieures qui ont pris fin lorsque la navette spatiale s'est désamarrée de l'ISS, des activités névralgiques d'assemblage ont dû se poursuivre après le départ de la navette afin de déplacer le module Harmony vers son emplacement permanent et de mettre les systèmes de ce dernier sous tension. Au total, la mission a duré environ un mois et nécessité la réalisation de sept sorties extravéhiculaires, de plus d'une vingtaine d'opérations robotiques d'envergure et de nombreuses heures de commande depuis le sol. La mission a visé le déplacement du segment P6 sur la poutrelle P6, du nœud Z1 jusqu'à son emplacement permanent sur la poutrelle P5. Cette opération a nécessité une séquence de manœuvres robotiques et de sorties extravéhiculaires fortement chorégraphiées pendant trois jours, la reconfiguration de la structure de l'ISS en vue de fixer Harmony (nœud 2) au module laboratoire américain Destiny, et une séquence de manœuvres robotiques complexes pendant six jours dont la majorité ont été exécutées après le départ de la navette spatiale. Ces manœuvres comprenaient une quantité sans précédent d'opérations robotiques commandées depuis le sol.

En septembre 2009, le premier engin spatial évoluant en vol libre a été saisi par le Canadarm2 de l'ISS. Cette opération a d'ailleurs été médiatisée en tant « qu'attrapé cosmique ». Le véhicule de transfert japonais H-II (HTV) a été le tout premier d'une nouvelle classe de véhicules de transfert automatisés nécessitant l'aide du Canadarm2 pour s'amarrer à l'ISS²⁶.

4.2.1.4 Capacités du secteur spatial et PHQ

4.2.1.4.1 Nombre d'ETP

Selon les données que MDA Brampton a fournies à l'équipe d'évaluation, le nombre d'ETP affectés au contrat que MDA a réalisé pour le compte du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS a varié de 115 à 85 au cours de la période visée par l'évaluation. De ce nombre, 75 % sont des PHQ.

À l'ASC, le nombre total d'ETP employés par le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS au cours de la période visée par l'évaluation est résumé dans le tableau ci-dessous. Les données comprennent les ETP issus d'autres services de l'ASC faisant partie de la structure matricielle.

Tableau 7 : Nombre d'ETP de l'ASC affectés à l'exploitation du MSS, de 2008-2009 à 2014-2015

	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015
Nombre d'ETP de l'ASC	99,0	89,0	75,6	78,1	77,3	80,3	75,5

Source : Données de l'ASC sur le rendement du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS, octobre 2015.

²⁵ Aziz, S. (2010). "Lessons learned from the STS-120/ISS 10A robotics operations." *Acta Astronautica*. 66(1-2): 157-165.

²⁶ Lucier, L. and Smith, C., "Cosmic Catch: Canadarm2's First Capture of a Free-Flying Vehicle – Operational Risks, Considerations, and Results", *Proceedings of the 61st International Astronautical Congress (IAC 2010)*, Prague, République tchèque, du 27 septembre au 1^{er} octobre 2010, PaperIAC-10.B6.1.3

4.2.1.4.2 Répercussions du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS sur le cheminement de carrière

Tous les répondants travaillant pour le compte de l'ASC et qui ont répondu à cette question ont indiqué que leur participation au SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS avait eu des répercussions positives sur leur carrière. D'ailleurs, la quasi-totalité des répondants ont passé la plupart de leur carrière à travailler pour le compte du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS. Toutefois, quelques représentants de l'ASC ont mentionné que tous ceux et toutes celles qui réussissent à faire partie de l'équipe souhaitent progresser et obtenir des promotions, mais comme il y a un faible roulement de personnel, il y a peu de possibilités d'avancement. Comme le mentionne un répondant travaillant pour l'ASC : « l'ISS pourrait constituer un tremplin vers autre chose, mais les projets [au sein de l'ASC] n'existent tout simplement pas ». Ainsi, selon l'évaluation, ceux et celles qui travaillent pour le compte du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS à l'ASC estiment que leurs perspectives de carrière sont limitées en raison de l'absence de missions de plus grande envergure à l'ASC. Les possibilités d'avancement professionnel peuvent également être attribuables à la taille relativement petite de l'équipe à l'ASC. Les gestionnaires du programme de l'ASC ont indiqué qu'au cours de la période visée par l'évaluation, un certain nombre de PHQ ont quitté l'ASC pour aller travailler à la NASA ou pour l'un de ses sous-traitants aux É.-U.

Il y a toutefois eu divergence d'opinion des répondants à savoir si les compétences acquises dans le cadre du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS pouvaient être transférées à d'autres sphères d'activité. Les répondants provenant de l'extérieur de l'ASC et qui étaient en mesure de répondre à la question se sont entendus pour dire que les compétences acquises dans le cadre de ce SSP peuvent être transférées à d'autres industries. Le fait de pouvoir dresser une liste de l'expérience acquise dans le cadre du programme de l'ISS est perçu comme étant très profitable, puisque les normes techniques sont extrêmement rigoureuses. Un des répondants a cité en exemple l'industrie nucléaire. Les études de cas estiment que les robots à vocation médicale pourraient constituer une autre possibilité au cours des années à venir. L'expérience acquise en théorie de contrôle, en applications de vision et en ciblage sur l'ISS peut être transférée à l'industrie nucléaire (soutien aux centrales nucléaires et activités de déclasserment) et aux systèmes robotiques médicaux telles les applications du robot de neurochirurgie NeuroArm et les procédures de biopsie et d'ablation de l'IGAR dans le traitement des tumeurs.

Les points de vue des représentants de l'ASC sur la transférabilité des compétences acquises dans le cadre du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS à d'autres domaines du secteur spatial variaient – la plupart des répondants estimaient que leurs compétences n'étaient pas facilement transférables. Parmi ceux et celles qui étaient de cet avis, plusieurs ont l'impression que l'expertise qu'ils ont acquise est plutôt spécialisée et que plus longtemps ils restent à travailler pour le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS, plus difficile est le transfert de leurs compétences vers d'autres secteurs d'activité. Comme l'a souligné l'un des répondants : « les perspectives de carrière sont très limitées étant donné qu'une personne doit quitter pour qu'une autre puisse être promue ».

4.2.1.4.3 Formation fournie par le SSP

L'une des activités clés réalisées par le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS est la formation des astronautes et du personnel au sol²⁷. Le nombre d'heures de formation fournies et le nombre de personnes ayant suivi la formation au cours de la période visée par l'évaluation sont résumés dans le tableau ci-dessous. Nous remarquons que la demande pour la formation émanant des partenaires de l'ISS est cyclique et qu'elle peut varier considérablement d'une année à l'autre. Le SSP répond à la demande en matière de formation – c.-à-d. que celui-ci n'est pas en mesure d'influencer cet indicateur. Il incombe toutefois de noter que plus les activités menées sur l'ISS sont commandées depuis le sol, plus il faut former le personnel au sol. Il y a donc eu une transition de la formation offerte aux astronautes vers la formation du personnel au sol.

Tableau 8 : Formation fournie aux astronautes et au personnel au sol, de 2008-2009 à 2014-2015

	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015
Astronautes (en heures)	875	490	575	504	375	440	375
Personnel au sol (en heures)	210	130	75	65	170	145	140
Nombre de personnes ayant suivi une formation	38	27	20	15	37	29	20

Source : Données de l'ASC sur le rendement du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS, août 2015.

4.2.1.5 Sensibilisation du public aux technologies de l'ISS

4.2.1.5.1 Sensibilisation du public aux technologies de l'ISS

Selon les représentants de l'ASC interviewés, l'ASC n'effectue généralement pas le suivi des activités de communication (p. ex., nombre de consultation des pages Web) spécifiques au SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS – les efforts sont plutôt axés sur l'ISS dans son ensemble. L'ASC a récemment acquis (il y a deux ans) le logiciel Google Analytics, ce qui leur permet de recueillir facilement des données sur le nombre de fois que les pages Web portant spécifiquement sur l'ISS ont été consultées. Les statistiques relatives à la fréquentation des sites Web portant sur l'ISS que la Direction des communications et affaires publiques de l'ASC a fourni à l'équipe d'évaluation sont résumées dans le tableau ci-dessous. Il incombe de noter que les pointes dans le nombre de consultations correspondent à la période pendant laquelle l'astronaute canadien Chris Hadfield était à bord de l'ISS.

²⁷ L'ASC et son entrepreneur principal (MDA) offrent des séances de formation à l'utilisation du MSS aux astronautes et au personnel de soutien au sol. Une infrastructure au sol constituée d'un simulateur de MSS, d'un centre d'apprentissage polyvalent et d'autres équipements de formation a été élaborée afin d'autoriser cette activité.

Tableau 9 : Visites uniques du site Web de l'ASC, de 2008-2009 à 2014-2015

	2008-2009*	2009-2010	2010-2011	2011-2012*	2012-2013	2013-2014	2014-2015
Station spatiale internationale	65 785	65 770	69 025	69 425	131 644	196 327	100 523

* Remarque : Aucune donnée n'est disponible pour le mois de mars 2008 et la période allant de novembre à décembre 2011.

Source : Données sur le rendement, Direction des communications et affaires publiques de l'ASC, août 2015.

Des représentants de l'ASC ont indiqué que les ressources disponibles pendant la période visée par l'évaluation ont limité la capacité de la Direction des communications et affaires publiques à planifier, à mettre en œuvre et à suivre les stratégies de communication portant sur l'ISS. Cette situation devrait s'améliorer d'ici peu avec l'embauche de nouveaux employés.

Depuis 2011, la Direction des communications et affaires publiques de l'ASC produit de courtes vidéos associées à l'ISS et elle surveille le nombre de fois que ces vidéos ont été visionnées. Une liste de quelques-unes des vidéos associées au SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS et de statistiques connexes sur le nombre de visionnements de chacune des vidéos est présentée à l'annexe D.

Les principales activités de communication entreprises par l'ASC sont présentées en détail au Tableau 10. Ces informations s'appuient sur une analyse sommaire des données de mesure du rendement des activités de communications de l'ASC liées à l'ISS, préparée par l'ASC pour l'équipe d'évaluation.

Tableau 10 : Types d'activités de communications portant sur l'ISS réalisées par l'ASC, de 2008-2009 à 2014-2015

COMMUNIQUÉS ET CONFÉRENCES DE PRESSE
Communiqués de presse
Invitation de journalistes au siège social de l'ASC et diffusion en direct
Demandes d'entrevues avec des porte-paroles de l'ASC
MISES À JOUR WEB ET ACTIVITÉS DANS LES MÉDIAS SOCIAUX
Publication de messages, de communiqués de presse, de photos, de vidéos et d'animations sur Facebook, Twitter et YouTube ainsi que sur les fils RSS
Couverture en direct de manœuvres robotiques (Dextre, Canadarm2, etc.) sur Facebook et Twitter
Mise à jour périodique du site Web de l'ASC (textes, vidéos et animations)
ÉVÉNEMENTS PUBLICS, EXPOSITIONS ET ACTIVITÉS PÉDAGOGIQUES
Activités pédagogiques et partenariats avec des écoles canadiennes (p. ex., expériences en classe, présentations, etc.)
Conférences et allocutions lors d'événements publics
Expositions (en partie ou principalement sur le MSS/les systèmes robotiques)
Visites guidées du siège social de l'ASC (Infrastructure de l'ISS)
RESSOURCES PÉDAGOGIQUES ET MATÉRIEL PROMOTIONNEL
Cartes d'information (p. ex., Dextre, Canada et l'ISS, etc.) en appui à la participation de l'ASC à plusieurs événements et activités
Trousses/ressources pédagogiques
Modules de Dextre, du Canadarm1 et du Canadarm2

Même si la Direction des communications et affaires publiques de l'ASC ne possédait pas de stratégie globale de communications à propos de l'ISS, elle comptait des stratégies pour des initiatives spécifiques comme le séjour de Chris Hadfield à bord de l'ISS. De plus, la direction a élaboré des stratégies de communication propres au MSS, notamment pour le 10^e anniversaire de ce dernier et qui documentait les différentes expériences du personnel de l'ASC travaillant sur le MSS. Lorsque des opérations majeures sont réalisées par le MSS, un membre de l'équipe des communications s'installe dans le centre de contrôle et commente en direct – racontant ainsi au monde entier ce qui se passe et pourquoi ces activités sont importantes. Par exemple, lorsque Dextre est devenu le premier robot à ravitailler en orbite une maquette de satellite en mai 2014, un membre de la Direction des communications et affaires publiques de l'ASC a décrit en direct sur Twitter les activités et a diffusé plusieurs messages sur Facebook. Selon une analyse de la couverture dans les médias sociaux préparée par Influence Communication²⁸ pour le compte de l'ASC, le mot-clé « Dextre » a été mentionné 1 666 fois sur Twitter au cours de la période allant du 22 au 31 mai 2014, et plusieurs entités influentes du secteur spatial ont écrit des messages sur Twitter à propos des opérations menées par Dextre. « La portée potentielle de ces messages est de 21,4 millions d'impressions ». Une vidéo préparée par l'ASC a également été visionnée environ 55 277 fois sur YouTube (en mars 2015).

Selon un représentant de l'ASC, la NASA déploie beaucoup d'efforts en communications, mais celui-ci estime que l'ASC a été plus efficace. Comme le mentionne Chris Hadfield : « Nous avons mené une campagne de sensibilisation du public inégalée depuis, peut-être, Apollo 11. Les vidéos que nous avons tournées ont été vues 50 millions de fois, ce qui est sans précédent pour la NASA. J'envoyais le matériel brut à l'équipe des communications de l'ASC, et les membres de celle-ci en faisait le montage (parfois en quelques heures) et diffusaient les vidéos dans les médias sociaux (p. ex., YouTube) pour que tous puissent y avoir accès. Il y avait aussi les *lundis musicaux* où je jouais de la guitare et je chantais en compagnie de 700 000 jeunes Canadiens ». L'équipe des communications de l'ASC a d'ailleurs remporté un prix national remis par le gouverneur général pour la qualité exceptionnelle de leur travail²⁹.

4.2.1.5.2 Communications à l'intention des jeunes

La Direction des communications et affaires publiques de l'ASC produit des ressources pédagogiques ciblées et du matériel promotionnel lié à l'ISS et au MSS. Des outils et des trousseaux pédagogiques ont été élaborés pour les trois dernières missions de l'ASC à bord de l'ISS. Les outils élaborés comprenaient des cartes photos et des affiches qui étaient distribuées par le personnel de l'ASC lors d'événements publics ou mis à la disposition aux particuliers et aux organismes (qui en font la demande). Les statistiques (lorsqu'elles étaient disponibles) relatives à la quantité de matériel pédagogique distribuée sont présentées dans le tableau ci-dessous.

²⁸ Influence Communication. *Rapport d'analyse des mentions du robot Dextre sur Twitter réalisé par Influence Communication (22 au 31 mai 2014)*. Rapport présenté à l'Agence spatiale canadienne, le 9 juin 2014.

²⁹ Il incombe de noter que les vidéos auxquelles Chris Hadfield fait référence et que le prix remporté par la Direction des communications et affaires publiques de l'ASC se rapportent aux SSP Utilisation de l'ISS et Missions spatiales habitées (c.-à-d., qu'ils ne font pas partie de la portée du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS).

Tableau 11 : Matériel pédagogique portant sur l'ISS ayant été distribué, par mission Expedition, de 2008-2009 à 2014-2015

Bob Thirsk - Expedition 20/21	Quantité totale de matériel distribué à ce jour
Écoles primaires	40 566
Écoles secondaires	29 434
TOTAL	70 000
Julie Payette - Expedition STS-127	
TOTAL (aucune donnée ventilée disponible – écoles primaires et secondaires)	46 719
Chris Hadfield - Expedition 34/35	
Écoles primaires	26 103
Écoles secondaires	16 906
TOTAL	43 009

Source : Données de l'ASC sur le rendement, Direction des communications et affaires publiques, août 2015.

De plus, environ 8 624 cartes photos de l'ISS et 5 417 affiches de l'ISS ont été distribuées au cours de la période visée par l'évaluation (soit du 1^{er} avril 2008 au 31 mars 2015). Le catalogue actuel a été mis en place en 2012, et les données estimatives pour la période de 2008 à 2012 fournies par la Direction des communications et affaires publiques sont considérées comme étant prudentes. Il est probable qu'un plus grand nombre d'articles aient été distribués entre 2008 et 2012.

Un des répondants a indiqué qu'il y avait une équipe de communication de haut niveau pour le programme de l'ISS, laquelle comprenait des représentants des partenaires de l'ISS. Mais cette équipe a cessé de se réunir, en partie en raison des coûts associés aux déplacements. Toutefois, ce comité a été reformé. Des gestionnaires du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS ont appuyé cette décision.

4.2.2 Atteinte des résultats intermédiaires

Cette section présente les constatations de l'évaluation quant à l'atteinte des résultats intermédiaires, tels que présentés dans le modèle logique, soit plus spécifiquement :

- le transfert de savoir-faire et de technologies vers d'autres applications;
- le secteur spatial canadien est positionné pour tirer profit de l'expérience acquise sur l'ISS;
- base élargie d'intervenants en exploration spatiale.

4.2.2.1 Transfert du savoir-faire acquis sur l'ISS

4.2.2.1.1 Transfert du savoir-faire vers des applications non liées au domaine spatial

Un rapport de 2010 préparé par Technopolis Group³⁰ pour l'Unité de politique spatiale et de coordination de la Commission européenne explique que l'exploration spatiale est une activité spatiale unique en son genre en ce sens que son objectif primaire est d'approfondir notre connaissance de l'espace. Ainsi, son principal extrant est les nouvelles connaissances scientifiques et technologiques engendrées par l'exploration extra-terrestre ainsi que les nouvelles connaissances découlant du fait d'avoir surmonté les importants défis technologiques liés à l'exploration de l'environnement extraterrestre. Contrairement aux autres activités spatiales, comme les communications par satellite, l'observation de la Terre et la localisation mondiale, qui appuie l'activité économique grâce aux services en aval, l'exploration spatiale a une incidence indirecte sur l'économie et la société – notamment par la réalisation d'activités d'innovation subséquentes sur Terre fondées sur les nouvelles connaissances et technologies découlant de l'exploration spatiale ou produites aux fins de celle-ci.

L'équipe d'évaluation a entrepris la réalisation de trois études de cas portant sur des technologies intégrant le savoir-faire acquis par le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS. Un résumé des conclusions de ces études de cas se trouve à l'annexe C.

³⁰ Rapport de Technopolis Group préparé pour l'Unité de politique spatiale et de coordination de la Commission européenne (3 octobre 2010). *Summary Report: Space Exploration and Innovation*. Consulté à l'adresse http://ec.europa.eu/enterprise/policies/space/files/policy/final_technopolis_report_en.pdf.

NeuroArm

Le NeuroArm est un robot guidé par images, compatible avec l'imagerie par résonance magnétique et conçu pour être commandé à distance. Il est constitué de deux bras robotiques capables de manipuler des outils de microchirurgie existants ou spéciaux et il est relié à un poste de travail doté d'une interface humain-machine à immersion sensorielle (c.-à-d., réalité virtuelle) par le biais d'un système de commande principal*. Le chirurgien est installé au poste de travail et utilise l'interface humain-machine pour interagir avec l'endroit où a lieu la chirurgie. Le système NeuroArm permet au chirurgien d'avoir accès aux données d'images sans interrompre la procédure chirurgicale, et il fournit à celui-ci une rétroaction sensorielle à la fine pointe de la technologie afin de faciliter l'exécution de la chirurgie.

Le projet NeuroArm a débuté en septembre 2001. L'équipe de recherche, établie à l'Université de Calgary, a étudié d'autres robots chirurgicaux en cours de développement et a communiqué avec plusieurs collaborateurs potentiels. MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd (MDA), une entreprise qui se spécialise dans la fabrication de systèmes robotiques appelés à être utilisés dans des environnements complexes et qui a notamment fabriqué le télémanipulateur robotique de la navette spatiale (Canadarm) et le robot agile spécialisé (Dextre) canadien, a été emballée à l'idée de fabriquer un robot neurochirurgical. Cette association avec une entreprise ayant élaboré bon nombre de systèmes de bras robotiques commandés à distance a permis au NeuroArm de tirer pleinement profit de savoir-faire que MDA a acquis dans le cadre de ses projets antérieurs dans le domaine de l'aérospatiale.

En mai 2008, le NeuroArm a été utilisé pour la toute première procédure neurochirurgicale robotique guidée par image et compatible avec la résonance magnétique. À ce jour, le NeuroArm a réalisé avec succès plus de 60 procédures neurochirurgicales.

La technologie qui est intervenue dans le développement du NeuroArm, le premier robot capable d'effectuer une intervention chirurgicale à l'intérieur d'un appareil à résonance magnétique, est issue du Canadarm (élaboré par MDA pour le compte du programme spatial américain) et du Canadarm2 et de Dextre**. Comme l'explique le Dr Garnette Sutherland [traduction libre] : « Il y a plusieurs années, MDA a obtenu le contrat pour l'élaboration du Canadarm et de Dextre de la station spatiale. L'entreprise a embauché une myriade d'ingénieurs qui ont eu pour mandat de construire ces robots. Lorsque nous avons eu l'idée d'utiliser ces robots en neurochirurgie, nous avons communiqué nos exigences à MDA et ces mêmes ingénieurs, qui comptaient une expérience de plusieurs décennies en fabrication de robots spatiaux ont utilisé leur expertise pour fabriquer ce robot-ci. »****

* L'interface humain-machine est une application logicielle qui présente l'information relative à l'état d'un processus à un opérateur ou à un utilisateur et qui est capable d'accepter et de mettre en œuvre les instructions des opérateurs quant au contrôle.

** National Aeronautics and Space Administration (18 novembre 2011). NeuroArm: Robotic Arms Lend a Healing Touch. Consulté le 30 décembre 2015 à l'adresse http://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/news/neuro_Arm.html

*** Citation du Dr Garnette Sutherland quote, http://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/news/neuro_canadarm/#.Va_3Z4tqkrm

Robot automatisé guidé par image (IGAR pour Image Guided Automated Robot)

Le robot IGAR autorise la réalisation de biopsies en temps réel ainsi que le traitement des lésions suspectes au sein à l'intérieur d'un appareil d'imagerie par résonance magnétique (IRM). Le robot IGAR pour les seins est conçu spécifiquement pour détecter rapidement et traiter le cancer du sein. Il s'intègre parfaitement à un appareil d'imagerie à résonance magnétique, ce qui permet à un radiologue de choisir une zone précise du scintillogramme d'un patient et de mener l'intervention avec confiance à une précision millimétrique*.

Le robot IGAR pour les seins a tout le potentiel voulu pour transformer le cheminement thérapeutique des patients atteints du cancer en offrant un système à « guichet unique » pour le diagnostic, le traitement et l'intervention. Dans un premier temps, le robot IGAR peut effectuer une biopsie à même une lésion suspecte, laquelle peut être suivie de l'ablation des lésions du site de la biopsie, s'il est pertinent de le faire d'un point de vue clinique. En ce qui concerne les lésions et les tumeurs susceptibles de nécessiter une tumorectomie, il est également possible de localiser les grains radioactifs dans le sein à l'aide d'images, ce qui améliore le taux de réussite et évite d'avoir à inciser de nouveau.

Tirant profit de l'expérience et des capacités acquises dans le cadre de la participation de MDA au développement des systèmes robotiques de la Station spatiale internationale, le robot IGAR pour les seins a bénéficié de l'approche très rigoureuse en matière d'ingénierie-système utilisée pour la mise au point du Canadarm, du Canadarm2 et de Dextre. Le Canadarm, le Canadarm2, Dextre et le robot IGAR pour les seins partagent plusieurs similitudes sur le plan du contexte opérationnel et des exigences qui devaient être satisfaites pour atteindre la pleine capacité opérationnelle. Tous ces robots fonctionnent dans des environnements extrêmes (dans l'espace et à l'intérieur d'un appareil d'IRM), ils font tous intervenir des utilisateurs experts (astronautes et chirurgiens) appelés à travailler avec des objets fragiles (réparations mécaniques en impesanteur et traitement et biopsie du sein), tous nécessitent la capacité de pouvoir être commandés à distance et tous exigent un niveau extrême de sécurité, de durabilité et de redondance.

Le robot IGAR pour les seins a été élaboré par MDA, en partenariat avec le Dr Mehran Anvari et son équipe au Centre pour l'invention et l'innovation en chirurgie (une entité à but non lucratif hébergée par le centre de santé St. Joseph's d'Hamilton et l'Université McMaster).

* Centre for Surgical Invention & Innovation, http://www.csii.ca/robotic_development/igar

KidsArm

Le KidsArm est un bras robotique autonome guidé par images qui sert à réaliser des anastomoses (la suture de vaisseaux délicats tels des veines, des artères ou des intestins) sur des patients pédiatriques de la naissance jusqu'à 4 ans*. KidsArm a été créé pour aider les chirurgiens à faire certaines interventions beaucoup plus rapidement que s'ils utilisaient seulement leurs mains, et ce, avec une précision accrue. La technologie du KidsArm utilise les éléments clés suivants : un système de vision capable de fonctionner de manière autonome et le logiciel de commande et de détection de collision utilisé par les bras robotiques, surtout par Dextre, sur l'ISS.

S'appuyant sur l'expérience acquise dans le cadre du projet NeuroArm, MDA a approché le milieu médical afin d'élaborer des applications robotiques médicales similaires reposant sur des technologies mises au point pour les bras robotiques utilisés sur la Station spatiale internationale. Le Dr Peter Kim, chirurgien général néonatal et thoracique et cofondateur du Centre for Image-Guided Innovation and Therapeutic Intervention (CIGITI) de l'Hôpital pour enfants malades (SickKids) a répondu favorablement à la demande de MDA.

Le projet KidsArm s'est concrétisé en 2010 lorsque l'Agence fédérale de développement économique pour le sud de l'Ontario (FedDev Ontario) et le Fonds pour la recherche en Ontario / la Fondation canadienne pour l'innovation a accordé une bourse de 10 millions de dollars à l'Hôpital pour enfants malades afin d'appuyer le développement d'un robot de chirurgie pédiatrique guidé par images.

Les robots destinés à un usage médical (p. ex., le KidsArm) ou spatial (p. ex., Dextre) fonctionnent dans des environnements uniques. Ces deux types de robots nécessitent l'utilisation d'un logiciel de surveillance de la sécurité, des contrôles évolués et une interface opérateur. Sur le plan architectural, leur conception est similaire : les deux sont destinés à des interventions critiques. L'un est utilisé à des fins chirurgicales, l'autre pour la réalisation d'activités dans l'espace. Le volet mécanique (outil d'anastomose et bras robotique), le système de commande, les algorithmes de détection des collisions et de planification des trajectoires (commande robotique), le cadre de guidage par images (unité de traitement des images) et l'interface utilisateur du KidsArm sont directement dérivés des systèmes robotiques de l'ISS. L'expérience acquise en théorie du contrôle, en applications de vision et en ciblage à plus grande échelle sur l'ISS a été appliquée au KidsArm. La nouveauté consistait à reproduire le robot pour des applications à plus petite échelle. L'élaboration du KidsArm a également tiré profit du mode d'exploitation autonome utilisé sur l'ISS.

On a demandé aux répondants de fournir des exemples de technologies et de savoir-faire découlant du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS ayant été transférés avec succès vers d'autres secteurs d'activité. Les répondants ont cité en exemple le NeuroArm et l'entretien des réacteurs nucléaires.

NeuroArm – Quelques-uns des répondants ont cité le NeuroArm comme exemple de transfert technologique. Selon un des répondants, le NeuroArm possède le même logiciel sous-jacent que Dextre (p. ex., algorithmes de contrôle, reprise après défaillance, impératifs de sécurité), comme l'illustre l'étude de cas élaborée par l'équipe d'évaluation.

Inspection et entretien des réacteurs nucléaires – MDA a pris l'expertise qu'elle a acquise dans la gestion de projets au cours des nombreuses années qu'elle a passées à assembler et à entretenir l'ISS (et dans le cadre du programme de la navette spatiale) et elle l'a appliquée à un secteur n'ayant rien à voir avec l'espace, soit l'industrie nucléaire. Par exemple, MDA a obtenu des contrats de Bruce Power, la société ontarienne de production d'énergie nucléaire. Au cours des cinq dernières années, les travaux ont porté sur la planification détaillée (c.-à-d., scénarisation et cartographie des tâches) dans le cadre de l'entretien des centrales nucléaires de Bruce Power installées à proximité du lac Huron.

Plus récemment, MDA a appuyé les travaux d'inspection et d'entretien qui ont eu lieu pendant l'arrêt planifié des réacteurs nucléaires Candu, en août 2015 (les entrepreneurs principaux étaient GE et ATS [de Cambridge, en Ontario], et MDA agissait en qualité de sous-traitant). L'arrêt était prévu pour une durée totale de cinq jours et prévoyait l'inspection et l'entretien de la voûte du réacteur nucléaire. Chaque journée d'arrêt entraînait la perte de plusieurs millions de dollars en revenus, c'est pourquoi il était impératif que les travaux soient réalisés de la manière la plus efficace possible. MDA a élaboré des scénarisations visuelles, planifié la séquence des tâches et élaboré un plan pour imprévus. Les travaux ont prévu des simulations de pannes ainsi que la construction de maquettes à l'échelle. MDA a indiqué que ses nombreuses années passées à travailler à la réalisation du programme de l'ISS (et à la réalisation d'autres missions spatiales) lui donnaient une forte crédibilité lorsqu'elle tentait d'obtenir des contrats dans d'autres secteurs d'activité. Même si ces méthodes de planification ne peuvent pas véritablement être brevetées ou commercialisées, cette expertise permet à l'entreprise d'engranger des revenus contractuels.

De plus, MDA a mis au point des solutions robotiques permettant d'inspecter des réacteurs nucléaires. Par exemple, en 2010, l'entreprise a utilisé avec succès une solution robotique pour inspecter la voûte d'un réacteur nucléaire de la centrale Pickering de l'OPG³¹. Installés derrière un poste de contrôle à distance, les opérateurs ont commandé un robot extrêmement agile et ayant l'aspect d'un serpent (désigné CVIRM) que MDA déployé à l'intérieur d'une chambre radioactive afin de l'inspecter.

Une revue de la littérature a démontré qu'il y avait eu transfert de savoir-faire entre le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS et d'autres secteurs d'activité. Des articles rédigés par Faghihi et al. (2013)³² et Fournier-Viger et al. (2011)³³ décrivent comment l'agent d'apprentissage intelligent a été élaboré pour le compte du programme de l'ISS. Le CELTS (Conscious-Emotional-Learning Tutoring System), un agent tutoriel intelligent dont l'architecture est inspirée des plus récentes théories scientifiques, a été élaboré pour le programme de l'ISS. Cet agent est utilisé dans un système de tutorat fondé sur la simulation pour l'apprentissage de la tâche complexe que représente l'exploitation du Canadarm2. Des évaluations expérimentales ont démontré que les capacités d'apprentissage de l'agent améliorent considérablement sa capacité d'adaptation aux apprenants lors des interactions, ce qui à son tour améliore le rendement de l'apprenant.

Quelques représentants de l'ASC ont signalé que le caractère unique du secteur spatial réside dans l'importance qu'il accorde à la sécurité, laquelle dépasse les normes établies dans les autres pays, particulièrement lorsque des humains sont envoyés en mission dans l'espace. Dans le secteur spatial, tous les risques potentiels sont cernés et la technologie nécessaire est élaborée afin de réduire ces risques à un niveau acceptable. Chaque cause potentielle d'un risque est identifiée – et pour chaque

³¹ <http://www.mdacorporation.com/corporate/news/pr/pr2010082301.cfm>

³² Faghihi, U., P. Fournier-Viger and R. Nkambou (2013). CELTS: A cognitive tutoring agent with human-like learning capabilities and emotions. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 17: 339-365.

³³ Fournier-Viger, P., R. Nkambou, A. Mayers, E. M. Nguifo and U. Faghihi (2011). An hybrid expert model to support tutoring services in robotic arm manipulations. 7094 LNAI: 478-489. {téléchargé de l'adresse http://www.researchgate.net/profile/Usef_Faghihi/publication/221438932_A_Cognitive_Tutoring_Agent_with_Automatic_Reasoning_Capabilities/links/09e41511198989b653000000.pdf

cause, il est dans la norme de mettre en œuvre deux contrôles afin d'atténuer le risque. De plus, chaque solution de contrôle doit faire l'objet d'un essai et être éprouvée. Ainsi, lorsque cette technologie est transférée au NeuroArm, par exemple, il est quasi assuré que tous les risques potentiels ont été éliminés. C'est pourquoi ces technologies constituent de bonnes retombées potentielles pour le secteur médical.

4.2.2.1.2 Facilitation du transfert de technologie

Malgré les réussites signalées dans les exemples ci-dessus, quelques représentants de l'ASC estiment que l'on pourrait faire plus pour faciliter le transfert de technologie du secteur spatial en général, et du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS en particulier, à d'autres secteurs. Une personne a décrit sa participation à une récente conférence à Boston sur l'utilisation de l'ISS et la R et D. Le Congrès américain cherche à améliorer la commercialisation de technologies du programme de l'ISS et à aider l'industrie à trouver de nouvelles façons de commercialiser ces technologies. Après avoir vu ce qui se fait aux É.-U., cette personne a déclaré qu'on devrait faire plus au Canada pour faciliter la commercialisation des technologies de l'ISS. Quelques autres personnes interviewées ont souligné que l'ASC met l'accent de ses efforts d'utilisation de l'ISS sur les sciences de la vie, ce qui est perçu comme une bonne approche. Quelques personnes ont suggéré une approche coordonnée entre l'ASC et l'ISDE pour commercialiser les technologies – y compris l'établissement d'un bureau de transfert de la technologie pour aider les entreprises à tirer le maximum des technologies. Une personne a même suggéré d'inviter des universités à participer aux efforts de commercialisation.

Cependant, comme on en discutera à la section 4.2.2.2.2, étant donné que MDA possède une licence exclusive pour la commercialisation des technologies qu'elle a mises au point pour l'ISS, l'ASC ne peut pas faciliter la commercialisation de ces technologies sans l'approbation et la participation volontaire de MDA.

L'ASC a créé deux plateformes pour le partage d'information liée aux brevets et aux technologies, dont ceux liés à l'ISS, appelées FlintBox³⁴ et SparkUp (qui est maintenant fermée). Une personne interviewée de l'ASC a indiqué que l'Agence aimerait faire plus pour promouvoir ces plateformes, c.-à-d. communiquer leur existence.

4.2.2.1.3 Brevets non spatiaux liés au SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS

Au total, 19 brevets uniques liés à NeuroArm, KidsArm et IGAR ont été obtenus par l'entrepreneur principal, MDA. Ces brevets uniques se traduisent par un total de 40 à 50 brevets enregistrés dans de

³⁴ Flintbox habilite les communautés technologiques à établir des liens entre elles dans une région géographique, constituant ainsi une « Sphère d'innovation » pour reconnaître les relations précieuses et les biens d'innovation important de leur communauté et en tirer profit. Par exemple, en créant un « groupe » communautaire de membres ayant des intérêts communs, comme le génie tissulaire ou l'intelligence artificielle, ou en se joignant à de tels groupes, les utilisateurs peuvent tisser des liens avec d'autres groupes et explorer des intérêts communs et des ressources complémentaires, pour déployer des efforts collaboratifs dynamiques et partager de manière efficiente des projets technologiques connexes. <http://www.flintbox.com/>

multiples pays. Tous ont été déposés ou sont en vigueur. La plupart d'entre eux visent NeuroArm, puis IGAR et KidsArm (p. ex. : commandes intelligentes/systèmes de vision).

Selon les constatations des études de cas, NeuroArm est visé par huit brevets au Canada, un dans l'Union européenne et un au Japon. La plateforme robotique IGAR est visée par un brevet canadien, plus cinq brevets canadiens additionnels et six brevets américains en instance. Une demande de brevet a été déposée au Canada pour KidsArm.

4.2.2.2 Mise à contribution industrielle de l'expérience de l'ISS

4.2.2.2.1 Contrats découlant directement du SSP

L'obtention de contrats dépend d'une kyrielle de facteurs, dont l'emplacement géographique de la compagnie, l'expérience de cette dernière et de son équipe, le prix et l'expertise technologique. Il est donc rarement possible d'octroyer un contrat particulier en fonction d'un seul facteur, comme dans le cas du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS.

Pour ce qui est des occasions d'affaires subséquentes obtenues par MDA en raison de son contrat appuyant le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS, la compagnie a pu décrocher des contrats subséquents avec l'ASC, y compris l'obtention d'un contrat concurrentiel en 2015 visant à remplacer les caméras du MSS. En plus de l'ASC, MDA a réalisé de nombreuses ventes de préhenseurs-connecteurs, qui doivent être utilisés par tous les véhicules de ravitaillement et toutes les charges utiles de l'ISS (la valeur de ces contrats n'a pas été divulguée pour des raisons de confidentialité commerciale).

Le travail accompli par MDA pour l'ISS a également aidé la compagnie à fonder des relations avec d'autres agences spatiales à travers le monde et avec d'autres entrepreneurs principaux, même si aucun partenariat formel n'a été établi.

De plus, le travail accompli par MDA pour l'ISS a aidé la compagnie à continuer d'améliorer son expertise en robotique spatiale. Selon de nombreux informateurs clés, MDA est perçue comme un chef de file mondial en robotique spatiale. Le fait que MDA peut parler de sa longue expérience pratique en ce qui a trait à l'ISS est très bénéfique lorsque la compagnie tente d'obtenir des contrats auprès d'autres agences spatiales et d'entrepreneurs principaux.

Il faut souligner qu'une autre compagnie spatiale canadienne, Neptec, a profité du programme de l'ISS – mais pas directement du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS. Le Système de vision spatiale (SVS) de Neptec a servi à la construction de l'ISS. Il a fourni un alignement en temps réel et des repères de positionnement aux équipages des navettes spatiales et de l'ISS pendant l'installation des modules de l'ISS. Cette technologie a été mise au point grâce au soutien financier du Programme de développement des technologies spatiales (PDTs)³⁵ de l'ASC. Une autre technologie de Neptec, le capteur 3D de rendez-vous et d'amarrage (AR-D) automatisé, a été incorporée par Orbital Sciences

³⁵ La technologie du SVS de Neptec fait l'objet d'une étude de cas dans l'étude d'évaluation par l'ASC du PDTs : *Évaluation du PDTs*, Agence spatiale canadienne, juin 2011. <http://www.asc-csa.gc.ca/fra/publications/re-570-2800.asp>

Corporation dans ses engins spatiaux de ravitaillement inhabités Cygnus. Cette technologie a servi plusieurs fois pour assurer le ravitaillement automatisé de l'ISS. Elle fait appel à un capteur laser 3D et à des imageurs thermiques pour recueillir des données 3D de la cible. Ces dernières sont alors comparées par un logiciel à la forme connue de l'engin spatial cible. Cette technologie a d'autres applications spatiales potentielles, comme l'entretien de satellites. Neptec a réalisé de nombreuses ventes et le potentiel du marché est considérable. Cette technologie a été mise au point avec l'aide du PDTS de l'ASC et de la NASA.

4.2.2.2 Brevets et propriété intellectuelle

Au tout début du Programme, selon quelques représentants de l'ASC, la PI appartenait au gouvernement du Canada, mais il était cédé par licence à MDA ou à quiconque voulait l'utiliser. MDA ne possède pas la PI, mais elle peut l'utiliser. Un représentant de l'ASC a signalé que MDA a commercialisé certains brevets et versé des redevances au gouvernement du Canada. Le Bureau de gestion de la propriété intellectuelle et du transfert de technologies de l'ASC gère cette activité et en assure le suivi. Les licences sont conçues de manière à favoriser l'industrie afin d'encourager les compagnies à utiliser et à commercialiser les technologies. Un autre représentant de l'ASC a signalé que l'ASC accorde une plus grande attention à la question des brevets qu'auparavant.

MDA n'avait aucune entente de droits de licence avec l'ASC jusqu'en 2014. Depuis lors, l'entente a été renouvelée sous forme de licence assortie de redevances qui se terminera en 2024. Comme c'était le cas avant 2014, MDA doit soumettre des rapports sur la commercialisation. Comme avant 2014, il s'agit d'une licence unique, ce qui signifie que seuls MDA et l'État peuvent utiliser les technologies visées par la licence et seule MDA peut commercialiser les technologies (contrairement à une licence exclusive qui aurait empêché l'État d'utiliser ces technologies). Selon MDA, cette structure de licence est sensée, car elle est la mieux placée pour exploiter les technologies. Cependant, il est important de rappeler que l'État ne peut pas entreprendre d'activités de commercialisation des technologies de l'ISS sans l'approbation et/ou la participation de MDA. Selon les dispositions de cette licence, MDA doit prouver qu'elle tente d'exploiter les technologies – si elle ne le fait pas, l'ASC peut révoquer les droits accordés dans le domaine non spatial d'utilisation et, possiblement, les accorder à une autre compagnie. Aucune technologie n'a été vendue, mais certains produits l'ont été, comme des variantes des préhenseurs-connecteurs, qui ont été vendus à la NASA, au Japon, à la Russie et à l'Italie. Les retombées du MSS ont donc été des ventes de produits, et non des technologies.

Selon des représentants de l'industrie, MDA a obtenu plusieurs brevets liés au développement robotique. Il n'existe aucune marque de commerce, mais on compte 9 ou 10 brevets visant des interfaces robotiques et 3 aux É.-U., soit les numéros 5803751 : Software dock interface; 5458384 : Robotic Orbital Replacement Unit (ORU) Interface et 5466025 : Effector clamping.

De plus, il y a des brevets liés aux activités de ravitaillement de satellites de MDA, qui découle en partie de ses travaux concernant l'ISS. On compte une dizaine de brevets uniques (surtout liés à la capacité de saisir des satellites), avec 20 ou 30 dépôts dans de multiples pays.

La plupart des personnes interviewées de l'extérieur de l'ASC ont donné des exemples de transfert de technologie du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS à d'autres domaines, mais quelques-unes d'entre elles perçoivent que les compagnies spatiales du Canada tendent à ne pas être très intéressées à commercialiser des technologies au-delà du secteur spatial.

4.2.2.3 Base élargie d'intervenants spatiaux

Un récent rapport préparé par le Groupe international de coordination de l'exploration spatiale (ISECG) souligne que l'exploration spatiale offre un point de vue unique et évolutif sur la place de l'humanité dans l'Univers, qui est commun à tous. Le rapport signale également que l'exploration spatiale est une entreprise mondiale qui contribue à la confiance et à la diplomatie entre les nations³⁶.

L'ISECG fait référence à un sondage mené en 2009 par Nature³⁷, qui a permis de constater que 50 % des scientifiques de renommée internationale qui ont déjà publié des articles dans la revue prestigieuse Nature au cours des trois années précédentes avaient été inspirés à faire carrière dans les sciences par le programme Apollo. De plus, 89 % des répondants ont convenu que le vol spatial habité inspire les jeunes à poursuivre des études dans les sciences³⁸.

Quelques représentants de l'ASC ont indiqué que les aspects inspirants du programme de l'ISS et du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS sont essentiels. D'emblée, l'inspiration, la recherche scientifique et le développement technologiques faisaient partie des principaux éléments motivateurs de la participation du Canada au programme de l'ISS. Le volet inspiration a été reconnu officiellement dans le *Cadre de la politique spatiale canadienne*.

Les personnes interviewées (de l'ASC et de l'extérieur) ont convenu que la sensibilisation du public au SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS a augmenté. Les personnes interviewées ont souligné que l'image de Canadarm2 et de Dextre sur le billet de 5 \$ canadien et l'attention des médias portée à la mission du Chris Hadfield dans l'espace illustrent à quel point le public est sensibilisé à l'espace. Il existe aussi un timbre canadien qui montre le drapeau canadien sur le Canadarm. Lors d'un sondage du Dominion Institute mené en 2008, où l'on a demandé à 3 114 Canadiens « Quels personne, événement, endroit, symbole et réalisation sont emblématiques du Canada? » [Traduction], le Canadarm était le cinquième symbole emblématique du Canada le plus populaire, devançant les chutes du Niagara et la Tour du CN³⁹.

³⁶ Groupe international de coordination de l'exploration spatiale (ISECG). (Septembre 2013). *Benefits Stemming from Space Exploration*. <https://www.nasa.gov/sites/default/files/files/Benefits-Stemming-from-Space-Exploration-2013-TAGGED.pdf>

³⁷ L'article auquel on fait référence dans le rapport de l'ISECG peut être consulté à l'adresse <http://www.nature.com/news/2009/090715/full/460314a.html> (Consulté le 22 juillet 2015).

³⁸ Groupe international de coordination de l'exploration spatiale (ISECG). (Septembre 2013). *Benefits Stemming from Space Exploration*. <https://www.nasa.gov/sites/default/files/files/Benefits-Stemming-from-Space-Exploration-2013-TAGGED.pdf>

³⁹ Institut du Dominion. (2014). *101 choses que les Canadiens devraient savoir au sujet du Canada*. <http://www.101choses.ca/>

Quelques représentants de l'ASC ont souligné que l'ISS ne représente qu'une partie relativement faible du budget total de l'ASC (environ 16 %⁴⁰) et du budget total du programme de l'ISS (la contribution du Canada étant de 2,3 %), mais que le Canada reçoit une part disproportionnée de la couverture médiatique en raison de la visibilité de Canadarm2 et de Dextre.

4.2.3 Atteinte du résultat final

Cette section présente les constatations de l'évaluation concernant l'atteinte du résultat final, tels que décrits dans le modèle logique, plus précisément : de nouveaux produits, processus et technologies qui contribuent à la croissance socioéconomique.

4.2.3.1 Contribution à la croissance socioéconomique

4.2.3.1.1 Avantages sociétaux découlant des technologies

Un article préparé par l'ISECG conclut qu'il existe de nombreux cas d'avantages sociétaux liés aux nouvelles connaissances et technologies découlant de l'exploration spatiale. Ce type d'exploration a contribué à 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 sauvetage. L'article ajoute que 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'informatique⁴¹. Ce point de vue est appuyé par des technologies comme NeuroArm, KidsArm et IGAR, décrites ci-dessus à la section 4.2.2.1.1. Des descriptions plus détaillées des technologies se trouvent à l'Annexe C.

Un rapport préparé par des représentants d'agences partenaires de l'ISS décrit un éventail d'avantages pour l'humanité résultant de l'ISS. Les avantages mentionnés sont groupés dans les domaines de la santé humaine, de l'observation de la Terre et de l'intervention en cas de catastrophe, et de l'éducation à l'échelle mondiale.

Santé humaine – Tout au long de son assemblage, l'ISS a appuyé des travaux de recherche qui nous donnent une meilleure compréhension de la santé humaine, notamment du vieillissement, des traumatismes, des maladies et de l'environnement. Plusieurs enquêtes biologiques et physiologiques ont donné des résultats, y compris une meilleure compréhension des processus physiologiques normalement cachés par la gravité et le développement de nouvelles technologies et de nouveaux protocoles médicaux dictés par le besoin d'assurer la santé des astronautes. L'évaluation prochaine du SSP Utilisation de l'ISS fournira une évaluation des avantages de l'ISS sur la santé humaine.

⁴⁰ Rapport moyen des dépenses de l'ASC liées à l'ISS (fournies par les Finances) et des dépenses réelles de l'ASC déclarées dans les Rapports ministériels sur le rendement pendant la période d'évaluation (2008-2009 à 2014-2015).

⁴¹ Groupe international de coordination de l'exploration spatiale (ISECG). (Septembre 2013). *Benefits Stemming from Space Exploration*. <https://www.nasa.gov/sites/default/files/files/Benefits-Stemming-from-Space-Exploration-2013-TAGGED.pdf>

Observation de la Terre et intervention en cas de catastrophe – L'ISS facilite l'observation de la Terre visant à comprendre et à résoudre les enjeux environnementaux de la Terre. L'ISS offre un point de vue unique pour l'observation des écosystèmes terrestres. Grâce à de l'équipement manuel et autonome, les astronautes peuvent observer et expliquer ce qu'ils constatent. 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 l'ISS. Cette souplesse est un avantage par rapport aux capteurs des engins spatiaux inhabités. Un vaste éventail de charges utiles d'observation de la Terre peuvent être fixées aux installations exposées à l'extérieur de la station. Un excellent exemple de cela est une technologie mise au point par une compagnie canadienne, Urthecast. Deux caméras développées par cette compagnie ont été installées sur la partie russe de l'ISS et elles prennent des photos et des séquences vidéo à haute résolution de la Terre (avec toute une gamme d'utilisations potentielles : météo, sécurité, etc.). Cette technologie est un exemple de la manière dont l'existence même de l'ISS peut mener à des applications dérivées, mais elle n'est pas directement liée au SSP (l'ASC n'a pas fourni de soutien financier). De plus, les partenariats internationaux existants facilitent le partage de données dont peut profiter l'humanité entière et favorisent la collaboration internationale.

Éducation à l'échelle mondiale – L'ISS a une capacité unique de frapper l'imagination d'étudiants et d'enseignants. La présence d'humains à bord de l'ISS constitue une base pour de nombreuses activités éducatives visant à stimuler cet intérêt et à motiver l'étude des sciences, de la technologie, de l'ingénierie et des mathématiques. On s'attend à ce que la prochaine génération soit inspirée par l'utilisation continue de l'ISS⁴².

Les trois études de cas élaborées pour cette évaluation appuient le point de vue selon lequel les missions spatiales comme l'ISS sont, à très long terme, un avantage pour la société. Les trois technologies seront probablement une source d'avantages pour le système de santé. Les avantages directs pour les patients découlant de la chirurgie robotique peuvent comprendre des séjours plus courts à l'hôpital, une douleur et un inconfort réduits, un rétablissement plus rapide, des incisions plus petites, ainsi qu'une perte de sang réduite et des cicatrices plus petites⁴³.

4.2.3.1.2 Avantages pour l'économie canadienne

MDA Brampton est l'entrepreneur principal du contrat du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS et cette division dépend fortement de ce contrat. Jusqu'en 2011, MDA Brampton détenait aussi le contrat pour le Canadarm des navettes spatiales de la NASA, mais son seul contrat aujourd'hui vise le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS.

⁴² Robinson, J Éd. Élaboré par des membres de l'Agence spatiale canadienne (ASC), de l'Agence spatiale européenne (ESA), de l'Agence d'exploration aérospatiale japonaise (JAXA), de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) et de l'Agence spatiale fédérale russe (Roscomos). *International Space Station Benefits for Humanity*. 2012. Consulté le 22 juillet 2015 à l'adresse http://www.nasa.gov/pdf/626862main_ISS_Benefit_for_Humanity.pdf

⁴³ Université de Cincinnati, <http://uchealth.com/services/robotic-surgery/patient-information/benefits/>

Les avantages pour l'économie canadienne découlant du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS ne peuvent pas être entièrement quantifiés à partir des renseignements disponibles. Vu les technologies que l'on développe actuellement et qui ont été décrites tout au long du présent rapport, on peut s'attendre à des impacts économiques positifs, y compris des emplois et des recettes provenant de la vente de produits. Les trois technologies visées par les études de cas élaborées pour cette évaluation n'ont pas encore été commercialisées et, par conséquent, il n'y a encore aucune recette tirée de ces dernières. Il est fort probable que des recettes et des emplois ont découlé des travaux effectués par MDA dans le secteur nucléaire, mais ces renseignements sont confidentiels.

4.2.3.1.3 Nouveaux produits, processus et technologies

L'ASC a accordé une licence unique à MDA, permettant à la compagnie d'utiliser la technologie visée par la licence pour fabriquer, utiliser, divulguer, louer ou vendre des produits et services, ou d'en disposer autrement. Selon les dispositions de cette entente, MDA accepte d'investir dans la R et D, le développement d'affaires et des activités connexes afin de développer la technologie. Par exemple, MDA a collaboré avec l'Université de Calgary pour créer NeuroArm. MDA a également conçu un système de bras utilitaire léger destiné à l'inspection et à l'analyse de déchets radioactifs dans des réservoirs souterrains. Ce système est composé d'un manipulateur modulaire à sept articulations, fixé à un mât de positionnement vertical télescopique. Un système mobile déploie le manipulateur dans le réservoir. Ce sont là deux exemples de dérivés des technologies mises au point pour la suite robotique à bord de l'ISS⁴⁴.

4.2.4 Résultats inattendus

Comme l'a souligné l'ISECG, le partenariat de l'ISS est un exemple probant de coopération internationale continue dans le domaine de l'exploration spatiale. Pour accomplir sa mission principale, le partenariat de l'ISS a surmonté des obstacles politiques et économiques. Il a démontré la valeur diplomatique de la coopération internationale dans l'espace⁴⁵. Cette coopération a gagné en importance ces dernières années, compte tenu des relations tendues entre la communauté internationale et la Russie. Il est à noter que la coopération relative à l'ISS s'est poursuivie, malgré les tensions géopolitiques avec la Russie, ce qui a permis de maintenir les communications entre les pays partenaires de l'ISS et la Russie. Cette perspective a également été soulignée par un représentant de l'ASC.

Un document de la NASA souligne aussi les réalisations politiques et diplomatiques de l'ISS. Selon le *Reference Guide to the ISS* de la NASA⁴⁶, le partenariat mondial d'agences spatiales incarne l'harmonisation de différences culturelles et de subtilités politiques, rendant possibles la planification, la coordination, la prestation et l'exploitation des éléments complexes de l'ISS. Le programme réunit également des équipages internationaux, ainsi que des communications réparties dans le monde entier

⁴⁴ Agence spatiale canadienne, Utilisation du bras robotique : <http://www.asc-csa.gc.ca/fra/canadarm/robotique.asp>

⁴⁵ Groupe international de coordination de l'exploration spatiale (ISECG). (Septembre 2013). *Benefits Stemming from Space Exploration*. <https://www.nasa.gov/sites/default/files/files/Benefits-Stemming-from-Space-Exploration-2013-TAGGED.pdf>

⁴⁶ National Aeronautics and Space Administration. *Reference Guide to the International Space Station: Assembly Complete Edition*. (Novembre 2010). Consulté le 19 août 2015 : http://www.nasa.gov/pdf/508318main_ISS_ref_guide_nov2010.pdf.

sur le lancement, l'exploitation, la formation, l'ingénierie, les réseaux de communication et la recherche scientifique.

Quelques représentants de l'ASC ont fait remarquer que Canadarm2 a été lancé en 2001 et que l'ASC est constamment dans les médias depuis. C'est ce qui fait que de nombreux pays connaissent l'ASC et son rôle dans l'ISS.

4.2.5 Démonstrations d'efficacité et d'économie

Cette section évalue si le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS a pu générer des extrants et atteindre ses résultats de façon rentable et efficace. La *Directive du SCT sur la fonction d'évaluation* définit la démonstration d'efficacité et d'économie comme « l'évaluation de l'utilisation des ressources relativement à la production des extrants et aux progrès réalisés concernant l'atteinte des résultats attendus ». En général, l'analyse de l'efficacité exige l'évaluation des relations entre les intrants et les extrants et/ou les résultats, et l'évaluation de l'économie vise la mesure dans laquelle on fait le meilleur usage possible des ressources pour atteindre les résultats voulus.

Nous abordons la question de l'économie et de l'efficacité en évaluant :

- si le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS produit les extrants et les résultats de la manière la plus efficace possible;
- s'il existe des occasions d'améliorer l'économie globale du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS.

4.2.5.1 Efficacité du SSP

De façon générale, les représentants de l'ASC et les personnes de l'extérieur interviewées ont convenu que la prestation du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS se fait de la manière la plus efficace possible. Un représentant de la NASA a souligné que le contrôle au sol des systèmes canadiens est situé à St-Hubert (Québec) – un cas unique pour la NASA (d'avoir une fonction critique située à l'extérieur des É.-U.). Il a aussi fait observer que cet arrangement illustre la confiance de la NASA envers le Canada et l'ASC. Cette personne a déclaré que l'absence d'une grande équipe canadienne à Houston a permis à l'ASC de réaliser des économies. Enfin, il a expliqué qu'en plus de la prestation efficace d'opérations de contrôle au sol, le programme de certification (formation) est aussi assuré avec efficacité par l'ASC.

Quelques représentants de l'ASC ont signalé que l'Agence ne peut pas améliorer l'efficacité davantage sans une hausse « exponentielle » des risques. Quelques personnes interviewées ont souligné qu'il n'y a pas beaucoup de redondance dans le personnel du groupe affecté au programme de l'ISS à l'ASC, et il serait probablement nécessaire d'y ajouter quelques employés de plus d'un point de vue de la gestion des risques. Une personne interviewée a expliqué que les membres du personnel ne prennent aucun congé lorsqu'une opération est en cours – tous les employés actuels doivent y prendre part. C'est également ce qu'a fait remarquer une personne de l'extérieur en disant que MDA a essayé de limiter le

nombre d'employés au maximum, et que cela signifie que la compagnie manque parfois de personnel lorsqu'il faut livrer des produits – cela a entraîné des retards.

Le Tableau 12 résume les données sur les dépenses et les heures d'exploitation du MSS au fil des ans et il calcule le coût par heure d'exploitation du MSS pour chaque année. En 2013-2014, les Finances de l'ASC ont commencé à ventiler les coûts associés aux Coûts communs d'exploitation des systèmes (CSOC). Les CSOC sont les frais associés à la part de 2,3 % de l'ISS allouée au Canada, alors que les coûts qui restent (à l'exclusion des CSOC) sont ceux associés aux obligations du Canada liés à l'exploitation du MSS. Par conséquent, ce ne sont pas des coûts directs liés à l'exploitation continue du MSS. À ce titre, les dépenses présentées dans le tableau exagèrent les coûts réels par heure d'exploitation du MSS. Les représentants de l'ASC et les personnes interviewées de l'extérieur estiment que le SSP est devenu plus efficient au fil des ans grâce à un recours accru à l'automatisation et à l'expérience acquise – à force de répéter des opérations semblables, ces dernières deviennent routinières et le coût par heure d'exploitation aurait dû baisser avec le temps.

Cependant, comme on peut le voir au Tableau 12, le coût par heure a connu une baisse pendant les trois premières années, puis il s'est mis à fluctuer. Le coût par heure est influencé par deux facteurs principaux. D'abord, des événements imprévus peuvent entraîner une hausse importante des coûts. Toute panne en orbite peut ajouter des millions de dollars aux dépenses de F et E et, par conséquent, le coût par heure d'exploitation augmente pour l'année en question. Ensuite, si la NASA décide de réduire l'utilisation du MSS (pour des raisons qui ne sont pas liées à son rendement/sa disponibilité), le nombre d'heures d'exploitation pour l'année est réduit, ce qui entraîne une hausse du coût par heure d'exploitation.

Tableau 12 : Coût par heure d'exploitation du MSS, 2008-2009 à 2014-2015

	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015
Nombre d'heures d'exploitation du MSS	570	680	735	545	840	640	600
Dépenses (réelles) (000 \$)	56 935	50 919	41 740	41 993	39 386	41 184*	40 466*
Dépenses liées aux CSOC 2016-2020 (000 \$)**	---	---	---	---	---	6 319	11 645
Dépenses (réelles) par heure d'exploitation (000 \$)***	99,89	74,88	56,79	77,05	46,89	64,35*	67,44*

Source : Données de l'ASC sur le rendement du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS, août 2015 et données financières de l'ASC.

*À l'exclusion des CSOC.

**Les dépenses liées aux CSOC n'étaient pas ventilées avant l'année financière 2013-2014.

***Les coûts par heure d'exploitation pour 2013-2014 et 2014-2015, y compris les CSOC, sont de 74,22 \$ et 86,85 \$, respectivement (000 \$).

Le représentant de la NASA a commenté que l'ASC en fait plus avec Dextre et que cela a augmenté l'efficacité de l'ensemble du programme de l'ISS et a réduit la nécessité de sorties dans l'espace. Le fait de reléguer les tâches plus routinières à des robots se traduit par une utilisation plus efficace et efficace du temps des astronautes. Les astronautes interviewés dans le cadre de l'étude ont indiqué que Dextre rend les sorties dans l'espace plus efficaces et permet de faire des choses qu'un astronaute ne peut pas faire avec ses deux mains. Sans Dextre, les sorties dans l'espace seraient plus difficiles. Ces personnes estiment que des améliorations continues apportées à Dextre accroîtront davantage cette efficacité et cette efficacité.

Selon une personne interviewée de l'extérieur de l'ASC, les tarifs payés à l'entrepreneur principal sont négociés chaque année et, généralement, cela se passe bien. Les profits de l'entrepreneur principal (c.-à-d. MDA) sont limités selon les clauses du contrat. Les tâches de la charge de travail sont renouvelées tous les mois de mars, ce qui exige beaucoup de travail de janvier à mars chaque année.

4.2.5.2 Frais généraux

Les représentants de l'ASC ont signalé une baisse du nombre d'employés qui travaillent au SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS depuis quelques années (voir le Tableau 7 de la section 4.2.1.4.1). Cependant, une personne interviewée a précisé qu'une telle comparaison n'est pas nécessairement exacte, parce que certaines activités sont passées du programme aux Services organisationnels, et vice-versa. Quoi qu'il en soit, les représentants de l'ASC conviennent qu'il y a eu une baisse du nombre d'employés et une augmentation simultanée du volume d'activités – cela signifie que le programme arrive vraiment à en faire plus avec moins de personnel.

Quelques personnes interviewées de l'extérieur ont rappelé qu'il y a beaucoup d'administration chez MDA, à SPAC et à l'ASC en ce qui a trait à la gestion du contrat – mais peu de changements sont envisageables en raison de la complexité du programme, de la valeur du contrat et des exigences en matière de reddition de comptes. Les recommandations découlant de la vérification de la gestion du contrat avec MDA terminée en 2012 sont énumérées à la section 2.5 du présent rapport.

4.2.5.3 Améliorations possibles ou hausses de l'efficacité et/ou de l'efficacité

Seules quelques personnes ont pu suggérer des améliorations à l'efficacité et/ou à l'efficacité du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS.

Quelques représentants de l'ASC ont dit qu'on leur avait demandé d'impartir le programme – c'est-à-dire de confier une plus grande partie du travail au secteur privé (à MDA). Les gestionnaires du programme travaillent à une proposition pour la haute direction de l'ASC à ce sujet. Cependant, quelques personnes interviewées se demandent si cela entraînera une hausse de l'efficacité ou une réduction des coûts. Certains intervenants de l'ASC croient que les fonctionnaires (c.-à-d. le personnel de l'ASC) coûtent moins cher que des employés de MDA, mais une vérification de ces affirmations dépasserait la portée de la présente évaluation. Un autre problème lié à l'impartition d'une plus grande part des activités est lié aux dimensions internationales du programme – quelques représentants de

l'ASC soulignent qu'il faut assurer une représentation gouvernementale appropriée lors des réunions et à des fins de supervision, étant donné qu'il s'agit d'un projet international. Une personne de l'extérieur de l'ASC a dit que la seule façon de réduire les coûts est chez MDA.

Les représentants de l'ASC interviewés n'étaient pas en mesure de faire des suggestions afin de réduire les frais généraux et les coûts des intrants pour la production d'extrants sans une hausse considérable des risques connexes.

Un représentant de l'ASC a expliqué que l'Agence ne peut pas réduire son personnel trop radicalement parce qu'elle doit maintenir une certaine mémoire organisationnelle. Elle ne peut pas se permettre de perdre toute l'expertise qu'elle a accumulée au fil des ans – cela pourrait menacer la capacité de l'ASC à participer à des missions futures. Alors cette personne avance qu'il faut maintenir un équilibre entre l'efficacité et la réduction des coûts dans la mesure du possible d'un côté et le besoin de maintenir la capacité et de s'assurer que les personnes qui prennent leur retraite sont remplacées de l'autre.

4.2.5.4 Valeur du SSP et rendement de l'investissement

Les personnes interviewées convenaient que le Canada avait reçu une bonne valeur de sa contribution au programme de l'ISS. Quelques représentants de l'ASC ont soutenu que la valeur des avantages que reçoit le Canada de sa participation à l'ISS dépasse les 2,3 % du coût de l'ISS. Par exemple, une personne a souligné que le Canada, à titre de partenaire de l'ISS, peut accéder à différentes charges utiles et installations – que le Canada n'a pas à payer.

Un autre représentant de l'ASC a souligné que le Canada doit 95 millions \$ à la NASA au cours des cinq prochaines années dans le cadre des Coûts communs d'exploitation des systèmes (CSOC) et que l'ASC a négocié différentes choses, comme la construction de pièces de rechange pour les plateformes électroniques et de convertisseurs vidéo. Cela entraîne des fluctuations dans les dépenses du programme pouvant atteindre 10 millions \$ par année depuis 2013. Ce sont là des dépenses faites au Canada plutôt qu'un transfert de fonds aux É.-U. Comme on l'a indiqué dans le Tableau 12, l'ASC a fourni l'équivalent de 6 319 millions \$ en 2013-2014 et 11 645 millions \$ (dépenses réelles) en 2014-2015 sur les 95 millions \$ que l'ASC doit à la NASA en CSOC pour la période de 2016 à 2020.

Aucune personne interviewée n'a pu donner une évaluation crédible du rendement de l'investissement du Canada. Les données sur le rendement ne permettent pas plus de faire une telle évaluation.

4.2.5.5 Réserve interne pour imprévus

Selon les représentants de l'ASC, il n'existe aucune réserve interne pour imprévus. La plupart des personnes interviewées ont expliqué que le programme finance ses risques de l'ASC même, et que l'Agence a toujours un surplus suffisant pour couvrir les risques. Il y a un cadre de gestion des risques où le programme identifie et quantifie tous les risques, puis on fait une présentation au Comité exécutif de l'ASC. On convient que ce processus fonctionne généralement bien, car la nature des projets spatiaux

est telle que la meilleure planification qui soit ne saurait empêcher des imprévus ayant un impact sur le budget. En ayant une réserve interne pour imprévus, l'ASC risquerait la péremption de ces fonds.

Quelques personnes interviewées ont expliqué que toute panne de l'ISS (qui est inattendue par définition) a une incidence sur le budget du programme. Même si une pièce de rechange est disponible, le programme doit quand même dépenser un montant considérable pour faire la réparation.

4.3 Prestation du programme – rôles et responsabilités

4.3.1 Relations entre les partenaires du programme de l'ISS

Le programme de l'ISS est mis en œuvre en vertu d'un IGA multinational ayant le statut d'un traité. Selon l'IGA et le PE (CSA-SS-CS-0011), chaque partenaire doit construire et exploiter l'équipement qu'il contribue à la Station spatiale et en assurer l'entretien, en plus de payer une part des Coûts communs d'exploitation des systèmes. La part du Canada de l'utilisation de l'ISS et des Coûts communs d'exploitation des systèmes est fixée à 2,3 %. Le rôle et la responsabilité du Canada dans le cadre de ce programme international sont résumés ci-dessous.

Selon l'article 7 de l'IGA, l'ASC est responsable :

- de la gestion de son propre programme, y compris ses activités d'utilisation;
- de l'ingénierie des systèmes et de l'intégration du MSS;
- du développement et de la mise en œuvre des exigences et des plans de sécurité détaillés pour le MSS;
- du soutien aux É.-U. dans la planification et la coordination de l'exécution de l'exploitation intégrée de l'ISS.

Conformément aux dispositions du PE conclu entre la NASA/et l'ASC, le Canada doit :

- appuyer les opérations du MSS;
- fournir la formation sur le MSS aux membres d'équipage et au personnel de soutien au sol;
- élaborer et mettre en œuvre des procédures pour l'exploitation du MSS de manière sécuritaire, efficiente et efficace;
- assurer la logistique et l'ingénierie de soutien pour chaque élément canadien pendant tout le cycle de vie de l'ISS;
- fournir les pièces de rechange nécessaires et réparer le matériel du MSS qui tombe en panne en orbite.

Selon un document de 2014 sur les leçons retenues produit par la NASA, le développement de l'ISS a évolué au fil des ans – il a changé en raison de contraintes financières, de problèmes techniques et de changements d'ordre politique. La leçon retenue est qu'il est important d'avoir un cadre solide pour le programme qui permet l'adaptation. Les accords originaux sur l'ISS contenaient un cadre qui n'était pas si détaillé et précis qu'il s'avèrerait limitatif lorsque les choses se mettent à changer, mais il devait être

assez clair pour que tous les intervenants aient une compréhension commune et visaient les mêmes buts⁴⁷.

Avec le temps, chaque partenaire de l'ISS a dû composer avec des enjeux nationaux. Il est donc important que chaque partenaire comprenne l'environnement des autres. Bon nombre des enjeux ont fait l'objet de discussions à la Commission multilatérale de coordination (MCB) – qui est le conseil au niveau de la Human Exploration & Operations Mission Directorate (HEOMD) de la NASA – et avec l'Administrateur de la NASA et ses homologues à la tête des autres agences. Parmi les sujets abordés à la MCB et avec les autres dirigeants des agences, citons l'environnement politique, la politique spatiale, les changements de gouvernements et les enjeux économiques à venir. La leçon retenue du point de vue de la gestion du projet et des rôles et des responsabilités : les communications ouvertes entre les partenaires sont un élément clé dans le maintien de partenariats solides⁴⁸.

4.3.2 Rôles et responsabilités au sein de l'ASC

L'entente intergouvernementale (IGA) sur l'ISS et le PE décrivent en détail les rôles, les devoirs, les engagements et les responsabilités du partenariat⁴⁹. De plus, le Plan de mise en œuvre des opérations de l'ASC contient une description détaillée au niveau du programme de la structure de gestion, des responsabilités organisationnelles et des processus clés mis en œuvre par l'ASC pour que cette dernière puisse s'acquitter de ses obligations liées au MSS de l'ISS⁵⁰.

Le Directeur général (DG) de l'Exploration spatiale est le gestionnaire responsable de l'exploration spatiale à l'ASC. Il relève du Président de l'ASC pour l'exécution du programme. Le DG préside le Comité de gestion de l'Exploration spatiale (CGES) pour assurer une coordination efficace de toutes les ressources financières et humaines dans tous les SP dont il est responsable (Station spatiale internationale [1.2.1], Missions et technologie d'exploration spatiale [1.2.2] et Missions spatiales habitées et soutien connexe [1.2.3]). Les directeurs sont chargés de mettre en œuvre les décisions prises par le CGES qui touchent leurs directions respectives. Les gestionnaires dirigent leurs employés vers l'exécution et la mise en œuvre de ces activités. Une description complète de la structure de gouvernance du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS (1.2.1.1) est documentée dans le Plan de mise en œuvre des opérations du PCSS, CSA-SS-PL-0195 (révision actuelle).

4.3.3 Gestion du contrat

Le soutien lié aux contrats pour les opérations du MSS est assuré par une équipe dédiée au sein du PCSS (Ingénierie de projet) et par des ressources de SPAC, appuyées par le Groupe de l'approvisionnement organisationnel de l'ASC, qui relève des Finances. Tout particulièrement, les ressources de SPAC sont

⁴⁷ Lengyel, David M, Newman, Stephen J. (Septembre 2014). *International Space Station Lessons Learned for Space Exploration*. http://www.nasa.gov/externalflash/iss-lessons-learned/docs/report_ISSLessonsLearned.pdf

⁴⁸ Ibid.

⁴⁹ Ibid.

⁵⁰ Agence spatiale canadienne. (2012). *Canadian Space Station Program Operations Implementation Plan - MSS-Operations*. Révision B (14 mars 2012). (Numéro de l'ASC : CSA-SS-PL-0195)

responsables de l'appui au gestionnaire de la Logistique et de l'ingénierie de soutien (L et SI) dans la négociation et la gestion du grand contrat de L et SI avec l'entrepreneur principal. La gestion de contrat doit être faite conformément aux règles et aux politiques pertinentes du gouvernement du Canada et de l'ASC.

Le contrat signé avec MDA pour le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS est fondé sur des autorisations de tâches. Tout le travail est ensuite défini et les coûts sont établis sous forme de commandes de tâches distinctes. Les travaux effectués en vertu du contrat proposé sont autorisés par l'ASC, avec la supervision et l'approbation de SPAC qui agit comme autorité contractante. Avec des services de soutien de SPAC assurés sur place au centre de St-Hubert, des processus intégrés sont en place pour appuyer l'élaboration, l'examen et l'approbation des commandes de tâches, ainsi que la surveillance et le contrôle du coût du contrat. Les commandes de tâches individuelles sont donc gérées efficacement comme des contrats distincts, émis avec une portée contrôlée et des produits à livrer particuliers.

Le PCSS, y compris l'appui de SPAC, est doté d'un processus administratif structuré qui lui permet d'autoriser les travaux que doit accomplir l'entrepreneur « sur demande », conformément aux dispositions du contrat. Généralement, l'ASC n'émet pas moins de vingt-cinq autorisations de tâches par année financière, ce qui correspond approximativement au montant principal de 27 M\$ par année de la proposition. La surveillance et le contrôle du rendement technique du projet et du coût du projet sont mis en œuvre au moyen d'un ensemble d'outils établis. Ces outils ont été élaborés historiquement et ils ont fait leurs preuves dans l'assurance d'une gestion rigoureuse des éléments techniques de L et SI et du coût du contrat. C'est ce qui a été encore validé récemment dans le cadre d'une vérification indépendante sur le PCSS menée par la Direction, Audit et évaluation de l'ASC en avril 2012, qui visait particulièrement à déterminer si l'on a mis en œuvre un cadre de gestion permettant d'atteindre les objectifs de l'ASC.

Les personnes interviewées ont convenu que les rôles et les responsabilités sont clairs et appropriés. Aucun problème ou défi lié aux rôles et aux responsabilités n'a été soulevé.

5 Conclusions et recommandations

5.1 Pertinence

Les constatations de l'évaluation indiquent fortement que le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS reste pertinent.

L'évaluation a trouvé des preuves que la décision prise à la fin des années 1980 de participer au programme de l'ISS était surtout motivée par des préoccupations géopolitiques. Les É.-U. étaient bien décidés à construire une station spatiale avec l'aide de leurs alliés occidentaux en réponse à la station spatiale soviétique Mir qui avait été lancée en 1986. Le Canada était aussi tenté par l'occasion de se joindre à un « club exclusif » avec d'autres pays du G7. Les personnes interviewées ont souligné que l'invitation faite au Canada à participer à ce projet était fondée sur son excellente feuille de route dans

l'appui au programme de la navette spatiale, ainsi que sur l'expertise unique du pays en robotique spatiale – une capacité que ne possédaient pas alors les É.-U. Selon des représentants de la NASA interviewés pour cette évaluation, la participation du Canada était essentielle pour la construction et l'exploitation de l'ISS. De plus, on s'attendait à ce que la participation au programme de l'ISS permettrait au Canada de récolter les avantages technologiques et socioéconomiques découlant du développement des éléments robotiques spatiaux.

Bien que les personnes interviewées considèrent que la décision de prolonger la participation du Canada au programme de l'ISS jusqu'en 2024 soit la bonne, cette participation a une incidence budgétaire sur l'ASC. À mesure que l'ISS vieillit, il faut y faire un nombre grandissant de réparations et fournir de plus en plus de pièces de rechange, c.-à-d. que le risque de panne va en croissant. Selon les personnes interviewées dans le cadre de cette évaluation, l'ISS pourrait rester opérationnelle au-delà de 2024, ce qui est vu d'un œil favorable, car cela va accroître l'utilisation potentielle de l'ISS à des fins scientifiques. De plus, on pourra s'assurer que la PI développée dans le cadre du programme de l'ISS continuera de rester au Canada.

La participation continue du Canada dans le programme de l'ISS permettra une plus grande utilisation (c.-à-d. une utilisation sur une plus longue période) et donnera au Canada la chance de participer au dialogue sur la prochaine étape au-delà de l'ISS. Les prochaines étapes possibles comprennent des missions comme l'établissement d'une installation plus éloignée dans l'espace, peut-être à proximité de la Lune, comme point de relai pour l'objectif ultime d'envoyer un humain sur Mars dans un avenir éloigné. Cela placerait le Canada parmi un groupe sélect de nations qui participent à l'exploration spatiale.

Le SSP correspond de près aux priorités fédérales actuelles, telles que décrites dans le *Cadre de la politique spatiale canadienne* et le *Budget 2015*. Le programme de l'ISS est mentionné explicitement dans tous ces documents.

Étant donné que la participation au programme de l'ISS s'inscrit dans le contexte d'un accord international, il est approprié que le gouvernement fédéral soit responsable de la gestion des engagements du Canada. La responsabilité de l'ASC en ce qui a trait au programme est conforme à la *Loi sur l'ASC* qui précise que l'Agence est autorisée à « collaborer avec les agences spatiales — ou les organismes œuvrant dans un domaine connexe — d'autres pays à l'exploitation et l'usage pacifiques de l'espace ».

5.2 Rendement

Le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS est un sous-sous-programme habilitant pour d'autres programmes de l'ASC qui lient le programme de l'ISS à l'AAP de l'ASC. À ce titre, une partie des résultats et des indicateurs abordés dans cette évaluation échappent au contrôle direct du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS.

5.2.1 Résultats immédiats

Le programme de l'ISS représente la seule occasion de voyage spatial habité du Canada. Notamment, le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS n'a aucune influence directe sur les occasions de voyage spatial humain – le SSP permet au Canada d'accéder au voyage spatial en s'acquittant avec succès de ses obligations liées à l'exploitation et à l'entretien de l'ISS. Dans le même ordre d'idées, le SSP permet au Canada de profiter d'occasion d'utiliser l'ISS pour mener des expériences et des recherches scientifiques.

Le SSP a respecté toutes les exigences du programme de l'ISS, l'utilisation du Canadarm2 et de Dextre à bord de l'ISS étant devenue routinière. L'exploitation de ces derniers fluctue entre 545 et 840 heures par année, selon les besoins du programme de l'ISS.

Des preuves solides démontrent que le SSP a directement permis au Canada de maintenir son rôle de chef de file en robotique spatiale. En fait, le Canada a été invité à participer au programme de l'ISS en raison de son leadership dans ce domaine et des décisions stratégiques prises depuis les années 1980 ont permis au Canada de maintenir ce leadership en robotique spatiale jusqu'à ce jour. Le Canada continue d'être reconnu pour son leadership dans ce domaine, comme le démontrent les invitations qu'il a reçues en vue de participer à des missions internationales faisant appel à des éléments robotiques spatiaux. Cependant, des défis budgétaires à l'ASC ont limité la participation du Canada. Même si le pays reste un chef de file mondial en robotique spatiale, on ne peut pas tenir cette place pour acquise, car d'autres pays travaillent à développer leurs propres capacités, y compris les É.-U., le Japon, la Russie et les états membres de l'ESA. Cela témoigne donc du besoin pour le Canada de travailler activement à maintenir sa capacité en participant à des missions spatiales exigeant des éléments robotiques spatiaux.

Recommandation 1 : L'ASC devrait évaluer l'importance de maintenir le rôle de chef de file du Canada en robotique spatiale et les mesures à prendre si le Canada veut maintenir sa position de leader en robotique spatiale.

Des preuves solides démontrent que le SSP a débouché sur des innovations technologiques et que cela a servi à maintenir le leadership du Canada en robotique spatiale. L'innovation la plus importante et tangible est l'utilisation de la commande au sol pour faire manœuvrer Dextre et le Canadarm2. Cette innovation a réduit le coût des opérations et la nécessité de recourir à des astronautes, ce qui améliore la sécurité des astronautes et libère ces derniers qui peuvent alors se concentrer à d'autres activités, comme la recherche scientifique.

D'autres preuves solides démontrent que la réputation du Canada parmi les partenaires internationaux du programme de l'ISS a été maintenue directement par les solutions novatrices de réparation et d'entretien de l'ISS mises au point par le Canada. De plus, des éléments probants montrent que le Canada a pu développer de nouvelles approches et technologies en réponse aux besoins changeants des partenaires de l'ISS. Même si la contribution du Canada représente 2,3 % de l'ensemble du programme

de l'ISS, le pays est perçu par ses partenaires comme ayant une plus grande influence internationale que sa taille pourrait le suggérer.

Le SSP a contribué à maintenir des emplois pour des PHQ à l'ASC et dans les installations de l'entrepreneur principal à Brampton, en Ontario. En plus de l'emploi de PHQ, le SSP sert aussi à former des PHQ, y compris des astronautes et des membres du personnel au sol. Selon les renseignements obtenus en entrevue, les employés de l'ASC estiment que leurs perspectives de carrière sont plutôt limitées en raison du manque d'autres missions à grande échelle à l'ASC. D'autres indices suggèrent que les occasions offertes aux PHQ du secteur spatial sont limitées au Canada, ce qui a provoqué un certain « exode des cerveaux » avec des PHQ canadiennes quittant le pays pour aller travailler aux É.-U. Cependant, cette conclusion n'est fondée que sur un nombre limité d'entrevues.

Le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS n'est pas directement responsable de la sensibilisation du public à la technologie de l'ISS – cela relève directement de la Direction des communications et affaires publiques de l'ASC. Les statistiques fournies par la Direction des communications et affaires publiques et les entrevues menées auprès d'informateurs clés indiquent que les Canadiens sont informés de la technologie de l'ISS par un éventail d'autres moyens, comme des vidéos, de l'information offerte en ligne, des communiqués de presse, des événements publics, etc. L'ASC a créé des outils et des trousseaux didactiques axés sur les jeunes lors de trois missions antérieures auxquelles ont participé des astronautes canadiens (Thirsk, Payette et Hadfield).

5.2.2 Résultats intermédiaires

Les preuves recueillies pendant l'évaluation indiquent fortement qu'il y a un transfert de savoir-faire du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS à des secteurs non spatiaux comme la santé et l'industrie nucléaire. Ces preuves, particulièrement celles découlant de trois études de cas (NeuroArm, IGAR et KidsArm), démontrent que le transfert de savoir-faire est un long processus qui exige plusieurs années et un investissement financier considérable. Un tel transfert a bel et bien lieu, mais certaines personnes interviewées estimaient que le Canada n'en fait pas assez pour profiter pleinement des avantages des technologies de robotiques spatiales mises au point dans le cadre du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS. Cependant, l'ASC est limitée dans sa capacité à faciliter directement la commercialisation des technologies parce que MDA détient une licence unique pour la commercialisation des technologies de l'ISS que la compagnie a mises au point.

Recommandation 2 : L'ASC devrait évaluer les options permettant d'accroître la commercialisation et le transfert de technologies du programme de l'ISS à d'autres secteurs. Des discussions devraient avoir lieu avec d'autres ministères et organismes fédéraux concernés, de même qu'avec l'entrepreneur principal. Cette évaluation devrait tenir compte des pratiques exemplaires et des leçons retenues d'autres partenaires du programme de l'ISS, tout particulièrement la NASA.

Selon les constatations de l'évaluation, MDA, l'entrepreneur principal du SSP, a réussi à tirer profit de son expérience dans le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS. Les entrevues avec des représentants de MDA ont permis de conclure que MDA a pu profiter de relations établies dans le cadre

de ses travaux pour le SSP. MDA a réalisé certaines recettes de la vente de préhenseurs-connecteurs à d'autres agences spatiales et entreprises, mais la compagnie n'a pas encore tiré de recettes d'autres produits, technologies, services ou processus, et ce, même si de nombreuses demandes de brevet ont été déposées.

Des travaux de recherches aux É.-U. démontrent que les aspects inspirants de l'exploration spatiale contribuent, à long terme, à une hausse de l'intérêt pour la science et la technologie chez les jeunes et le grand public. L'inspiration des jeunes contribue, à long terme, à une plus grande proportion de jeunes faisant carrière dans les sciences et en ingénierie. Le volet inspiration du programme de l'ISS a été reconnu dans le *Cadre de la politique spatiale canadienne*. D'autres preuves démontrent que les communications de l'ASC liées au programme de l'ISS visent à inspirer les Canadiens, particulièrement les élèves des écoles élémentaires et secondaires.

5.2.3 Résultat final

L'évaluation a trouvé des preuves indiquant que le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS a contribué à la croissance sociale et économique et qu'il continuera à le faire. Le lien entre l'exploration spatiale et les avantages socioéconomiques est reconnu dans les publications universitaires et les documents stratégiques des partenaires de l'ISS; mais les tentatives visant à quantifier ces avantages ont été plutôt infructueuses. La quantification des avantages de l'exploration spatiale est difficile en raison de la nature à long terme des avantages et des liens souvent indirects entre les technologies spatiales et les avantages ultimes.

En ce qui a trait aux avantages inattendus, le plus important est la promotion de relations internationales, particulièrement avec la Russie. La communauté internationale a eu des relations tendues avec la Russie au cours des dernières années, mais le travail sur l'ISS s'est poursuivi et cela a permis de maintenir les communications entre la Russie et d'autres pays. Un autre avantage inattendu découlant du SSP est l'attention que les médias portent au Canadarm2, à Dextre et à l'CSA.

5.3 Efficience et économie

Selon les preuves disponibles, l'évaluation a permis de constater que la prestation du SSP est aussi efficiente que possible. Globalement, des preuves indiquent que le SSP a lentement gagné en efficience pendant la période évaluée en raison de l'automatisation accrue et de l'expérience/la pratique acquise. Toute augmentation additionnelle de l'efficience en réduisant le personnel pourrait accroître les risques. Une érosion supplémentaire du nombre d'employés pourrait aussi éliminer la redondance existante au niveau du personnel, ce qui exposerait le programme à des risques. Aucune option viable permettant d'accroître l'efficience du SSP n'a été cernée dans l'évaluation. Le contrat avec l'entrepreneur principal est géré de très près par l'ASC, SPAC et MDA, comme il convient pour un contrat de cette importance et de cette durée, et les profits sont surveillés et limités selon les clauses du contrat, ce qui assure une bonne valeur pour les Canadiens.

Le SSP n'a pas de réserve pour imprévus et, selon les constatations de l'évaluation, il ne semble pas nécessaire d'en créer une. L'approche de l'ASC consiste à gérer les risques par la réaffectation de ressources à l'interne. Ce processus fonctionne bien, car la nature des projets spatiaux est telle que les retards sont fréquents. Donc, la possibilité de réaffecter des ressources à l'interne minimise la péremption des fonds.

5.4 Prestation du programme

Le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS a des rôles et des responsabilités clairement définis qui sont documentés dans différents documents. Aucun défi lié aux rôles et aux responsabilités au sein de l'ASC, entre cette dernière et d'autres ministères fédéraux (p. ex. TPSGC) ou entre le Canada et d'autres partenaires du programme de l'ISS n'a été cerné.

Comme on l'a déjà mentionné dans le présent rapport, le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS est un programme habilitant qui vise à assurer que l'ISS continue d'être opérationnelle et entretenue. Le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS n'a aucune influence directe sur la disponibilité d'occasions de vol spatial humain ou sur l'utilisation de l'ISS, le programme permet directement l'atteinte de ces objectifs. La distinction entre le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS et les autres éléments du programme de l'ISS (Missions spatiales habitées et soutien connexe – 1.2.3 et Utilisation de l'ISS – 1.2.1.2) peut donc sembler quelque peu artificielle, étant donné que les constatations de l'évaluation reflètent, dans certains cas, les résultats pour l'ensemble du programme de l'ISS plutôt que le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS. Certains de ces résultats seront étudiés de façon plus approfondie dans une évaluation distincte.

Réponse et plan d'action de la direction

	ORGANISATION/ FONCTION RESPONSABLE	RÉPONSE DE LA DIRECTION	DÉTAILS DU PLAN D'ACTION	CALENDRIER
RECOMMANDATION N° 1				
L'ASC devrait évaluer l'importance de maintenir le rôle de chef de file du Canada en robotique spatiale et les mesures à prendre si le Canada veut maintenir sa position de leader en robotique spatiale.	Directeur général, Exploration spatiale (DG-ES) avec l'appui du Directeur général, Sciences et technologies spatiales (DG-ST) et du Directeur général, Politiques (DG-POL)	<p>La haute direction est d'accord avec la recommandation et le DG-ES fera une évaluation de la position concurrentielle actuelle du Canada et des perspectives dans le domaine de la robotique spatiale.</p> <p>Le DG-ES recommandera la meilleure façon de positionner le Canada pour faire progresser les compétences et les capacités en robotique spatiale, comme la participation possible du Canada à des missions d'entretien en orbite, d'infrastructure spatiale et d'exploration planétaire.</p>	<p>Le DG-ES créera une équipe chargée de produire un rapport sur l'état de la robotique spatiale du Canada, y compris une analyse FFPM (Forces, Faiblesses, Possibilités et Menaces) et des évaluations de la technologie et des coûts.</p> <p>Le DG-ES mettra à jour les feuilles de route des missions et des technologies, et il identifiera et priorisera les occasions de développement technologique et de mission faisant appel à la robotique spatiale et à des technologies connexes.</p> <p>Les résultats de ce travail éclaireront les décisions du gouvernement quant aux investissements futurs en robotique spatiale.</p>	<p>Le rapport final doit être produit d'ici juillet 2016.</p> <p>Le rapport final doit être produit d'ici septembre 2016.</p>

	ORGANISATION/ FONCTION RESPONSABLE	RÉPONSE DE LA DIRECTION	DÉTAILS DU PLAN D'ACTION	CALENDRIER
RECOMMANDATION N° 2				
L'ASC devrait évaluer les options permettant d'accroître la commercialisation et le transfert de technologies du programme de l'ISS vers d'autres secteurs. Des discussions devraient avoir lieu avec d'autres ministères et organismes fédéraux concernés, de même qu'avec l'entrepreneur principal. Cette évaluation devrait tenir compte des pratiques exemplaires et des leçons retenues d'autres partenaires du programme de l'ISS, tout particulièrement la NASA.	DG-ES avec l'appui du DG-STC et du DG-POL	La haute direction est d'accord avec la recommandation et elle évaluera des options visant à améliorer la commercialisation et le transfert de technologies de l'ISS, en consultation avec l'industrie, d'autres ministères et des partenaires internationaux. L'ASC a déjà fourni une licence ouverte à l'industrie canadienne pour toute la propriété intellectuelle (PI) développée dans le cadre du Programme du MSS original. De plus, une licence pour utiliser la PI développée dans le cadre du contrat sur le Manipulateur agile spécialisé (SPDM/Dextre) a été accordée à MDA Ltd. Cela a déjà mené à la commercialisation de la PI du MSS par la mise en œuvre de produits comme Neuro Arm, Kids Arm et IGAR, créés pour l'industrie médicale. On s'attend à la création d'autres produits découlant de cette PI.	En consultation avec l'industrie et d'autres ministères, en tenant compte des pratiques exemplaires et des leçons retenues, le DG-ES proposera des mesures précises pour augmenter les impacts économiques, les dérivés et les avantages quotidiens découlant de la robotique spatiale. En relation avec la recommandation n° 1, l'ASC s'efforcera de prioriser les technologies qui présentent le plus grand potentiel d'avantages socioéconomiques (applications et destinations multiples).	Présentation au Comité exécutif de l'ASC d'ici novembre 2016.

Annexe A : Exposé narratif du modèle logique

Activités et extraits

Activité	Exposé narratif	Extraits ⁵¹
A1 – Préparer des produits en vue d'opérations prévues du MSS	L'ASC élabore et fournit tous les produits opérationnels nécessaires pour appuyer les opérations prévues du MSS.	<p>Op3.1</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Élaborer, examiner et/ou vérifier les produits de vol du MSS qui seront utilisés lors des opérations prévues du MSS. Ces produits comprennent : <ul style="list-style-type: none"> - des procédures; - des notes de programme de la station; - des règles de vol; - des fichiers de reconfiguration du MSS et la documentation connexe. ▪ Effectuer l'analyse dynamique pour appuyer la planification et l'exécution des opérations du MSS. ▪ Appuyer l'élaboration des besoins des utilisateurs et des exigences de rendement du MSS.
A2 – Fournir un soutien en temps réel aux opérations du MSS	Pendant les opérations, l'ASC fournit en temps réel un soutien technique et opérationnel sur place, à l'ASC et au Centre spatial Johnson de la NASA, pour respecter ses engagements et être en mesure de poursuivre les opérations même si des problèmes se manifestent.	<p>Op3.2</p> <p>Cette activité comprend la dotation en personnel et la certification de ce dernier pour les postes opérationnels suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Centre de contrôle multifonctions (RMPSR) <ul style="list-style-type: none"> - Contrôleur de vol Système, Tâche et ROBO ▪ Centre d'exploitation et d'ingénierie (OEC) <ul style="list-style-type: none"> - Chef de l'OEC - Chef de l'ingénierie de soutien (ESL) - Ingénieur de soutien

⁵¹ La livraison des extraits qui répondent aux exigences de l'IGA peut être assurée, en partie, par des entreprises privées dans le cadre de contrats octroyés par la haute direction du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS de l'ASC.

Activité	Exposé narratif	Extrants ⁵¹
		<ul style="list-style-type: none"> - Chef de la planification de vol (FPL) ▪ Centre de gestion de l'incrément (IMC) - Poste de la console de travail des partenaires internationaux du Canada ▪ Salle d'évaluation de la mission (MER) - Poste de robotique extravéhiculaire (EVR)
A3 – Tenir à jour l'infrastructure du MOC	<p>Pour assurer le soutien en temps réel, l'ASC a mis au point une infrastructure au sol constituée en partie du RMPSR et de l'OEC, qui sont reliés à l'infrastructure au sol de l'ISS/la NASA. Par conséquent, il est possible d'accéder à des données de télémessure en temps réel de l'ISS et d'envoyer des commandes à l'ISS à partir de l'ASC.</p>	<p>Op3.3</p> <p>Fournir et entretenir les installations du Centre d'exploitation de mission (MOC) nécessaire pour donner la formation et assurer le soutien opérationnel en temps réel. Cela comprend :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ l'élaboration, la maintenance, la mise à niveau, la reconfiguration, la mise à l'essai, la vérification, la validation et la certification; ▪ une fonction d'exploitation en temps réel pour appuyer l'exécution de la mission en assurant, en temps réel, l'administration, la sauvegarde, la surveillance, la reconfiguration et la reprise après incident de tous les éléments du MOC, au besoin; ▪ l'appui à des activités d'élaboration et de validation de procédures.
A4 – Former les astronautes et le personnel au sol sur l'utilisation du MSS	<p>Pour respecter les priorités du gouvernement du Canada, l'ASC et son entrepreneur principal du MSS organisent souvent des séances de formation sur le MSS à l'intention des astronautes et du personnel de soutien au sol. On a construit une infrastructure au sol comprenant un simulateur du MSS, un centre d'apprentissage polyvalent et d'autres pièces d'équipement pour rendre possible cette activité critique.</p>	<p>Op3.4</p> <p>Former les astronautes et le personnel au sol.</p> <p>Cours de formation fournis :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Opérateur robotique du MSS ▪ CAPCOM ▪ Contrôleur de mission du MSS Partie 1 ▪ Contrôleur de mission du MSS Partie 2 ▪ Contrôleur de mission du MSS Partie 3
A5 – Assurer le soutien technique et l'entretien du	L'exploitation de l'ISS exige un soutien dédié en temps réel de la part de l'équipe	Op.3.5

Activité	Exposé narratif	Extrants ⁵¹
MSS	d'ingénierie pour surveiller le rendement du système et réagir aux anomalies éventuelles.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Créer un système de soutien logistique intégré pour le MSS et appuyer le développement de la capacité de gestion logistique intégrée pour le Programme de la station spatiale, y compris l'intégration du ravitaillement, de l'entretien à bord et de l'inventaire. ▪ Fournir l'ingénierie de soutien pour le MSS, incluant le soutien technique direct pour toutes les opérations en orbite. Appuyer l'exécution de toutes les activités d'entretien du MSS, au besoin. ▪ Créer et fournir des correctifs et des mises à niveau des logiciels du MSS, selon les priorités du programme. Synchroniser la livraison des logiciels du MSS avec le programme de l'ISS. ▪ Mener des opérations de soutien logistique (y compris la fourniture de pièces de rechange) et un soutien logistique aux opérations des systèmes spatiaux (c.-à-d. le soutien logistique après l'atterrissage).
A6 – Gérer les opérations du MSS	L'ASC participe à un certain nombre de groupes et comités importants sur l'ISS, par l'entremise desquels toutes les décisions critiques sur l'ISS sont prises. Cette participation canadienne permet à l'ASC d'utiliser son influence pour s'assurer que les objectifs canadiens ne sont pas compromis. Enfin, il incombe au Canada de certifier formellement que le MSS en orbite et tous les biens connexes (personnel, installations, produits opérationnels, etc.) sont prêts à appuyer les incréments de mission précis de l'ISS.	<p>Op3.6</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Appuyer la gestion et la coordination globales du programme pour la conception détaillée et le développement d'une station spatiale intégrée et gérer le développement tactique et stratégique des éléments fournis par l'ASC. ▪ Gérer les activités de Certification d'aptitude au vol (CoFR) du MSS et s'assurer que le MSS est certifié pour tous les incréments de l'ISS. ▪ Participer avec la NASA et d'autres partenaires aux mécanismes de gestion du Programme de la Station spatiale.

Résultats immédiats

Imm1 Le Canada a maintenu ou augmenté ses occasions de vol spatial humain et d'utilisation de l'ISS

En contrepartie de sa contribution du MSS et de son exploitation continue, le Canada a le droit d'utiliser 2,3 % des installations de l'ISS pour y mener des activités de recherche scientifique et 2,3 % du temps de l'équipage en orbite pour les mener. Le Canada a aussi le droit de fournir des astronautes canadiens pour 2,3 % des occasions de vol des équipages de l'ISS⁵². L'ISS offre aux scientifiques et aux ingénieurs un accès continu à l'environnement de microgravité unique de l'espace. Comme laboratoire spatial permanent, l'ISS permet aux scientifiques et aux ingénieurs d'utiliser cet endroit unique pour découvrir et mettre à l'essai de nouveaux matériaux, cristaux et processus. Les travaux de recherche sont menés dans tout un éventail de domaines, comme les sciences de la vie, les matériaux, l'observation de la Terre et l'astronomie. L'expertise de l'ISS acquise dans le cadre du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS peut éclairer les vols spatiaux humains et l'utilisation de l'ISS.

Imm2 Le rôle de chef de file en robotique spatiale du Canada est maintenu ou accru

En réussissant à exploiter et à gérer le MSS et à en assurer l'entretien, conformément aux obligations de l'IGA, le Canada maintient ou accroît son rôle de chef de file en robotique spatiale avec chaque opération faisant appel au Canadarm2 et à Dextre couronnée de succès. Le MSS, le système robotique externe, est essentiel pour l'assemblage et l'entretien de l'ISS depuis 2001.

Imm3 La réputation du Canada parmi les partenaires internationaux est maintenue ou améliorée

En réussissant à exploiter et à gérer le MSS et à en assurer l'entretien, conformément aux obligations de l'IGA, le Canada maintient ou améliore sa réputation de fiabilité, d'innovation et de compétence technique parmi les partenaires internationaux de l'ISS (NASA, JAXA, ESA et l'Agence spatiale fédérale russe).

Imm4 Les capacités du secteur spatial canadien et des personnes hautement qualifiées (PHQ) sont maintenues ou accrues

Les opérations continues du MSS contribueront à maintenir ou à accroître les capacités du Canada et de ses PHQ dans le secteur spatial en assurant une formation continue et le potentiel de maintien des compétences des PHQ. On entend par capacités du secteur spatial canadien celles de compagnies privées et de la communauté universitaire à concevoir des missions, à créer des instruments scientifiques et à analyser les données produites depuis l'espace. À l'ASC, on définit les PHQ comme les ingénieurs, scientifiques et techniciens employés dans le secteur spatial canadien⁵³.

⁵² Conformément à l'architecture d'alignement des programmes de l'ASC et au Plan d'évaluation ministériel pour la période de 2015-2016 à 2019-2020, le SP Missions spatiales habitées et soutien connexe et le SSP Utilisation de l'ISS feront l'objet d'une évaluation distincte.

⁵³ <http://www.asc-csa.gc.ca/pdf/fra/industrie/etat-2012.pdf>, page 19

Imm5 Le public canadien est informé des technologies de l'ISS (exploits dans l'espace)

Ceci dépasse le point de responsabilité du programme. Ce résultat fait partie du mandat de la Direction des communications et affaires publiques de l'ASC, qui consiste à informer les Canadiens du programme de l'ISS, tout particulièrement de l'exploitation du MSS, de sa technologie, des découvertes scientifiques, des activités des astronautes et des avantages qui en découlent. Ce résultat devrait, en fin de compte, inciter les Canadiens à s'intéresser à l'exploration spatiale et à être inspirés par cette dernière. Il existe aussi de la documentation qui appuie l'idée selon laquelle de telles communications contribuent, à long terme, à ce que des Canadiens, y compris les jeunes, s'intéressent plus aux mathématiques, aux sciences et à l'ingénierie, ce qui permet l'augmentation progressive du nombre d'intervenants et de PHQ en exploration spatiale⁵⁴.

Résultats intermédiaires**Int1 – Transfert de savoir-faire et de technologies à d'autres applications**

Ce SSP lance à l'industrie le défi de développer le niveau d'ingéniosité élevé nécessaire pour créer des technologies et des solutions opérationnelles qui permettent aux machines et aux humains de fonctionner dans l'espace. Ce travail par l'industrie canadienne génère du savoir-faire et des technologies novatrices qui sont souvent appliquées à d'autres fins, que ce soit dans l'espace ou sur Terre. Initialement, l'adaptation à une nouvelle application peut être faite à petite échelle pour un but particulier. Une capacité accrue de tirer profit de l'expérience acquise grâce à l'ISS, tout particulièrement en ce qui a trait à la robotique spatiale (Imm2); des occasions accrues de participer à des missions spatiales (Imm1) et ce développement et cette mise à l'épreuve additionnels de technologies permettent tous d'étendre le savoir-faire de l'exploration spatiale (et de l'ISS en particulier) à d'autres applications.

Int2 – Le secteur spatial canadien est positionné pour tirer profit de l'expérience acquise avec l'ISS

L'expérience du Canada dans le vol spatial et la recherche à bord de l'ISS (Imm1), le leadership en robotique spatiale (Imm2), une solide réputation auprès des partenaires internationaux (Imm3), ainsi que les capacités et un bassin de personnes hautement qualifiées (Imm4) contribuent au fait que le secteur spatial canadien peut tirer profit de son expérience acquise avec l'ISS, tout particulièrement en ce qui a trait à l'accès aux marchés du secteur spatial international. Compte tenu de la taille relativement petite du programme d'exploration spatiale par rapport à celui d'autres pays, l'option préférée du Canada consiste à collaborer, à titre de partenaire, à des missions d'exploration spatiale internationales menées par d'autres agences spatiales.

Int3 – Nombre accru d'intervenants en exploration spatiale

On entend par là le nombre croissant de personnes et de types d'organisations au Canada qui s'intéressent à des projets d'exploration spatiale. Au niveau individuel, ce SSP contribue au nombre croissant de citoyens canadiens qui se livrent à des activités d'exploration spatiale, qu'ils soient des

⁵⁴ Groupe international de coordination de l'exploration spatiale (ISECG). (Septembre 2013). *Benefits Stemming from Space Exploration*. <http://www.nasa.gov/sites/default/files/files/Benefits-Stemming-from-Space-Exploration-2013-TAGGED.pdf>. Consulté le 3 mars 2015.

spécialistes (c.-à-d. des PHQ) ou non. Au niveau organisationnel, ce SSP contribue à augmenter le nombre et les types d'organisations qui participent à l'exploration spatiale, qu'il s'agisse de compagnies privées, d'établissements universitaires ou d'entités gouvernementales, ce qui entraîne une hausse du nombre d'intervenants en exploration spatiale. On avance que le SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS, grâce aux extrants qu'il produit, devrait contribuer à inspirer les citoyens canadiens. Un public canadien mieux informé (Imm5), ainsi que les capacités et un contingent solide de PHQ dans le secteur spatial contribuent à l'élargissement du bassin d'intervenants en exploration spatiale.

Résultat final

Oc8 – De nouveaux produits, processus et technologies qui contribuent à la croissance socioéconomique

Une partie des produits, processus et technologies transférés initialement à des nouvelles applications à petite échelle peuvent s'avérer si utiles qu'ils deviennent commercialement viables et font d'importantes contributions à la croissance économique. Les avantages sociaux qui découlent de l'exploration spatiale par l'entremise de recherches et de technologies développées pour l'exploration spatiale peuvent être transférables sur Terre et contribuer à résoudre des problèmes sur Terre dans des domaines comme les changements climatiques, les soins de santé, l'approvisionnement en eau et l'énergie. Il existe une documentation digne de foi sur ces liens⁵⁵. Les agences spatiales ont documenté de nombreux exemples de produits, de processus et de technologies destinés à l'exploration spatiale qui ont été adaptés à des produits et services non spatiaux créés à l'intention des consommateurs. Le résultat Int2 contribue à cela grâce à des occasions accrues de dérivés découlant de travaux liés à l'ISS. Le résultat Int3 y contribue aussi parce que, à mesure que s'agrandit le bassin d'intervenants, il ouvre de nouvelles voies permettant à de nouveaux participants d'élargir la sphère économique. Enfin, le résultat Int1 y contribue parce que ces adaptations de l'espace à des utilisations non spatiales (de nouveaux produits de consommation) contribuent à la création d'emploi dans l'industrie ou le secteur universitaire, et génère une plus grande croissance économique en général.

⁵⁵ Commission européenne – Space Policy and Coordination Unit, Space Exploration and Innovation: Summary Report. 3 octobre 2010. http://ec.europa.eu/enterprise/policies/space/files/policy/final_technopolis_report_en.pdf. Consulté le 3 mars 2015.

Annexe B : Bibliographie

Aziz, S. (2013). « Development and verification of ground-based tele-robotics operations concept for Dextre ». *Acta Astronautica*. 86: 1-9.

Aziz, S. (2010). « Lessons learned from the STS-120/ISS 10A robotics operations ». *Acta Astronautica*. 66(1-2): 157-165.

The Bay Observer. (26 novembre 2013). *Hamilton's IGAR Breast Robot & Centre for Surgical Invention and Innovation is Featured on NASA Website*. Consulté le 17 novembre 2015.

Agence spatiale canadienne. Direction de la vérification, de l'évaluation et de l'examen. (Avril 2003). *Évaluation du grand projet de l'État – Programme canadien de la Station spatiale (GPÉ-PCSS). Rapport d'évaluation, Projet n° 02/03-02-01*. Saint-Hubert, Québec : Agence spatiale canadienne

Agence spatiale canadienne. (2012). *Canadian Space Station Program Operations Implementation Plan - MSS-Operations*. Révision B (14 mars 2012). (Numéro de l'ASC : CSA-SS-PL-0195)

Agence spatiale canadienne. Direction, Audit et évaluation. (2012). *Vérification du cadre de gestion du programme d'assemblage et d'entretien de la station spatiale internationale (1.2.1.1). Projet n° 11/12 01-02*. Saint-Hubert, Québec : Agence spatiale canadienne

Agence spatiale canadienne. (2014). *Cadre de la politique spatiale canadienne : L'envol de la prochaine génération*. Consulté le 20 juillet 2015 à l'adresse : <http://www.asc-csa.gc.ca/fra/publications/politique-spatiale/default.asp>

Agence spatiale canadienne. (2011). *Rapport ministériel sur le rendement de 2010-2011*. Consulté à l'adresse : <http://www.tbs-sct.gc.ca/dpr-rmr/2010-2011/inst/csa/csa-fra.pdf>

Agence spatiale canadienne. (2012). *Rapport ministériel sur le rendement (RMR) de 2011-2012*. Consulté à l'adresse : <http://www.asc-csa.gc.ca/fra/publications/rr-2012.asp>

Agence spatiale canadienne. (2013). *Rapport ministériel sur le rendement (RMR) de 2012-2013*. Consulté à l'adresse : <http://www.asc-csa.gc.ca/fra/publications/rr-2013.asp>

Agence spatiale canadienne. (2014). *Rapport ministériel sur le rendement (RMR) de 2013-2014*. Consulté à l'adresse : <http://www.asc-csa.gc.ca/fra/publications/rr-2014.asp>

Agence spatiale canadienne. (2015). *Rapport sur les plans et les priorités 2014-2015*. <http://www.asc-csa.gc.ca/eng/publications/rpp-2014.asp>

Calgary Health Trust. *Project neuroArm*. Consulté le 17 novembre 2015 à l'adresse : <http://www.calgaryhealthtrust.ca/your-impact/our-stories/project-neuroArm/>

Canadian Healthcare Technology. (Mars 2013). *Canadians drive development of surgical robotics*. Consulté le 18 novembre 2015 à l'adresse : http://www.csii.ca/sites/default/files/docs/Healthcare%2520Technology%2520Article_Front%2520Page.pdf

Canadian Healthcare Technology. (Mars 2013). *Canadian teams are innovators in development of surgical robots*. Consulté le 18 novembre 2015 à l'adresse : http://www.csii.ca/sites/default/files/docs/Healthcare%2520Technology%2520Article_Continued-1.pdf

Canadian Healthcare Technology. (Mars 2010). *Hamilton seeks to become centre of excellence for medical robotics*. Consulté le 17 novembre 2015 à l'adresse : http://www.csii.ca/sites/default/files/docs/CdnHealthCareTech%20Article_March%202010.pdf

Centre for Surgical Invention & Innovation, http://www.csii.ca/robotic_development/igar Institut du Dominion (2014). *101 choses que les Canadiens devraient savoir au sujet du Canada*. <http://www.101choses.ca>

Faghihi, U., P. Fournier-Viger and R. Nkambou (2013). CELTS: A cognitive tutoring agent with human-like learning capabilities and emotions. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 17: 339-365. Téléchargé à l'adresse : http://www.researchgate.net/profile/Usef_Faghihi/publication/221438932_A_Cognitive_Tutoring_Agent_with_Automatic_Reasoning_Capabilities/links/09e41511198989b653000000.pdf

Fournier-Viger, P., R. Nkambou, A. Mayers, E. M. Nguifo and U. Faghihi (2011). An hybrid expert model to support tutoring services in robotic arm manipulations. 7094 LNAI: 478-489. Téléchargé à l'adresse : http://www.researchgate.net/profile/Usef_Faghihi/publication/221438932_A_Cognitive_Tutoring_Agent_with_Automatic_Reasoning_Capabilities/links/09e41511198989b653000000.pdf

Greer AD, Newhook P, Sutherland GR. (2006). *Human-machine interface for robotic surgery and stereotaxy*. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery* 1:295-297.

Ministère des Finances du Canada. *Plan d'action économique du Canada - Un leadership fort*. Consulté le 22 juillet 2015 à l'adresse : <http://www.budget.gc.ca/2015/docs/plan/ch3-1-fra.html>

Gouvernement du Canada. (2015). Réaliser le vrai changement. *Discours du Trône ouvrant la première session de la quarante-deuxième législature du Canada*. 4 décembre 2015. Consulté le 17 décembre 2015 à l'adresse : <http://discours.gc.ca/fr/contenu/realiser-le-vrai-changement>

Greer AD, Newhook P, Sutherland GR. (2006). *Human-machine interface for robotic surgery and stereotaxy*. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery* 1:295-297.

Howell, E. (Juin 2012). Health in the Arms of a Space Robot. *Space Quarterly*. Consulté le 17 novembre 2015 à l'adresse : http://www.csii.ca/sites/default/files/Space%20Quarterly_%20Health%20in%20the%20Arms%20of%20a%20Space%20Robot.pdf

The Hamilton Spectator (Juillet 2012). *Hamilton robot can detect and treat breast cancer*. Consulté le 17 novembre 2015.

IBIS World. *Robotic Surgery Equipment Manufacturing in the US: Market Research Report*. Consulté le 18 novembre 2015 à l'adresse : <http://www.ibisworld.com/industry/robotic-surgery-equipment-manufacturing.html>

Industrie Canada. (2014). *Un moment à saisir pour le Canada : Aller de l'avant dans le domaine des sciences, des technologies et de l'innovation 2014*. Consulté le 20 juillet 2015 à l'adresse : [https://www.ic.gc.ca/eic/site/icgc.nsf/vwapj/Moment_saisir_rapport_ST-I-2014-fra.pdf/\\$file/Moment_saisir_rapport_ST-I-2014-fra.pdf](https://www.ic.gc.ca/eic/site/icgc.nsf/vwapj/Moment_saisir_rapport_ST-I-2014-fra.pdf/$file/Moment_saisir_rapport_ST-I-2014-fra.pdf)

Influence Communication. *Rapport d'analyse des mentions du robot Dextre sur Twitter réalisé par Influence Communication (22 au 31 mai 2014)*. Rapport présenté à l'Agence spatiale canadienne, 9 juin 2014.

Groupe international de coordination de l'exploration spatiale (ISECG). (Septembre 2013). *Benefits Stemming from Space Exploration*. Consulté le 20 juillet 2015 à l'adresse : <https://www.nasa.gov/sites/default/files/files/Benefits-Stemming-from-Space-Exploration-2013-TAGGED.pdf>

Groupe international de coordination de l'exploration spatiale (ISECG). (Septembre 2011). *The Global Exploration Roadmap*. Consulté le 17 novembre 2015 à l'adresse : http://www.nasa.gov/pdf/591067main_GER_2011_small_single.pdf

Lang MJ, Greer AD, Sutherland GR. (2010). *Intra-operative Robotics: neuroArm*. Acta Neurochirurgica Supplementum 109: 231-236.

Lengyel, David M, Newman, Stephen J. (Septembre 2014). *International Space Station Lessons Learned for Space Exploration*. http://www.nasa.gov/externalflash/iss-lessons-learned/docs/report_ISSLessonsLearned.pdf

Looi, Thomas, Benny Yeung, Manickham Umasthan and James Drake. (2013). "KidsArm — An Image-Guided Pediatric Anastomosis Robot", 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), du 3 au 7 novembre 2013. Tokyo, Japon : 4105-4110.

Looi, Thomas, Benny Yeung, Manickham Umasthan and James Drake. (2013). « Image Guidance Framework with Endoscopic Video for Automated Robotic Anastomosis in a Paediatric Setting », The Hamlyn Symposium on Medical Robotics (2013): 98-99.

Louw DF, Fielding T, McBeth PB, Gregoris D, Newhook P, Sutherland GR. (2004). *Surgical Robotics: A Review and Neurosurgical Prototype Development*. Neurosurg 54: 525-537.

Lucier, L. and C. Smith. (2010). *Cosmic catch: Canadarm2's first capture of a free-flying vehicle - Operational risks, considerations and results, Proceedings of the 61st International Astronautical Congress, Prague, 2010, article IAC-10.B6.1.3*

MEDCITY News. (Novembre 2013). *Robotics used in space enable a 'one-stop shop' for breast MRI, biopsy, tissue ablation*. Consulté le 17 novembre 2015 à l'adresse : <http://medcitynews.com/tag/radiology/>

Memorandum of Understanding between the Canadian Space Agency and the National Aeronautics and Space Administration of the United States of America Concerning Cooperation on the Civil International Space Station. ASC, NASA (28 janvier 1998).

Metcalfe, L., M. Ciaramicoli, P. Jean, P. Johnson-Green and E. Tabarah (2012). *Canada and the International Space Station Program: Overview and Status since IAC 2011*. 63rd International Astronautical Congress 2012 (IAC 2012), Naples, Italie, du 1^{er} au 5 octobre 2012, IAC-11.B2.2.1

National Aeronautics and Space Administration. (Novembre 2010). *Reference Guide to the International Space Station: Assembly Complete Edition*. Consulté le 19 août 2015 à l'adresse : http://www.nasa.gov/pdf/508318main_ISS_ref_guide_nov2010.pdf

National Aeronautics and Space Administration. (31 octobre 2013). *Robots from Space Lead to One-Stop Breast Cancer Diagnosis Treatment*. Consulté le 17 novembre 2015 à l'adresse : <http://www.nasa.gov/station/research/news/igar/#.VdS3R-lqkrk>

Pandya S, Motkoski JW, Serrano-Almeida C, Greer AD, Latour I, Sutherland GR. (2009). *Advancing Neurosurgery with Image-Guided Robotics*. J Neurosurg 111:1141-1149.

Poynter, L. and P. A. Keenan (2012). *The role of dexterous robotics in ongoing maintenance of the ISS, 63rd International Astronautical Congress 2012 (IAC 2012), Naples, Italie, du 1^{er} au 5 octobre 2012, Volume 5 de 14 : IAC-12.B3.4-B6.5.6*

Red Orbit. (August 21, 2014). *KidsArm Pediatric Surgical Robot Inspired By Space Station Technology*. Consulté le 17 novembre 2015 à l'adresse : <http://www.redorbit.com/news/space/1113216886/robot-for-pediatric-surgery-inspired-by-iss-nasa-tech-082114/>

Rembala, R. (2011). *The evolution of tele-robotics on ISS and enabling of unmanned on-orbit services, 62nd International Astronautical Congress 2011 (IAC 2011), Cape Town, Afrique du Sud, du 3 au 7 octobre 2011, Volume 4 de 12 : IAC-11.B3.4.-B6.6.10*

Rizun PR, Sutherland GR. (2005). *A Tactile-Feedback Laser System for Robotic Surgery*. Proceedings of the World Haptics Conference 426 – 431.

Robinson, J ED. Élaboré par des membres de l'Agence spatiale canadienne (ASC), de l'Agence spatiale européenne (ESA), de l'Agence d'exploration aérospatiale japonaise (JAXA), de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) et de l'Agence spatiale fédérale russe (Roscomos). *International Space Station Benefits for Humanity. 2012*. Consulté le 22 juillet 2015 à l'adresse : <https://www.nasa.gov/sites/default/files/files/Benefits-Stemming-from-Space-Exploration-2013-TAGGED.pdf>

Sponder, L., G. Leclerc, P. Jean, P. Johnson-Green and T. H. Braithwaite (2010). Canada and the International Space Station Program: Overview and Status since IAC 2009. Proceedings of the 61st International Astronautical Congress (IAC 2010), Prague, République Tchèque, du 27 septembre au 1^{er} octobre 2010. IAC-10.B3.1.3.

Sutherland GR, Latour I, Greer AD. *Integrating an image guided robot with intraoperative MRI: A review of design and construction*. IEEE Engineering in Medicine and Biology 27:59-65, 2008.

Sutherland, G. R., S. Lama, L. S. Gan, S. Wolfsberger and K. Zareinia (2013). « Merging machines with microsurgery: Clinical experience with NeuroArm ». *Journal of Neurosurgery*. 118(3) : 521-529.
<http://thejns.org/doi/pdf/10.3171/2012.11.JNS12877>

Sutherland GR, McBeth PB, Louw DF. (2003). *neuroArm: An MR Compatible Robot for Microsurgery*. Computer Assisted Radiology and Surgery 1256: 504-508.

Sutherland GR, Newhook P, Feil G, Fielding T, Greer AD, Latour I. *An image-guided MR compatible surgical robot*.

Sutherland, G. R., S. Wolfsberger, S. Lama and K. Zarei-Nia (2013). « The evolution of NeuroArm ». *Neurosurgery*. 72(SUPPL. 1) : A27-A32. <http://www.pubfacts.com/detail/23254809/The-evolution-of-NeuroArm>

Technopolis Group prepared for the European Commission Space Policy and Coordination Unit. *Summary Report: Space Exploration and Innovation*. (3 octobre 2010) Consulté le 20 juillet 2015 à l'adresse : http://ec.europa.eu/enterprise/policies/space/files/policy/final_technopolis_report_en.pdf

Université de Cincinnati, <http://uhealth.com/services/robotic-surgery/patient-information/benefits/>

Annexe C : Sommaire des constatations des études de cas

Évaluation du sous-sous-programme Opérations d'assemblage et d'entretien de la Station spatiale internationale – Études de cas

Études de cas : aperçu sommaire

Introduction

Cette annexe présente un aperçu sommaire et un examen des trois technologies retenues comme études de cas dans le cadre de cette évaluation :

- 1) **NeuroArm** : un bras robotique très précis qui travaille en conjonction avec les capacités d'imagerie de pointe des systèmes d'imagerie par résonance magnétique (IRM) afin de faire des interventions neurochirurgicales.
- 2) **IGAR (Image Guided Automated Robot)** : une plateforme robotique qui permettra de faire des interventions chirurgicales automatisées, guidées par l'image et à effraction minimale pour le traitement de différents problèmes de santé. La première plateforme mise au point est le robot IGAR pour les seins, qui s'intègre de façon transparente à un système d'imagerie par résonance magnétique (IRM) et qui permet à un radiologiste de choisir une cible dans le scan d'une patiente, puis de diriger l'intervention avec confiance, et ce, avec une précision millimétrique.
- 3) **KidsArm** : un bras robotique autonome guidé par l'image permettant de faire des anastomoses (suturer/raccorder des vaisseaux délicats comme des veines, des artères ou des intestins) dans des patients pédiatriques de la naissance à l'âge de quatre ans.

Les études de cas couvrent les questions d'évaluation suivantes :

- **Transfert de savoir-faire et de technologies** : exemples de transferts de savoir-faire et de technologies du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS à d'autres industries/utilisations (dérivés);
- **Développement commercial, brevets et marques de commerce** : exemples de brevets et de marques de commerce déposées découlant de la participation du Canada au SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS (applications non spatiales);
- **Possibilités de ventes** : valeur des ventes subséquentes (recettes) de nouveaux produits, processus ou technologies découlant de la participation au SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS au cours des sept dernières années;
- **Conférences, publications et citations** : nombre de publications/citations/conférences scientifiques/non spécialisées;
- **Avantages socioéconomiques potentiels** : exemples démontrant comment le programme a contribué à la croissance socioéconomique à l'aide de nouveaux produits, processus et technologies;
- **Résultats inattendus** : résultats inattendus positifs et/ou négatifs découlant du SSP Opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS;
- **Développement de technologies/produits subséquents** : profils du développement de technologies et de produits qui découlent des technologies décrites dans les études de cas.

Chaque étude de cas est fondée sur un examen des documents pertinents (p. ex. : recherche dans Internet, y compris les sites Web de projets et la couverture médiatique, les comptes rendus de conférences et les journaux universitaires) et des entrevues avec des informateurs clés (p. ex. : chercheurs principaux du partenaire médical et responsables/ingénieurs de MDA ayant participé au projet).

Transfert de savoir-faire et de technologies

L'expérience provenant de trois générations de systèmes robotiques (Canadarm, Canadarm2 et Dextre) mis au point par MDA pour la navette spatiale et la Station spatiale internationale (ISS) qui ont établi le Canada comme chef de file mondial en robotique spatiale a été appliquée à trois robots destinés à des applications médicales (NeuroArm, IGAR et KidsArm). Les similitudes entre les robots spatiaux (Canadarm, Canadarm2 et Dextre) et médicaux (NeuroArm, IGAR et KidsArm) se trouvent au niveau des environnements d'exploitation et des exigences qu'il fallait respecter pour obtenir une entière fonctionnalité. Les robots fonctionnent dans des environnements extrêmes (l'espace et l'intérieur d'un appareil d'IRM dans le cas de NeuroArm et d'IGAR), ils sont utilisés par des experts (astronautes et chirurgiens) qui manipulent des objets délicats (réparations mécaniques en apesanteur, biopsies et traitement des seins, pose de sutures dans des patients pédiatriques de la naissance à quatre ans) et des configurations personnalisées sont nécessaires pour les robots spatiaux et médicaux avec une marge d'erreur très étroite. De plus, IGAR et les générations futures de robots médicaux doivent pouvoir être utilisés à distance avec des niveaux extrêmes de sécurité, de durabilité et de redondance.

Le processus d'approbation des appareils médicaux est très long, particulièrement pour les appareils invasifs qui pénètrent dans le corps : il peut durer plus de dix ans. Par conséquent, un autre avantage de la participation de MDA dans la mise au point des trois robots médicaux était l'expérience acquise dans le cadre de différents processus de réglementation et d'approbation pour les robots spatiaux. Le Canadarm, le Canadarm2 et Dextre ont tous dû subir des processus de réglementation et d'approbation exhaustifs, imposés par la National Aeronautics and Space Administration (NASA) des É.-U., qui ressemblent aux approbations réglementaires exigées pour NeuroArm par la Food and Drug Administration des É.-U. et Santé Canada.

Le transfert direct de technologies du développement du Canadarm, du Canadarm2 et de Dextre aux robots NeuroArm, IGAR et KidsArm était l'utilisation des mêmes blocs d'algorithme dans les logiciels de contrôle qui font fonctionner les robots médicaux. L'expérience de la théorie du contrôle, des applications de vision et du ciblage à bord de l'ISS s'appliquait aussi aux robots NeuroArm, IGAR et KidsArm.

Développement commercial, brevets et marques de commerce

Des trois technologies visées dans les études de cas, NeuroArm est la plus avancée dans le processus de développement commercial et elle compte le plus grand nombre de brevets, suivie par le robot IGAR pour les seins qui, prévoit-on, pourrait être commercialisé en 2016.

Possibilités de ventes

Étant donné qu'aucune des technologies visées par les études de cas n'a terminé le long processus de réglementation et d'approbation exigé pour les appareils médicaux, aucune recette n'a été produite

jusqu'ici et il n'existe pas de données sur les ventes anticipées (cela comprend NeuroArm qui est la technologie la plus avancée dans le processus de développement commercial).

Conférences, publications et citations

De façon générale, le nombre de présentations lors de conférences, de publications, de citations et de prix reflète le niveau de développement commercial et le nombre de brevets associés à chaque technologie visée par les études de cas. Par exemple, NeuroArm en compte le plus : 111 présentations et démonstrations, 39 publications évaluées par des pairs et 9 monographies et chapitres dans des livres. NeuroArm a été intronisé au Space Technology Hall of Fame (avril 2014) et son chercheur principal, le D^r Garnette Sutherland de l'Université de Calgary, a été fait Compagnon de l'Ordre du Canada (décembre 2011).

Avantages socioéconomiques potentiels

S'ils sont commercialisés, on prévoit que NeuroArm et le robot IGAR pour les seins vont permettre une réduction de l'incidence de complications chirurgicales par un positionnement plus précis, des séjours plus courts à l'hôpital et une baisse subséquente des coûts pour le système de santé, de plus petites incisions entraînant une réduction du risque d'infection, une réduction de la douleur et de l'inconfort, une réduction de la perte de sang et de transfusions, un rétablissement et un retour aux activités normales plus rapides, et des cicatrices minimales. L'exploitation à distance permettra l'accès aux services de soins de santé dans les milieux ruraux et éloignés.

Résultats inattendus

Aucun résultat inattendu n'a été souligné ou trouvé dans les trois études de cas. Cependant, il y a eu deux événements inattendus : un associé à NeuroArm et l'autre à KidsArm. Dans le premier cas, la compagnie IMRIS, qui avait acquis NeuroArm pour achever le processus de réglementation et d'approbation afin de commercialiser la technologie, s'est placée sous la protection de la loi sur les faillites aux É.-U. Toutefois, on prévoit que IMRIS pourra restructurer et refinancer ses opérations et poursuivre les travaux de développements liés à NeuroArm. Dans le deuxième cas, le D^r Peter Kim, le chirurgien néonatal général de l'hôpital SickKids qui a commencé à travailler au robot KidsArm, a quitté le projet à mi-chemin pour occuper un poste aux É.-U. Heureusement, son remplaçant, le D^r James Drake, chef de la neurochirurgie à l'hôpital SickKids, a veillé à l'achèvement réussi du projet KidsArm. Il n'y a eu aucun résultat inattendu associé à IGAR.

Développement de technologies/produits subséquents

Les trois technologies visées par les études de cas ont mené au développement de technologies/produits subséquents. Les développeurs de NeuroArm travaillent à étendre les capacités d'imageries actuelles au-delà de l'IRM afin d'inclure l'utilisation d'ultrasons et de technologies de tomographie, et ils développent CellArm, qui ramènera les capacités de la technologie NeuroArm au niveau cellulaire, permettant ainsi aux chirurgiens de fonctionner avec une précision beaucoup plus grande. Quant à eux, les développeurs de la plateforme robotique IGAR explorent d'autres interventions cliniques, dont la biopsie et l'ablation des poumons, du foie et des reins, ainsi que l'exploitation à distance. La prochaine génération de KidsArm est le MIEMS (Minimally-Invasive Endoscopic Manipulator System) destiné à des applications neurochirurgicales chez des patients pédiatriques.

Constatations/Conclusions

Les avantages commerciaux potentiels pour le Canada se trouvent dans l'expérience et l'expertise acquises par MDA et leur application à d'autres produits et industries. Avant la participation de MDA au projet NeuroArm (le premier robot médical de MDA), la compagnie œuvrait surtout dans le domaine spatial. Aujourd'hui, elle lance activement des projets dans le domaine médical et pour l'industrie nucléaire (appuyant les centrales nucléaires et les opérations de mise hors service), fondés sur les capacités créées grâce à la participation au projet NeuroArm et à d'autres projets robotiques médicaux (IGAR et KidsArm).

Étude de cas 1 : NeuroArm

Introduction

NeuroArm est un bras robotique très précis qui travaille en conjonction avec les capacités d'imagerie de pointe des systèmes d'imagerie par résonance magnétique (IRM) afin de faire des interventions neurochirurgicales. Le système NeuroArm comprend deux bras robotiques capables de manipuler des outils microchirurgicaux existants ou spécialement conçus reliés à un poste de travail. Le chirurgien est installé au poste de travail et il utilise l'interface humain-machine⁵⁶ pour interagir avec le site opératoire. L'interface humain-machine fournit des images par résonance magnétique (IRM) et des images tridimensionnelles (3D) en temps réel du site opératoire. Des commandes manuelles modifiées permettent aux manipulateurs de reproduire les mouvements des mains du chirurgien, tout en fournissant un retour de force haptique⁵⁷ à ce dernier.

Le projet NeuroArm a été précédé par le développement du premier système au monde d'imagerie par résonance magnétique intra-opératoire (IRMi) dans un bloc opératoire (1997). Estimant qu'il était plus sécuritaire de laisser le patient immobile tout en déplaçant la machine d'IRM plutôt que le contraire, une équipe dirigée par le D^r Garnette Sutherland de l'Université de Calgary a créé le tout premier aimant à champ intense mobile au monde. La technologie de l'IRMi a transformé l'imagerie diagnostique dans la pratique de la neurochirurgie, mais elle a également créé un problème. Il fallait interrompre l'intervention chirurgicale pendant l'acquisition d'images en temps réel du cerveau du patient. C'est alors que le D^r Garnette Sutherland a posé la question « Ne serait-il pas merveilleux de pouvoir continuer l'opération pendant que des images sont prises, dans l'ouverture de l'aimant? ». NeuroArm a été conçu comme manière de continuer à opérer pendant l'acquisition d'images en temps réel.

Le projet NeuroArm a débuté en septembre 2001 et il était financé par la Fondation canadienne pour l'innovation, Diversification de l'économie de l'Ouest Canada, le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Technologie de l'Alberta et la communauté philanthropique de Calgary. Le D^r Sutherland et son équipe de recherche ont approché plusieurs collaborateurs potentiels et ils ont choisi MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd (MDA). Le développement de NeuroArm a duré sept ans, de l'examen préliminaire de la conception à la fabrication et à l'approbation réglementaire par Santé Canada; et il a été construit de façon à respecter les normes de la Food and Drug Administration des É.-U. L'essai clinique initial consistait à introduire NeuroArm progressivement dans un bloc opératoire pour tenir compte des multiples variables qu'un robot chirurgical ajoute à la salle d'opération. En mai 2008, NeuroArm a été utilisé pour faire la première opération neurochirurgicale par un robot compatible avec la RM guidé par l'image. Jusqu'ici, NeuroArm a réussi à mener plus de 60 opérations neurologiques dans un contexte clinique. Le D^r Sutherland a effectué la majorité des opérations neurochirurgicales et un petit nombre (3 ou 4) d'autres neurochirurgiens utilisent aussi la technologie.

NeuroArm est rendu à l'étape de l'utilisation pour enquête des processus d'approbation au Canada et aux É.-U. La prochaine étape du processus consiste à faire d'autres essais cliniques. Le produit ne pourra être commercialisé qu'après avoir obtenu toutes les approbations réglementaires.

⁵⁶ L'interface humain-machine est un logiciel qui présente à un opérateur ou à un utilisateur l'information sur l'état d'un processus et qui accepte et met en œuvre les instructions de l'opérateur.

⁵⁷ La communication haptique recrée le sens du toucher en appliquant des forces, des vibrations ou des mouvements à l'utilisateur.

Transfert de savoir-faire et de technologies

Le projet NeuroArm a été établi comme effort de collaboration entre l'Université de Calgary et MDA. NeuroArm, qui tire profit du savoir-faire et des technologies utilisées pour le Canadarm, le Canadarm2 et Dextre, combine un système de manipulateur de haute précision compatible avec l'IRM, le guidage par l'image, des effecteurs terminaux qui incorporent des outils neurochirurgicaux modifiés, des capteurs tactiles et des commandes manuelles à retour de force qui offrent au chirurgien une présence et un contrôle à distance. Les mêmes blocs d'algorithme des logiciels utilisés pour commander les bras robotiques de l'ISS font fonctionner NeuroArm.

Le processus de conception utilisé dans le développement des deux robots était le même. L'étape initiale consistait à créer un scénario de mission, décrivant toutes les exigences pertinentes et cernant les nombreux défis à relever. Les processus opérationnels ont permis de surmonter les nombreux défis (p. ex. blindage des composants électriques à l'intérieur d'une machine d'IRM), de cerner les anomalies et, enfin, d'incorporer les mesures de sécurité requises et de veiller à ce que les systèmes soient dotés de redondances intégrées.

Un autre avantage de la participation de MDA au développement de NeuroArm a été l'expérience de la compagnie des différents processus de réglementation et d'approbation. Le Canadarm, le Canadarm2 et Dextre ont dû tous subir des processus exhaustifs de réglementation et d'approbation de NASA des É.-U., un peu comme les approbations réglementaires exigées pour NeuroArm par la Food and Drug Administration des É.-U. et par Santé Canada.

Développement commercial, brevets et marques de commerce

Au cours de la période qui s'est écoulée entre l'examen préliminaire et l'examen critique de la conception (2002), on a créé une compagnie, NeuroArm Surgical, qui détient la propriété intellectuelle (PI) liée à NeuroArm. La demande de brevet initiale a été déposée en 2006 et approuvée en 2007.

En février 2010, la société IMRIS Corporation (qui développe, assemble et installe les salles d'opération VISIUS utilisées pour tout un éventail d'applications médicales) a fait l'acquisition de la technologie NeuroArm. Cette acquisition a entraîné la création du système chirurgical SYMBIS, un programme robotique neurochirurgical destiné aux salles d'opération VISIUS. Le développement du système chirurgical SYMBIS était toujours en cours lorsqu'IMRIS Inc. a annoncé, le 26 mai 2015, que la compagnie, sa filiale NeuroArm Surgical Ltd., et sa filiale américaine IMRIS, Inc. avaient chacune déposé une demande de protection en vertu du Chapitre 11 du *Bankruptcy Code* des É.-U. devant le tribunal de la faillite des É.-U. du district du Delaware. Une faillite en vertu du Chapitre 11 permet à IMRIS de restructurer ses finances et ses opérations, tout en poursuivant ses activités de développement.

Actuellement, NeuroArm est visé par 8 brevets canadiens, 2 brevets américains, un brevet de l'Union européenne et 1 brevet japonais. Le nom « NeuroArm » est une marque de commerce au Canada (2004). Il était aussi une marque de commerce aux É.-U., mais elle a été abandonnée en avril 2015.

Possibilités de ventes

Étant donné que NeuroArm suit toujours les processus permettant d'obtenir toutes les approbations réglementaires au Canada et aux É.-U., y compris la suite des essais cliniques, il n'a pas encore généré de

recettes. De plus, compte tenu de l'état de faillite en vertu du Chapitre 11 d'IMRIS et de NeuroArm Surgical Ltd., il n'existe pas de données sur les ventes éventuelles.

Lorsqu'on examine les tendances dans les domaines connexes, les ventes à l'échelle mondiale en 2013 de robots médicaux (chirurgie assistée par des robots et robots thérapeutiques) se chiffraient à 1 300 unités, soit une valeur de 1,2 milliard \$. Par ailleurs, au cours des cinq dernières années, l'industrie de la fabrication de l'équipement robotique chirurgical a connu une croissance solide (une croissance annuelle de 10,2 %) grâce à la prolifération de l'équipement chirurgical robotique dans le secteur de la santé. Enfin, au cours des cinq ans d'ici 2020, on prévoit que l'industrie va continuer de croître à un rythme soutenu, malgré un environnement réglementaire plus strict⁵⁸.

Selon les personnes interviewées, IMRIS devrait pouvoir restructurer et refinancer ses opérations et poursuivre le développement de NeuroArm. Si l'on se fie aux tendances générales dans l'utilisation de robots médicaux, il y a de fortes chances que NeuroArm génère des recettes (s'il est commercialisé), compte tenu de l'exposition mondiale qu'il a déjà reçue et des prix d'excellence technique qu'il a remportés.

Conférences, publications et citations

L'équipe de NeuroArm, dirigée par le D^r Garnette Sutherland de l'Université de Calgary, a fait l'objet de 111 présentations et démonstrations. Elle a produit 39 publications évaluées par des pairs et contribué à 9 monographies et chapitres de livres. Enfin, le D^r Garnette Sutherland a reçu un certain nombre de distinctions pour sa participation au projet NeuroArm : Compagnon de l'Ordre du Canada (décembre 2011); intronisation de NeuroArm au Space Technology Hall of Fame (avril 2014); Exceptional Technology Achievement Medal de la NASA (juillet 2015).

Avantages socioéconomiques potentiels

Comme NeuroArm n'a pas encore été commercialisé et que les essais cliniques et les processus d'approbation réglementaire ne sont pas terminés, aucun emploi additionnel direct n'a été créé grâce au développement du produit.

Selon les personnes interviewées, si NeuroArm vient à être commercialisé, il devrait mener à une incidence réduite de complications chirurgicales découlant de la neurochirurgie (actuellement, le taux de complication à la suite des interventions chirurgicales non urgentes est d'environ 5 %), ainsi qu'un séjour réduit à l'hôpital après les interventions, ce qui pourrait se traduire par une baisse globale des coûts pour le système de santé.

Pour le patient, l'utilisation de NeuroArm entraînera une réduction de la douleur et de l'inconfort associés à la neurochirurgie, ainsi qu'un rétablissement et un retour aux activités normales plus rapides.

⁵⁸ IBIS World. Robotic Surgery Equipment Manufacturing in the US: Market Research Report. Consulté le 18 novembre 2015 à l'adresse : <http://www.ibisworld.com/industry/robotic-surgery-equipment-manufacturing.html>

Résultats inattendus

Aucun résultat inattendu n'a été signalé.

Développement de technologies/produits subséquents

La prochaine évolution de NeuroArm visera à améliorer ces capacités d'imagerie actuelles au-delà de l'IRM, de manière à inclure l'utilisation d'ultrasons et de tomodensitométrie.

Le produit de prochaine génération basé sur la technologie NeuroArm sera un projet appelé CellArm. Ce dernier ramènera les capacités de la technologie NeuroArm au niveau cellulaire, ce qui permettra aux chirurgiens d'avoir une précision beaucoup plus grande (mesurée en microns plutôt qu'en millimètres) et de faire d'autres opérations (p. ex. l'implantation de « vecteurs moléculaires » capables de changer la structure cellulaire) afin d'obtenir les résultats souhaités pour les patients. Actuellement, l'initiative CellArm cherche des sources de financement et de soutien financier.

Constatations/Conclusions

Étant donné que NeuroArm (maintenant SYMBIS) a été et continue d'être utilisé sur des patients pour des essais cliniques et qu'IMRIS développe, assemble et installe les salles d'opération VISIUS, les possibilités de commercialisation complète de NeuroArm/SYMBIS sont prometteuses si IMRIS peut se soustraire à la protection de la loi sur les faillites. On prévoit qu'IMRIS sera en mesure de restructurer et de refinancer ses opérations et de poursuivre le développement associé à SYMBIS. L'Université de Calgary a conclu un accord de collaboration avec IMRIS pour l'utilisation et l'exploitation de SYMBIS et elle a reçu un appareil SYMBIS pour la neurochirurgie. Une fois entièrement opérationnel et commercialisé, SYMBIS pourrait porter des fruits, tant du point de vue commercial que socioéconomique.

Références

Calgary Health Trust. *Project neuroArm*. Consulté le 17 novembre 2015 à l'adresse : <http://www.calgaryhealthtrust.ca/your-impact/our-stories/project-neuroArm/>

Greer AD, Newhook P, Sutherland GR. (2006). *Human-machine interface for robotic surgery and stereotaxy*. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery 1:295-297.

IBIS World. *Robotic Surgery Equipment Manufacturing in the US: Market Research Report*. Consulté le 18 novembre 2015 à l'adresse : <http://www.ibisworld.com/industry/robotic-surgery-equipment-manufacturing.html>

Lang MJ, Greer AD, Sutherland GR. (2010). *Intra-operative Robotics: neuroArm*. Acta Neurochirurgica Supplementum 109: 231-236.

Louw DF, Fielding T, McBeth PB, Gregoris D, Newhook P, Sutherland GR. (2004). *Surgical Robotics: A Review and Neurosurgical Prototype Development*. Neurosurg 54: 525-537.

Pandya S, Motkoski JW, Serrano-Almeida C, Greer AD, Latour I, Sutherland GR. (2009). *Advancing Neurosurgery with Image-Guided Robotics*. J Neurosurg 111:1141-1149.

Rizun PR, Sutherland GR. (2005). *A Tactile-Feedback Laser System for Robotic Surgery*. Proceedings of the World Haptics Conference 426 – 431.

Sutherland GR, Latour I, Greer AD. *Integrating an image guided robot with intraoperative MRI: A review of design and construction*. IEEE Engineering in Medicine and Biology 27:59-65, 2008.

Sutherland, G. R., S. Lama, L. S. Gan, S. Wolfsberger et K. Zareinia (2013). « Merging machines with microsurgery: Clinical experience with NeuroArm ». *Journal of Neurosurgery*. 118(3): 521-529. <http://thejns.org/doi/pdf/10.3171/2012.11.JNS12877>

Sutherland GR, McBeth PB, Louw DF. (2003). *neuroArm: An MR Compatible Robot for Microsurgery*. Computer Assisted Radiology and Surgery 1256: 504-508.

Sutherland GR, Newhook P, Feil G, Fielding T, Greer AD, Latour I. *An image-guided MR compatible surgical robot*.

Sutherland, G. R., S. Wolfsberger, S. Lama et K. Zarei-Nia (2013). « The evolution of NeuroArm ». *Neurosurgery*. 72(SUPPL. 1): A27-A32. <http://www.pubfacts.com/detail/23254809/The-evolution-of-NeuroArm>

Étude de cas 2 : IGAR

Introduction

IGAR (Image Guided Automated Robot) est une plateforme robotique qui permettra de faire des interventions chirurgicales automatisées, guidées par l'image et à effraction minimale pour le traitement de différents problèmes de santé. La première plateforme mise au point est le robot IGAR pour les seins, conçu pour la détection précoce et le traitement du cancer du sein, qui permet de faire une biopsie et un traitement en temps réel de lésions suspectes au sein. Ce robot s'intègre de façon transparente à un système d'imagerie par résonance magnétique (IRM) et permet à un radiologiste de choisir une cible dans le scan d'une patiente, puis de diriger l'intervention avec confiance, et ce, avec une précision millimétrique⁵⁹.

Le robot IGAR pour les seins pourrait transformer le cheminement de soin pour les patientes atteintes du cancer en offrant un système à « guichet unique » pour le diagnostic, le traitement et l'intervention. Ce robot peut d'abord faire une biopsie d'une lésion suspecte. Ensuite, il peut procéder à l'ablation des marges du site de la biopsie, si cela est justifié du point de vue clinique. Pour les lésions ou les tumeurs pouvant exiger une tumorectomie, il est également possible de faire une localisation de grains radioactifs guidée par l'image dans le sein, ce qui permet d'améliorer les chances de réussite et d'éviter une nouvelle incision.

En 2007, le D^r Mehran Anvari, de l'Université McMaster, et MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd (MDA) ont entrepris de créer et d'améliorer IGAR. Le Centre pour l'invention et l'innovation en chirurgie (CIIC), une entité à but non lucratif hébergée au centre St Joseph's Healthcare Hamilton et à l'Université McMaster, a été fondée en 2009 avec le D^r Anvari comme PDG. Le CIIC a reçu 14,8 millions \$ en financement à long terme des Réseaux de centres d'excellence, et environ 24,3 millions \$ en fonds et contribution en nature en temps, travaux de recherche et équipement de MDA et de l'Université McMaster. Le CIIC a créé un partenariat avec MDA comme principal partenaire corporatif pour le développement robotique. En quatre ans, le CIIC a réussi à développer et à fabriquer son premier système clinique destiné à la détection précoce du cancer du sein et à son traitement chez les femmes à haut risque (le robot IGAR pour les seins).

Un essai clinique pilote de Phase I s'est terminé à Québec en mars 2014 sous la supervision de la D^{re} Nathalie Duchesne. Les résultats de cet essai pilote sont extrêmement prometteurs et ils démontrent la précision et l'utilisabilité du robot. Toutes les biopsies effectuées par le robot IGAR pour les seins ont été couronnées de succès et aucune répétition n'a été nécessaire. Les patientes ont déclaré des scores liés à la douleur extrêmement bas, ainsi que d'excellents résultats cosmétiques.

À la suite de la réussite de la Phase I, Santé Canada a approuvé un essai clinique de Phase II, qui a été lancé en décembre 2014. La Phase II porte sur deux sites : Québec, avec la D^{re} Nathalie Duchesne, et Hamilton, avec le D^r Colm Boylan. Jusqu'à 100 patientes seront inscrites à l'essai clinique. Au cours de la Phase II, on utilisera un robot à deux bras et recueillera des données de patientes qui subiront une biopsie du sein avec le robot IGAR. Ces données seront ensuite comparées à celles portant sur des femmes ayant subi une biopsie manuelle standard. Si l'on obtient la validation clinique et le permis d'utilisation, on prévoit que le robot IGAR pour les seins sera mis sur le marché en 2016.

⁵⁹ Centre for Surgical Invention & Innovation, http://www.csii.ca/robotic_development/igar

Transfert de savoir-faire et de technologies

En plus de l'expérience et de la capacité découlant de la participation de MDA dans le développement d'éléments robotiques pour la navette spatiale et la Station spatiale internationale (ISS), le robot IGAR pour les seins a profité d'une approche rigoureuse en ingénierie des systèmes utilisée dans le cadre du développement du Canadarm pour la navette ainsi que du Canadarm2 et de Dextre pour l'ISS, en plus de l'expérience acquise lors du développement de NeuroArm.

Le processus de conception utilisé dans le développement des deux ensembles d'appareils robotiques était le même. L'étape initiale consistait à créer un scénario de mission, décrivant toutes les exigences pertinentes et cernant les nombreux défis à relever. Les processus opérationnels ont permis de surmonter les nombreux défis (p. ex. blindage des composants électriques à l'intérieur d'une machine d'IRM), de cerner les anomalies et, enfin, d'incorporer les mesures de sécurité requises et de veiller à ce que les systèmes soient dotés de redondances intégrées.

Le niveau de transfert direct de technologie du développement du Canadarm, du Canadarm2 et de Dextre au robot IGAR pour les seins était limité à l'utilisation des mêmes blocs d'algorithme dans les logiciels de contrôle qui font fonctionner le robot IGAR pour les seins.

Développement commercial, brevets et marques de commerce

Le développement de la plateforme robotique IGAR a été établi sous forme de partenariat entre le CIIC et MDA. MDA a été un partenaire pleinement engagé, offrant non seulement sa vaste expertise en robotique, mais aussi ses connaissances et son appui dans la planification des affaires, les prévisions, l'analyse de marché et les relations avec le gouvernement. MDA s'est profondément investie dans la réussite du CIIC et elle prévoit poursuivre son partenariat avec ce dernier pour lancer avec succès le premier système commercial (le robot IGAR pour les seins), et pour développer et créer des plateformes futures.

Le CIIC a tissé des liens avec Hologic, qui possède une part appréciable du marché mondial du soin des seins et des technologies d'imagerie pour la santé des femmes. Hologic a offert au CIIC un accès direct au marché pour le lancement commercial du premier système. Le CIIC prévoit élargir les affiliations et les partenariats (Stryker, IMRIS, Ethicon) pour maximiser sa réussite à mesure qu'il procède à la construction de deux nouveaux robots et au lancement de nouveaux programmes visant à améliorer les soins.

Par ailleurs, le CIIC a obtenu l'appui d'organisations et de leaders universitaires clés du Canada (Québec, Ontario et Alberta) et du monde (É.-U., France, Pays-Bas, Israël) et créé des partenariats avec eux. Des projets de recherche conjoints ont été mis sur pied avec deux autres Centre d'Excellence en matière de recherche au Canada (le Centre pour le développement et la commercialisation des traceurs de l'Université McMaster et le Centre de commercialisation pour la technologie de l'image de l'Institut de recherche Robarts, Université Western Ontario), qui participeront au développement de deux produits commerciaux futurs. Sa relation avec le ministère de la Santé et des soins de longue durée de l'Ontario a permis au CIIC de bien comprendre la mise en œuvre de nouvelles technologies et techniques en milieu clinique en Ontario. Le Centre est en train de tisser des liens semblables avec des ministères de la Santé à travers le Canada (Québec, Alberta, C.-B.).

Actuellement, la plateforme robotique IGAR fait l'objet d'un brevet canadien et 11 autres demandes ont été déposées : cinq au Canada et six aux É.-U.

Possibilités de ventes

Le robot IGAR pour les seins est en cours de validation clinique et d'obtention des permis nécessaires en vue d'une commercialisation en 2016. Par conséquent, il est trop tôt pour que des recettes aient été générées et il n'existe pas de données sur les ventes anticipées. Comme on l'a signalé pour l'étude de cas sur NeuroArm, on s'attend à ce que l'industrie des robots médicaux connaisse une forte croissance d'ici 2020.

Conférences, publications et citations

Il n'existe aucune publication ou présentation de conférence associée à la plateforme robotique IGAR. Cependant, le D^r Anvari, Directeur scientifique et PDG du CIIC a reçu un certain nombre de distinctions pour sa participation dans le CIIC et la création de la plateforme robotique IGAR, comme le Prix de la recherche et du développement de la Station spatiale internationale pour l'innovation en biologie et en médecine, pour le travail qu'il a accompli dans le développement du robot IGAR (Image-Guided Automated Robot) servant au diagnostic et au traitement du cancer du sein (juillet 2015), le prix ORION Leadership (2010) et le titre d'Innovateur de l'année de l'Université McMaster (2009).

Avantages socioéconomiques potentiels

Comme on le mentionne dans le site Web du Centre, « Le CIIC a déjà appuyé la création et la rétention de plus de 24 emplois techniques bien rémunérés, un nombre qui augmentera considérablement après la commercialisation de son premier système en 2016 ». [Traduction]

Parmi les avantages pour le système de santé, citons : 1) moins de complications grâce à un positionnement plus précis, ce qui permet une réduction des séjours à l'hôpital, et 2) un traitement à « guichet unique », comprenant le diagnostic, la biopsie et le traitement par ablation pour éliminer la tumeur ou les lésions, ce qui se traduit par une réduction du nombre d'opérations chirurgicales et une baisse globale des coûts pour le système de santé.

Sur le plan individuel, on prévoit que l'utilisation du robot IGAR pour les seins donnera : 1) une hospitalisation plus courte, 2) une réduction de la douleur et de l'inconfort, 3) un rétablissement et un retour aux activités normales plus rapides, 4) des incisions plus petites, ce qui réduit le risque d'infection, 5) une réduction de la perte de sang et des transfusions, et 6) des cicatrices minimales.

Résultats inattendus

Aucun résultat inattendu n'a été signalé.

Développement de technologies/produits subséquents

Le CIIC a d'autres systèmes robotiques novateurs en cours de développement, dont un deuxième système destiné à un éventail de procédures cliniques pour la biopsie et l'ablation des poumons, du foie et des reins, dont la commercialisation devrait se faire en 2020.

Parmi les applications futures de la plateforme robotique IGAR, citons : 1) des interventions guidées par l'image faisant appel aux ultrasons ou à une fusion de l'IRM et des ultrasons, 2) l'ablation de la lésion (par cryothérapie ou une autre technologie), 3) la localisation de grains radioactifs pour identifier la lésion en vue d'une ablation chirurgicale, et 4) la télé-opérabilité, ce qui permettrait à des radiologistes de faire une biopsie et de traiter les patientes à distance, améliorant du coup l'accès à des soins de santé en région rurale et éloignée.

Le CIIC mène actuellement des recherches préliminaires et des essais fantômes portant sur d'autres fonctionnalités potentielles de la plateforme robotique IGAR pour un éventail de procédures cliniques. De plus, il va intégrer d'autres modalités d'imagerie, comme la tomodensitométrie et les ultrasons.

Constatations/Conclusions

Étant donné que le robot IGAR pour les seins subit en ce moment des essais cliniques de Phase II à Québec et à Hamilton, l'engagement des deux partenaires (MDA et le CIIC) est de développer à fond et de commercialiser le robot IGAR pour les seins. Compte tenu de cela, des relations du CIIC avec les ministères provinciaux de la Santé et de l'accès du Centre au marché mondial des soins de santé grâce à ses liens avec Hologic, les possibilités de commercialisation du robot IGAR pour les seins en 2016 sont prometteuses.

Références

The Bay Observer. (26 novembre 2013). *Hamilton's IGAR Breast Robot & Centre for Surgical Invention and Innovation is Featured on NASA Website*. Consulté le 17 novembre 2015 à l'adresse : <http://www.csii.ca/sites/default/files/The%20Bay%20Observer%20Nov.%202013.pdf>

Canadian Healthcare Technology. (Mars 2013). *Canadians drive development of surgical robotics*. Consulté le 18 novembre 2015 à l'adresse : http://www.csii.ca/sites/default/files/docs/Healthcare%2520Technology%2520Article_Front%2520Page.pdf

Canadian Healthcare Technology. (Mars 2013). *Canadian teams are innovators in development of surgical robots*. Consulté le 18 novembre 2015 à l'adresse : http://www.csii.ca/sites/default/files/docs/Healthcare%2520Technology%2520Article_Continued-1.pdf

Canadian Healthcare Technology. (Mars 2010). *Hamilton seeks to become centre of excellence for medical robotics*. Consulté le 17 novembre 2015 à l'adresse : http://www.csii.ca/sites/default/files/docs/CdnHealthCareTech%20Article_March%202010.pdf

Centre for Surgical Invention & Innovation, http://www.csii.ca/robotic_development/igar

Howell, E. (Juin 2012). *Health in the Arms of a Space Robot*. *Space Quarterly*. Consulté le 17 novembre 2015 à l'adresse : http://www.csii.ca/sites/default/files/Space%20Quarterly_%20Health%20in%20the%20Arms%20of%20a%20Space%20Robot.pdf

The Hamilton Spectator (Juillet 2012). *Hamilton robot can detect and treat breast cancer*. Consulté le 17 novembre 2015 à l'adresse : http://www.csii.ca/sites/default/files/docs/Hamilton-Spectator_Dr.-Anvari.pdf

MEDCITY News. (Novembre 2013). *Robotics used in space enable a 'one-stop shop' for breast MRI, biopsy, tissue ablation*. Consulté le 17 novembre 2015 à l'adresse :
<http://medcitynews.com/2013/11/robotic-technology-goes-space-surgical-suite-breast-cancer-biopsy/>

National Aeronautics and Space Administration. (31 octobre 2013). *Robots from Space Lead to One-Stop Breast Cancer Diagnosis Treatment*. Consulté le 17 novembre 2015 à l'adresse :
<http://www.nasa.gov/station/research/news/igar/>

Étude de cas 3 : KidsArm

Introduction

KidsArm est un bras robotique autonome guidé par l'image permettant de faire des anastomoses (suturer/raccorder des vaisseaux délicats comme des veines, des artères ou des intestins) chez des patients pédiatriques de la naissance à l'âge de quatre ans. KidsArm a été créé pour aider les chirurgiens à faire certaines interventions beaucoup plus rapidement que s'ils utilisaient seulement leurs mains, et ce, avec une précision accrue⁶⁰.

Riche de l'expérience acquise avec NeuroArm, MDA a approché la communauté médicale pour mettre au point des applications médicales robotiques semblables basées sur les technologies développées pour les bras robotiques utilisés à bord de l'ISS. Le D^r Peter Kim, chirurgien général néonatal et thoracique et co-fondateur du Centre for Image-Guided Innovation and Therapeutic Intervention (CIGITI) de l'hôpital SickKids a répondu favorablement à la demande de MDA pour la raison expliquée ci-dessous.

Dans le domaine médical, la chirurgie à effraction minimale (MIS) et les outils laparoscopiques ont révolutionné les interventions chirurgicales et raccourci le rétablissement des patients en permettant aux chirurgiens de faire des interventions en faisant trois ou quatre incisions d'un diamètre maximal de 1 ou 2 cm. Cependant, les interventions MIS sont souvent plus difficiles et complexes, car le chirurgien est limité à des outils laparoscopiques qui n'offrent pas la même souplesse et la même dextérité que les outils utilisés lors d'interventions « ouvertes » (faites à la main par une grande incision). Les patients pédiatriques présentent un défi unique car ils ont des volumes plus petits et leurs tissus ont des propriétés différentes⁶¹. Le D^r Kim de l'hôpital SickKids estimait qu'un outil robotique agile permettrait de surmonter ces difficultés.

Le projet KidsArm a commencé en 2010 lorsque l'hôpital SickKids, en collaboration avec MDA, a reçu 10 millions \$ de l'Agence fédérale de développement économique pour le Sud de l'Ontario (FedDev Ontario) et du Fonds pour la recherche en Ontario/de la Fondation canadienne pour l'innovation pour appuyer le développement d'un robot chirurgical pédiatrique guidé par l'image, ou KidsArm. Malheureusement, à mi-chemin du projet, le D^r Peter Kim a quitté l'hôpital SickKids/le CIGITI pour occuper un poste aux É.-U. Il a été remplacé par le D^r James Drake, Directeur du CIGITI et chef de la neurochirurgie à l'hôpital SickKids, qui s'est assuré que le projet KidsArm soit terminé.

Deux ans plus tard, en 2012, le CIGITI/SickKids et MDA ont réussi à construire un prototype fonctionnel de KidsArm (une version alpha de validation de concept, pour répondre à la question « Peut-on utiliser un robot pour coudre des vaisseaux ou tissus simulés? »). KidsArm a réussi à faire 3 sutures de façon autonome dans le scénario de gauche à droite, mais il avait plus de difficulté dans le scénario de bout en bout, en raison de la plus grande déformation et des restrictions de l'espace de travail.

Il y avait un grand défi à relever dans ce projet : les contraintes de taille et de volume sont rendues plus importantes par le fait que les enfants ont des organes, des vaisseaux et des cibles plus petites, alors

⁶⁰ Looi, Thomas, Benny Yeung, Manickham Umasthan et James Drake. (2013). « KidsArm — An Image-Guided Pediatric Anastomosis Robot », 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) du 3 au 7 novembre 2013. Tokyo, Japon : 4105-4110.

⁶¹ *Ibid.*

que les outils étaient de la même taille, ou à peine plus petits, que ceux utilisés pour les adultes. Si l'on pouvait résoudre le scénario de bout en bout, on prévoit que l'utilisation de KidsArm se traduirait par des résultats plus uniformes pour les patients pédiatriques, ainsi que par la capacité d'intervenir plus tôt ou de faire des manipulations à plus petite échelle que les pratiques actuelles.

Transfert de savoir-faire et de technologies

Comme ce fut le cas avec NeuroArm et IGAR, les algorithmes utilisés pour Dextre, stockés à l'intérieur du serveur d'intégrité de source, ont été réutilisés/adaptés pour KidsArm. Afin de faciliter le processus de transfert de la technologie, les ingénieurs en contrôle pertinents de Logistique et ingénierie de soutien (L et IS) qui ont travaillé au Système d'entretien mobile (MSS) ont été recrutés pour la mise en œuvre de ces algorithmes dans le cadre du projet KidsArm.

De plus, l'expérience de MDA en théorie du contrôle, en applications de vision et de ciblage à plus grande échelle pour la Station spatiale internationale (ISS) a été appliquée à KidsArm, la nouveauté consistant à l'adapter à des applications plus petites. Le développement de KidsArm a également profité du mode d'exploitation autonome utilisé à bord de l'ISS.

Développement commercial, brevets et marques de commerce

Une demande de brevet a été déposée au Canada pour le système de vision utilisé avec KidsArm. Aucune marque de commerce n'est associée au projet KidsArm.

Possibilités de ventes

Avant que KidsArm puisse subir des essais cliniques et être utilisé sur des patients, il faut faire d'autres travaux de recherche sur la poursuite en temps réel, de meilleurs algorithmes de poursuite des cibles et une couture efficace par le bras robotique.

Conférences, publications et citations

Deux publications et deux citations sont associées au projet KidsArm. Les deux publications ont été présentées lors de conférences internationales.

Avantages socioéconomiques potentiels

Le développement de KidsArm a nécessité l'embauche de nouveaux ingénieurs, d'ingénieurs ayant acquis de l'expérience en matière de bras robotiques (ISS, NeuroArm et IGAR), d'ingénieurs de recherche, de 10 étudiants de premier cycle, de 2 à 4 étudiants des cycles supérieurs et de 4 ou 5 chercheurs cliniques (médecins).

Si KidsArm était approuvé, les avantages seraient des résultats plus uniformes pour les patients pédiatriques et la capacité d'intervenir plus tôt ou de faire des manipulations à plus petite échelle que les pratiques actuelles.

Résultats inattendus

Aucun résultat inattendu n'a été signalé.

Développement de technologies/produits subséquents

Une prochaine « génération » de KidsArm, le robot MIEMS (Minimally-Invasive Endoscopic Manipulator System), est en cours de développement par SickKids/le CIGITI sous la direction du D^r James Drake (qui a remplacé le D^r Kim), mais sans la participation de MDA. Le MIEMS est un outil beaucoup plus petit, mesurant 2 mm de diamètre, par comparaison au KidsArm et son diamètre de 8 à 10 mm. SickKids a décidé de créer un partenariat avec une autre compagnie, ESI.

Le robot MIEMS a une meilleure chance d'être commercialisé et utilisé pour soigner des patients pédiatriques pour différentes raisons : 1) MIEMS relève du domaine d'expertise du D^r Drake – les applications neurochirurgicales destinées aux patients pédiatriques; 2) avec un diamètre de 2 mm, le MIEMS est beaucoup plus petit que KidsArm et son diamètre de 8 à 10 mm; 3) le nouveau partenaire du SickKids, ESI, possède une expérience semblable à celle de MDA, mais dans le domaine des robots médicaux.

Si MIEMS est approuvé, les avantages pour les patients pédiatriques seraient une plus grande précision et des interventions plus rapides, ce qui aurait un effet positif direct sur les résultats pour les patients, et il permettrait aux chirurgiens (p. ex. au SickKids) de réaliser des opérations impossibles jusqu'alors.

Constatations/Conclusions

Avant que KidsArm puisse subir des essais cliniques et être utilisé sur des patients, il faut faire d'autres travaux de recherche. Une prochaine « génération » de KidsArm, le MIEMS, est en cours de développement par SickKids/le CIGITI sous la direction du D^r James Drake.

Références

Looi, Thomas, Benny Yeung, Manickham Umasthan et James Drake. (2013). « KidsArm — An Image-Guided Pediatric Anastomosis Robot », 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), du 3 au 7 novembre 2013. Tokyo, Japon : 4105-4110.

Looi, Thomas, Benny Yeung, Manickham Umasthan et James Drake. (2013). « Image Guidance Framework with Endoscopic Video for Automated Robotic Anastomosis in a Paediatric Setting », The Hamlyn Symposium on Medical Robotics (2013): 98-99.

Red Orbit. (21 août 2014). *KidsArm Pediatric Surgical Robot Inspired By Space Station Technology*. Consulté le 17 novembre 2015 à l'adresse : <http://www.redorbit.com/news/space/1113216886/robot-for-pediatric-surgery-inspired-by-iss-nasa-tech-082114/>

Annexe D : Vidéos concernant les opérations d'assemblage et d'entretien de l'ISS et statistiques de visionnement de 2011 à 2015

Vidéos de l'ASC sur l'ISS, nombre de visionnements (en mars 2015)

Date de diffusion en ligne	Titre	Nombre de visionnements
2015-03-06	Dextre remplace une pompe sur la Station spatiale internationale	5 357
2015-01-20	Dextre sort le module CATS de la Station spatiale internationale	7 630
2015-01-15	La technologie spatiale canadienne vient en aide aux enfants malades	12 539
2014-09-29	La technologie spatiale canadienne utilisée pour aider les patientes atteintes de cancer du sein	19 979
2014-05-20	Robot, guéris-toi toi-même : Dextre devient le premier robot à se réparer lui-même dans l'espace	55 277
2014-05-01	Dextre installe la charge utile OPALS sur la Station spatiale internationale	11 492
2013-07-03	La nouvelle génération de Canadarm	23 632
2013-03-03	Hadfield aux commandes du Canadarm2	130 958
2013-02-27	Attrapé cosmique de Dragon par le Canadarm2	13 540
2013-02-27	Livraison effectuée par le Dragon : le Canadarm2 décharge la capsule	3 059
2013-02-27	Le Canadarm2 décroche le Dragon	130
2013-01-09	Le plein s'il vous plaît, Dextre! La Mission de ravitaillement robotique	17 459
2013-01-09	Dextre, pompiste : La Mission de ravitaillement robotique	4 185
2012-06-18	La tâche la plus exigeante de Dextre : La suite de la Mission de ravitaillement robotique sur l'ISS	3 274
2012-05-25	Canadarm2 saisit le Dragon	2 084
2012-05-25	Canadarm2 et Dextre	68
2012-04-16	Le Canadarm2 saisira le Dragon de SpaceX lors de son vol inaugural vers l'ISS - Partie 1	26 473
2012-04-16	Le Canadarm2 saisira le Dragon de SpaceX lors de son vol inaugural vers l'ISS - Partie 2	3 485
2012-03-19	9 mars 2012 : Dextre range ses outils après une mission accomplie!	1 477
2012-03-19	8 mars 2012 : Dextre dégage les verrous de lancement	1 373
2012-03-19	8 mars 2012 : Dextre procède à la coupe : la tâche se solde par un franc succès!	1 054
2012-03-14	Mission de ravitaillement robotique (RRM) de Dextre : Jour 2	1 481
2011-09-02	Le premier travail de réparation de Dextre sur la station spatiale	6 369
2011-08-26	Dextre : Réparation d'un boîtier de disjoncteurs	3 428
2011-07-21	Le Canadarm2 installe l'équipement de la RRM	3 170
2011-07-21	Les opérations de robotique canadienne de STS-135	493
2011-05-27	Une dernière marche dans l'espace et une nouvelle demeure pour la perche d'inspection	1 108
2011-05-20	De la navette à la station : la robotique canadienne au travail	1 012
2011-04-29	L'installation de la palette logistique Express 3	1 429
2011-04-29	L'installation du AMS	429
2011-03-17	Le Canadarm2 donne un « coup de pouce » aux marcheurs de l'espace	922
2011-03-10	L'examen final de Dextre	328
2011-03-09	Piloter le Canadarm2	1 046
2011-03-02	Dextre réussit une autre série de tests sur la Station spatiale internationale	2 399

Source : Données sur le rendement de la Direction des communications et affaires publiques, août 2015.