

# **Les priorités scientifiques du Canada pour la Stratégie mondiale d'exploration**

Contributions scientifiques et médicales potentielles du Canada à l'exploration de la Lune, de Mars et au-delà, établies à partir des travaux du 6<sup>e</sup> Atelier canadien sur l'exploration spatiale (CSEW6), tenu au siège social de l'Agence spatiale canadienne, du 1<sup>er</sup> au 3 décembre 2008

**30 mai 2009**

**Comité directeur du CSEW6\***

*\*Voir l'Annexe 1 pour les noms et les affiliations. Citation requise :*  
Contributions scientifiques et médicales potentielles du Canada à l'exploration de la Lune, de Mars et au-delà, établies à partir des travaux du 6<sup>e</sup> Atelier canadien sur l'exploration spatiale (CSEW6), tenu à Saint-Hubert, Québec, Canada du 1<sup>er</sup> au 3 décembre 2008

## Table des matières

<i>Sommaire</i> .....	3
<i>Introduction</i> .....	5
<b>1 ASTROBIOLOGIE</b> .....	<b>7</b>
<b>2 ATMOSPHÈRE DE MARS</b> .....	<b>13</b>
<b>3 GÉOLOGIE ET GÉOPHYSIQUE PLANÉTAIRE</b> .....	<b>20</b>
<b>4 SCIENCE SOLAIRE-TERRESTRE</b> .....	<b>32</b>
<b>5 ASTRONOMIE SPATIALE</b> .....	<b>40</b>
<b>6 SYSTÈMES DE SURVIE AVANCÉS</b> .....	<b>49</b>
<b>7 MÉDECINE SPATIALE OPÉRATIONNELLE</b> .....	<b>55</b>
<b>8 SCIENCES DE LA VIE DANS L'ESPACE</b> .....	<b>61</b>
<b>9 RAYONNEMENT DANS L'ESPACE</b> .....	<b>67</b>
<b>10 SCIENCES PHYSIQUES DE L'ESPACE</b> .....	<b>72</b>
Annexe I : Comité directeur de l'atelier CSEW6.....	82
Annexe II : Membres des groupes de travail par discipline.....	83
Annexe III – Liste des participants à l'atelier CSEW6 .....	84

## Sommaire

L'humanité s'intéresse au voisinage de la Terre, aux autres planètes et à leurs lunes, mais il faut au préalable développer la science et la technologie nécessaires à l'envoi de missions vers ces corps célestes. Le Canada est particulièrement bien placé pour jouer un rôle de leader dans plusieurs domaines, parce que nous nous sommes déjà attaqués à quelques-uns des problèmes associés à la réalisation d'études dans des « environnements extrêmes ». Au Canada, l'Arctique constitue un milieu extrême où le développement des ressources et des collectivités nécessite des solutions intelligentes aux problèmes, en raison des conditions difficiles, de l'éloignement et des communications restreintes.

Les scientifiques canadiens sont aussi avantagés du fait qu'ils sont déjà familiers avec les sciences et techniques spatiales grâce à un certain nombre de programmes. En septembre 1962, le Canada a lancé le satellite Alouette I, ce qui faisait de notre pays la troisième nation à s'aventurer dans l'espace après la Russie et les États-Unis. Plus récemment, nous avons participé à d'importantes missions robotiques et habitées à bord de l'ISS. La science et l'industrie canadienne sont bien placées pour apporter une contribution importante aux efforts de l'humanité visant à explorer l'espace au-delà de la Terre.

En décembre 2008, un groupe nombreux de scientifiques canadiens s'est réuni avec des représentants de l'industrie et du gouvernement pour examiner les activités scientifiques canadiennes potentielles au-delà du voisinage immédiat de la Terre. D'après les discussions tenues lors de cette réunion – le 6<sup>e</sup> Atelier canadien sur l'exploration spatiale (CSEW6) – et les nombreuses discussions qui ont suivi, un certain nombre d'orientations très prometteuses ont été définies dans les disciplines suivantes :

- astrobiologie;
- systèmes de survie avancés;
- étude de l'atmosphère de Mars;
- médecine spatiale opérationnelle;
- géologie et géophysique planétaire;
- effets des rayonnements sur l'homme;
- science solaire-terrestre;
- astronomie spatiale;
- sciences de la vie dans l'espace;
- sciences physiques dans l'espace.

Certains de ces domaines de recherche, notamment la médecine spatiale opérationnelle, s'intéressent à la santé des astronautes. D'autres, comme l'astronomie spatiale, tirent profit des possibilités offertes par l'espace. D'autres enfin, comme l'étude de l'atmosphère de Mars, sont mus par l'insatiable curiosité humaine et visent à mieux comprendre les lunes et les planètes du système solaire.

Pour chaque domaine de recherche, plusieurs objectifs ont été définis et pour chacun d'entre eux, un certain nombre de recherches sont proposées. Dans tous les cas, il existe déjà un noyau de Canadiens qui contribuent ou sont à même de contribuer aux efforts internationaux. Dans de nombreux cas, ces Canadiens ont déjà fait des contributions importantes et les retombées de leurs travaux se font sentir dans la société canadienne au-delà des activités liées au seul secteur spatial. Ces activités couvrent un large éventail, allant des études sur les effets des rayonnements ionisants sur l'homme à la recherche de planètes extraterrestres, de l'étude des roches lunaires à celle du plasma raréfié qui entoure les planètes, de la production alimentaire

dans l'espace à la météo sur Mars, et de la recherche de la vie dans l'univers à la préservation de la vie des astronautes.

Parfois, les activités spatiales sont intimement liées aux efforts dont les retombées profitent à l'ensemble des Canadiens, p. ex., la télémédecine (y compris les applications robotiques) si importante pour la santé des populations du Nord. Parfois, les missions spatiales constituent l'activité principale; mentionnons entre autres le très grand succès du module météorologique (MET) de l'atterrisseur Phoenix sur Mars. Dans tous les cas, il s'agit d'activités à la fine pointe mondiale ou ayant le potentiel de le devenir.

Les activités spatiales sont très coûteuses et nécessitent donc une préparation poussée afin de maximiser les avantages de la science et les avancées technologiques réalisables avec chaque mission. Les « études analogues » sont des activités qui peuvent être effectuées avant une mission afin d'atténuer les risques. Ces activités analogues peuvent être réalisées en laboratoire, ou bien sur Terre dans des endroits où les conditions ressemblent à celles que l'on trouve sur d'autres planètes. Certains de ces « sites analogues » se trouvent dans l'Arctique canadien et les chercheurs étrangers voudraient accéder à ces sites de recherche. Ces activités analogues nous préparent aux futures missions robotiques, comme les missions d'automobiles vers la Lune et Mars, ou pour l'exploration humaine du système planétaire. Au-delà, les missions spatiales en orbite autour de la Terre, comme la mission canadienne SCISAT, constituent en quelque sorte des répétitions générales en vue des missions planétaires.

Ces consultations entre les parties intéressées canadiennes, qui ont abouti à l'atelier CSEW6, ont clairement établi qu'il existe plusieurs domaines où le Canada peut apporter une contribution unique aux activités internationales d'exploration spatiale, comme il est indiqué dans la Stratégie mondiale d'exploration dont le Canada est un co-auteur, et ce, d'une manière conforme aux objectifs de la Stratégie canadienne des sciences et de la technologie. En outre, ces activités de consultation ont rassemblé une communauté enthousiaste et distinguée, dont les membres ont à cœur l'atteinte de ces objectifs.

La participation du Canada aux missions d'exploration spatiale au-delà de l'orbite terrestre offre les principaux avantages suivants :

- L'acquisition de connaissances scientifiques : la connaissance est la base de l'innovation et du progrès.
- L'élaboration accélérée des technologies de pointe qui permettra non seulement de réaliser ces missions, mais offrira également des retombées pour l'économie en général : l'innovation est la clé de la réussite économique.
- L'accroissement de l'intérêt pour la science et la technologie chez les jeunes du primaire à l'université et au-delà.

Aucune nation ne peut à elle seule se lancer dans l'exploration de l'espace au-delà de l'orbite terrestre. En mettant en évidence le potentiel de la contribution canadienne aux activités mondiales d'exploration, les auteurs du présent rapport espèrent encourager la mise en œuvre d'un programme à long terme qui permettra la réalisation des objectifs qui y sont énoncés.

## Introduction

La signature du document « La Stratégie mondiale d'exploration » ([http://www.asc-csa.gc.ca/pdf/global\\_exploration\\_f.pdf](http://www.asc-csa.gc.ca/pdf/global_exploration_f.pdf)) en mai 2007 par quatorze agences spatiales, dont l'Agence spatiale canadienne, marque le début d'une ère nouvelle de coopération mondiale dans l'exploration spatiale. Sa vision est d'explorer diverses destinations du système solaire (la Lune, Mars, les astéroïdes, et dans un très lointain futur, les lunes des planètes extérieures), où un jour des humains vivront et travailleront. La Stratégie mondiale d'exploration exprime un consensus de haut niveau au sujet de la façon dont l'accès des civils à l'espace peut faire progresser les intérêts nationaux. Dans ce cadre de collaboration, les pays continueront de faire progresser leurs intérêts nationaux, mais on y exprime l'intention des membres de partager des informations, de réduire au minimum le chevauchement des missions et de collaborer lorsque cela est à l'avantage des intérêts communs. Il reconnaît qu'aucune nation ne peut entreprendre seule les prochaines étapes de l'exploration spatiale.

L'exploration humaine commencera avec la Station spatiale internationale en orbite terrestre basse, puis la Lune, Mars et les astéroïdes, et dans un lointain futur, nous pourrions même atteindre certaines lunes froides (mais riches en eau) autour des planètes extérieures. Certes, ce sera un long voyage, mais nous n'avons pas à attendre qu'il soit pleinement réalisé pour en tirer des bénéfices. Les renseignements que nous espérons tirer de l'exploration et de ces objectifs, et aussi des préparatifs pour les vols spatiaux de longue durée, devraient faire progresser nos connaissances fondamentales sur nous-mêmes, notre monde, notre système solaire et l'univers au-delà.

Ce document décrit les contributions scientifiques potentielles du Canada à la Stratégie mondiale d'exploration. Il est organisé en dix chapitres et débute par les disciplines s'intéressant surtout à la compréhension des planètes (l'astrobiologie, l'atmosphère de Mars, la géologie et la géophysique planétaires, la physique solaire-terrestre), y compris l'astronomie spatiale, qui utilisera la Lune comme plate-forme. Il se termine avec les disciplines scientifiques et médicales qui permettront l'exploration future de l'espace par l'homme (les systèmes de survie avancés, la médecine spatiale opérationnelle, les sciences de la vie dans l'espace, le rayonnement, les sciences physiques dans l'espace).

Chaque chapitre a une structure similaire : présentation du thème, résumé des objectifs, description détaillée de chaque objectif, présentation de quelques axes de recherche.

Pour décrire les objectifs et les recherches, nous utilisons les abréviations suivantes :

AB = astrobiologie  
ALS = systèmes de survie avancés  
AT = sciences de l'atmosphère  
OSM = médecine spatiale opérationnelle  
PG = géologie et géophysique planétaire  
RAD = rayonnement  
SA = astronomie spatiale  
SLS = sciences de la vie dans l'espace  
SPS = sciences physiques dans l'espace  
ST = science solaire-terrestre

Les références sont indiquées comme suit : discipline-(planète)-recherches, les objectifs étant désignés par

L = Lune,  
M = Mars,

S = petits corps célestes (lunes des planètes extérieures et astéroïdes)

Nous ne tentons pas de prioriser une discipline par rapport à un autre, car la compréhension scientifique de la vie, de l'atmosphère et de la géologie est liée, et l'exploration par l'humain requiert des progrès dans tous les domaines. Dans chaque discipline, les objectifs décrivent les étapes à long terme, tandis que les recherches décrivent les stratégies pour les réaliser. Pour certaines disciplines, nous décrivons une feuille de route qui constitue un cheminement logique reliant plusieurs objectifs et recherches prioritaires avec des technologies et des concepts de mission. Pour d'autres thèmes, la définition des technologies et des concepts de mission qui répondent aux objectifs a été laissée aux futurs lecteurs, afin des les inspirer et de susciter l'innovation.

Les thèmes transversaux n'ont pas encore été pleinement définis, mais nous présentons deux exemples qui offrent des possibilités de recherches synergétiques à long terme :

Le **milieu eau-glace** est un domaine où le Nord canadien offre un laboratoire naturel et dans lequel les Canadiens ont beaucoup d'expertise. Ce thème figure dans de nombreux objectifs et recherches : l'histoire du système solaire (PG-L-3,PG-S-2) , l'environnement habitable pour la vie (AB-3,-5, PG-M-1), les traceurs climatiques (AT-M-1 ,2), les caractéristiques terrestres (PG-M-1;PGS-2); les ressources in situ (PG-L-3, PG-M-1); la cartographie (AT-M-1, AT-M-2.5, PG-L-3.1,3.2, PG-M-1.1,1.2, PG-S-2.1); le forage (AB-5.4, AT-M-2.5, PG-M-1.4), l'analyse in situ (AB-5, AT-M-1, AT-M-2.5, PG-L-3.3, PG-M-1 .3), la modélisation (AT-M-1 .7, PG-S-2.2), les activités analogues (AB-3.1, AB-5, AT-M-1.8, 2.7, PG-L-3.4, PG-M-1 .4, PG-S-2.3)

**Protéger l'humain contre le rayonnement spatial** est un thème constant dans les diverses disciplines médicales et scientifiques : la météo de l'espace (ST-L-2, ST-M-3), le magnétisme planétaire (PG-L-5, PGM-3, PG-S-1,ST-M-1), les dommages causés par les rayonnements aux structures biologiques (ALS-2.1, OSM-5, SLS-1, SLS-5, RAD-3, SPS-4, SPS-5), les mesures médicales (SLS-1 .3, RAD-3), le blindage contre les rayonnements (ST-L3.3,ST-L-3.3,ST-M-3.1, RAD-2, SPS-10), la cartographie (PG-L-5.1, PG-M-3.4, 3.5), le retour des échantillons (PG-L-5.1), la modélisation/prévision (ST-L-3.1,ST-M-3.1, RAD-2), l'analyse in situ (PG-L-5.2, ALS-2.1, OSM-5, SLS-5, RAD-1), les activités analogues et au sol (SLS1.1,SLS-1.2, RAD-2, RAD-3, SPS-10)

Après l'atelier, les groupes de travail disciplinaires se sont mis à la tâche pour transformer les résultats des délibérations en contenu pour le présent document. Les annexes fournissent les coordonnées et les affiliations de toutes les personnes qui ont contribué à l'atelier.

Annexe I : Comité directeur de l'Atelier CSEW6

Annexe II : Membres des groupes de travail disciplinaires

Annexe III : Liste des participants à l'Atelier CSEW6

# 1 ASTROBIOLOGIE

L'objectif principal de l'astrobiologie est la recherche de preuves de vie au-delà de la Terre. C'est un domaine multidisciplinaire qui requiert l'apport des biologistes, des géoscientifiques, des planétologues, des astronomes et des ingénieurs. Il encourage les synergies entre les différentes sciences et technologies, en enrichissant tous les domaines concernés et en contribuant au développement de la base scientifique et technique du Canada et à son bien-être économique futur.

L'astrobiologie suscite également un intérêt immense dans le public, en grande partie parce qu'elle tente de répondre à certaines des questions les plus fondamentales de l'existence humaine : qui sommes-nous, d'où venons-nous, sommes-nous seuls? Pour la première fois dans l'histoire, nous disposons de la technologie pour pouvoir étudier scientifiquement ces questions.

Il y a trois grands courants de recherche en astrobiologie qui peuvent exploiter les compétences et les capacités actuelles des chercheurs canadiens en astrobiologie :

- déterminer les limites de la vie, y compris la plage de conditions physiques et chimiques dans lesquelles la vie peut se produire et persister;
- déterminer l'origine de la vie sur Terre et obtenir suffisamment de connaissances pour en extrapoler l'origine sur d'autres planètes;
- déterminer l'existence d'une vie extraterrestre dans l'espace, qu'elle soit éteinte ou existante.

Les deux premières questions sont essentielles pour aborder la troisième; les connaissances sur les origines et les limites de la vie peuvent aider les scientifiques à sélectionner des sites extraterrestres qui offrent les cibles les plus prometteuses pour la recherche.

La communauté canadienne de l'astrobiologie désire fermement élargir la contribution du Canada dans le cadre d'un effort mondial visant à faire progresser les connaissances scientifiques sur la vie extraterrestre. La participation aux missions spatiales est une priorité; Mars est d'un intérêt primordial, mais non à l'exclusion des autres objectifs importants que sont la Lune et Europe, Encelade et Titan, les lunes de Jupiter et de Saturne. Il est également essentiel de mener des études analogues sur des sites terrestres qui simulent des aspects importants des environnements extraterrestres.

Le Canada devrait poursuivre un programme diversifié et dynamique de R et D en astrobiologie qui comprend la conception d'instruments scientifiques prêts pour les missions de recherche en astrobiologie sur les sols et les sous-sols planétaires, et l'essai de ces technologies dans des sites analogues. Le Canada aura ainsi l'occasion de tirer profit de son expertise actuelle en robotique.

## RÉSUMÉ DES OBJECTIFS

AB-1 – Détecter la présence d'environnements potentiellement habitables sur d'autres planètes, y compris des exoplanètes (planètes en dehors de notre système solaire).

AB-2 – Tirer profit de l'expérience du Canada dans le développement d'instruments de vol, en élaborant des instruments pour les recherches en astrobiologie.

AB-3 – Exploiter les sites canadiens pour diverses études analogues des environnements planétaires, à la fois passés et actuels, afin de découvrir et d'étudier les organismes qui vivent dans des environnements extrêmes et d'établir les limites de leur survie et de leur croissance.

AB-4 – Exploiter les sites canadiens pour diverses études analogues des environnements planétaires afin de comprendre la formation et la préservation des biosignatures et de mettre au point des instruments de détection de la vie, prêts pour les missions spatiales.

AB-5 – Rechercher des preuves directes de vie existante ou éteinte par l'intermédiaire des biosignatures en développant des méthodologies et des instruments de recherche pour l'environnement planétaire, et valider leurs performances opérationnelles, en pratique, dans les sites analogues au Canada.

AB-6 – Analyser les échantillons prélevés par les missions planétaires avec retour afin de déterminer la présence de forme de vie ancienne ou existante.

AB-7 – Faire progresser les politiques de protection planétaire et leur mise en œuvre.

AB-8 – Soutenir l'appui intellectuel à l'astrobiologie au Canada, de concert avec les autres domaines de l'astrobiologie (p. ex., détection à distance de la vie sur d'autres planètes).

## **OBJECTIFS ET ÉTUDES**

### **Objectif AB-1 : Détecter la présence d'environnements potentiellement habitables sur d'autres planètes, y compris des exoplanètes (planètes en dehors de notre système solaire).**

Depuis plusieurs décennies, les sondes spatiales ont exploré le système solaire et ont produit une abondance de données sur les planètes et les lunes de notre système solaire. Grâce aux télescopes de pointe, les scientifiques ont également découvert quelque 300 systèmes planétaires au-delà de notre système solaire. La plupart des planètes trouvées à ce jour sont beaucoup plus massives que la Terre; en fait, elles ressemblent à Jupiter ou Neptune et n'ont pas de surfaces rocheuses.

Cependant, les scientifiques ont également trouvé plusieurs planètes dont la masse est seulement de quelques fois celle de la Terre, dont une ayant une masse environ deux fois celle de la Terre et qui pourrait avoir une surface rocheuse. Avec l'avènement de télescopes encore plus puissants, on s'attend à détecter davantage de petites planètes ressemblant à la Terre.

Les données obtenues par ces découvertes aident les astrobiologistes à évaluer le potentiel des sites extraterrestres qui pourraient abriter une forme de vie et à concevoir les futures missions de recherche de la vie.

#### **Études :**

1. Élaborer des théories, des modèles et des méthodes pour quantifier la capacité d'un environnement planétaire de faire évoluer la vie et de la préserver (habitabilité).
2. Déterminer l'habitabilité de l'environnement sur Mars et d'autres corps planétaires par l'analyse des données astronomiques et planétaires.

### **Objectif AB-2 : Tirer profit de l'expérience du Canada dans le développement d'instruments de vol, en élaborant des instruments pour les recherches en astrobiologie.**

#### **Études :**

1. S'appuyer sur notre compréhension des biosignatures afin de sélectionner les stratégies de mesure et de développer des instruments.
2. Concevoir et tester des instruments miniaturisés pour l'analyse in situ.



3. Concevoir et tester des instruments pour déterminer le contexte géologique des échantillons et des mesures, y compris la teneur en produits chimiques et en minéraux des matériaux et les processus géologiques qui les ont mis en place.

**Objectif AB-3 : Exploiter les sites canadiens pour diverses études analogues des environnements planétaires, à la fois passés et actuels, pour découvrir et étudier les organismes qui vivent dans des environnements extrêmes, et déterminer les limites de leur survie et de leur croissance.**

Au Canada, il existe un certain nombre de sites, appelés environnements analogues, permettant de simuler les conditions qui prévalent sur d'autres planètes. L'Arctique, par exemple, peut « représenter » les surfaces froides de Mars. Les bouches hydrothermales au large de la côte de la Colombie-Britannique offrent la possibilité d'étudier les organismes qui peuvent survivre dans un environnement très chaud et chimiquement toxique. En étudiant les organismes qui vivent dans ces environnements difficiles sur Terre, les scientifiques seront mieux en mesure de comprendre comment les organismes pourraient survivre à des conditions extrêmes sur d'autres planètes.

**Études :**

1. Déterminer les plus faibles températures de survie des organismes vivants sur Terre.
2. Déterminer les limites de la survie et de la croissance aux débuts de la Terre, et déterminer les conditions chimiques et atmosphériques dans lesquelles la vie a pris naissance sur la Terre, afin d'améliorer les stratégies de recherche de la vie ailleurs.

**Objectif AB-4 : Exploiter les sites canadiens pour diverses études analogues des environnements planétaires afin de comprendre la formation et la préservation des biosignatures et de mettre au point des instruments de détection de la vie, prêts pour les missions spatiales.**

Les biosignatures désignent les caractéristiques des traces physiques, chimiques, minérales ou isotopiques dans les roches et qui témoignent de l'existence passée ou actuelle d'organismes. Par la détection et l'analyse de ces traces, on peut déterminer certaines propriétés de cette activité biologique. Beaucoup d'organismes biologiques que l'on pourrait s'attendre à voir prospérer dans des environnements extraterrestres pourraient ressembler à ceux qui prospèrent dans des environnements terrestres extrêmes tels l'Arctique canadien.

**Études :** Des cadres géologiques et des environnements différents peuvent fournir des informations sur les différents biosignatures. Une approche globale pour l'étude de la formation (dans les systèmes modernes) et de la préservation (dans les anciens systèmes) des biosignatures devrait aborder les points suivants :

1. Les signatures macromoléculaires pertinentes pour les micro-organismes, comme les résidus biologiques des parois des cellules de cyanobactéries (hopanoïdes).
2. Les signatures minéralogiques comme les microfossiles, les biominéraux et les structures biosédimentaires.
3. Les signatures isotopiques : par exemple, les rapports isotopiques du carbone peuvent, dans certains cas, témoigner d'une activité biologique.
4. La conception d'échantillons de référence normalisés et pertinents pour une planète cible, et qui peuvent être utilisés pour tester et comparer des méthodes et des techniques instrumentales d'analyse des biosignatures.

**Objectif AB-5 : Rechercher des preuves directes de vie existante ou éteinte par l'intermédiaire des biosignatures en mettant au point des méthodologies et des instruments de recherche pour l'environnement planétaire, et valider leurs performances opérationnelles en contexte opérationnel dans les sites analogues au Canada.**

Il est nécessaire de développer des méthodologies et des instruments pour détecter les biosignatures dans les environnements planétaires. Il existe de nombreux types de biosignatures, mais chacune requiert un mode de détection qui détermine le type d'instruments qui doit être développé; p. ex., la spectroscopie Raman pour les hopanoïdes ou la spectroscopie d'absorption par laser à diode accordé pour la mesure des rapports isotopiques du carbone.

**Études :**

1. Détecter des cellules sur Mars comme critères certains de détection de la vie.
2. Quantifier et rechercher des biosignatures atmosphériques sur la Terre, Mars et les exoplanètes.
3. Déterminer la source du méthane récemment détecté sur Mars.
4. Accéder aux milieux du sous-sol martien à la recherche de biosignatures enfouies, car de tels dépôts sont protégés de l'exposition aux dommages à la surface.
5. Utiliser la Lune comme contrôle négatif – c.-à-d. un endroit où nous savons qu'il n'y a pas de vie présente.
6. Considérer l'existence possible de formes de vie non terrestres. Les organismes vivants terrestres sont à base d'ADN, d'ARN et de protéines, mais est-ce la seule façon dont la vie peut s'organiser?

**Objectif AB-6 : Analyser les échantillons prélevés par les missions planétaires de retour d'échantillons afin de déterminer la présence de forme de vie ancienne ou existante.**

La communauté spatiale internationale prévoit envoyer des sondes sur Mars, qui pourront y prélever des échantillons de sol et de roche et revenir vers la Terre. Les chercheurs canadiens en astrobiologie au Canada devraient être prêts à contribuer à ces missions et à participer à l'analyse de ces échantillons pour y déceler des signes de vie.

**Études :**

1. Analyser les échantillons biologiques à l'aide des méthodes de laboratoire disponibles au Canada.
2. Concevoir des installations d'isolement au Canada pour la télémanipulation robotique des échantillons biologiques potentiels ramenés par les missions de retour d'échantillons.
3. Mettre en place et tester des installations de pointe au sol pour l'imagerie et l'analyse en laboratoire afin d'étudier à fond les échantillons ramenés par ces missions.

**Objectif AB-7 : Faire progresser les politiques de protection planétaire et leur mise en œuvre.**

Avant même de trouver toute vie extraterrestre, il est nécessaire de mettre en place des politiques pour protéger à la fois les sites terrestre et extraterrestres contre toute contamination biologique. Lorsque nous envoyons des engins spatiaux vers d'autres planètes, il est important de veiller à ce que des organismes terrestres ne s'y trouvent pas embarqués. Ce type de contamination « aval » pourrait compromettre les recherches futures pour la vie extraterrestre et, si cette vie existe, avoir des répercussions négatives sur celle-ci. Dans le même ordre d'idée, il est important de protéger la Terre et ses formes de vie contre toute contamination « amont » par

des organismes extraterrestres pouvant se trouver dans les échantillons ramenés d'autres planètes.

**Études :**

1. Élaborer et tester des protocoles pour limiter la contamination biologique aux sites extraterrestres afin de préserver les environnements habitables en vue des futures expériences de détection de la vie.
2. Élaborer et tester des protocoles de manipulation et d'étude des échantillons ramenés sur Terre pour veiller à ce que les organismes extraterrestres ne puissent créer un risque biologique sur Terre.

**Objectif AB-8 : Soutenir l'appui intellectuel à l'astrobiologie au Canada, de concert avec les autres domaines de l'astrobiologie (p. ex., détection à distance de la vie sur d'autres planètes).**

**FEUILLE DE ROUTE**

En vue d'atteindre les objectifs susmentionnés, le Canada devrait élaborer une stratégie à trois volets pour explorer les origines de la vie dans le système solaire et au-delà. Les principaux éléments de cette stratégie sont les suivants :

- un engagement envers l'étude des environnements terrestres analogues;
- l'exploration robotique de Mars et, plus tard, la participation à des missions vers les lunes glacées du système solaire;
- la recherche astronomique visant à découvrir des super-Terres (planètes dont la masse est de plusieurs à dix fois celle de la Terre).

L'exploration de Mars pour y déceler des signes de vie est un élément clé de l'astrobiologie. Les futures missions robotiques pourraient étudier des aspects de l'environnement martien qui sont importants pour la vie – p. ex., les régions où il y a des preuves de glace d'eau, de production de méthane, etc. L'industrie et les chercheurs canadiens ont d'importants atouts dans ce domaine et il est essentiel pour eux de participer aux grands programmes internationaux d'exploration au cours de la décennie à venir si nous voulons avoir un impact majeur dans ce domaine.

Pour promouvoir sa participation à ces missions, le Canada devrait mettre au point des suites d'instruments astrobiologiques prêts pour les vols spatiaux, des systèmes robotiques intelligents d'astrobiologie sur le terrain, et des systèmes robotisés d'acquisition et de traitement des échantillons. Ces instruments devraient être déployés et mis à l'essai dans des sites analogues au Canada où on peut « simuler » des milieux extraterrestres, et les échantillons prélevés dans ces sites devraient faire l'objet d'une analyse rigoureuse par télémanipulation en laboratoire au Canada. Cela permettrait de vérifier la capacité des laboratoires canadiens d'analyser les échantillons ramenés des sites extraterrestres.

Un effort important est nécessaire pour mieux comprendre la formation et la préservation des différentes biosignatures dans les environnements représentatifs de Mars. Nous devons également mettre au point des stratégies et des instruments de recherche, de détection et de quantification de ces biosignatures. Cela nécessitera un important effort de collaboration au sein de la communauté des chercheurs en astrobiologie. Par exemple, une question majeure est de savoir si le méthane détecté sur Mars est d'origine biologique et, si oui, s'il est d'origine ancienne ou contemporaine.

Le troisième axe majeur pour l'astrobiologie se trouve du côté de l'astronomie. La découverte des super-Terres (planètes ayant de plusieurs à dix fois la masse de la Terre) autour d'étoiles de faible masse a montré que les planètes rocheuses semblables à la Terre existent. L'ASC a investi dans la recherche des exoplanètes par son soutien au petit satellite MOST. Elle a

également fortement soutenu la communauté astronomique canadienne par sa participation au télescope spatial James Webb (JWST).

Les observatoires spatiaux ont fait et continueront de faire d'énormes contributions à la recherche des exoplanètes et à la caractérisation des planètes rocheuses qui sont propices à la vie. La compréhension des biosignatures qui pourraient être décelées dans les atmosphères planétaires est un domaine important d'interaction entre les astronomes et les microbiologistes intéressés à l'astrobiologie.

Le lancement du satellite Kepler en Mars 2009 a aussi d'énormes conséquences pour ce domaine. Kepler balayera quelque 100 000 étoiles afin de détecter des planètes semblables à la Terre qui orbitent autour d'une étoile centrale, dans leurs zones d'habitabilité. Là encore, la communauté canadienne en astrobiologie a beaucoup à apporter si elle peut s'engager dans un programme d'astrobiologie faisant le pont entre les domaines de la microbiologie, de l'exploration et de l'astronomie.

La communauté canadienne devrait aussi envisager sérieusement de participer aux projets futurs, dont le Terrestrial Planet Finder, un concept de mission actuellement à l'étude par la NASA et qui pourrait être élaboré au cours de la prochaine décennie.

Les astronomes canadiens continueront de participer aux études des systèmes planétaires extrasolaires, y compris la recherche de planètes terrestres. Cette communauté est potentiellement très intéressée par l'astrobiologie.

En résumé, l'échelle de temps pour atteindre les objectifs des chercheurs canadiens en astrobiologie comprend :

**Les objectifs à court terme :**

- Déterminer les instruments d'astrobiologie requis pour les mesures robotique in situ dans les missions d'exploration planétaire.
- Tester ces dispositifs sur Terre dans des environnements analogues à Mars
- Étudier la question de la contamination aval.

**Les objectifs à moyen terme :**

- Mettre au point des technologies pour identifier, acquérir et analyser des échantillons prélevés sur Mars, qui assureront la sélection et le retour d'échantillons à valeur scientifique élevée. On ne peut justifier une approche de collecte « tout-venant », étant donné le coût du retour des échantillons sur la Terre.

**Les objectifs à long terme :**

- Ramener des échantillons prélevés sur Mars en vue de leur analyse détaillée en laboratoire sur Terre.
- Élaborer des techniques efficaces d'échantillonnage et des procédures de protection planétaire aval et amont contre la contamination biologique de la Terre et des autres planètes.
- Développer une expertise dans les opérations scientifiques au sol à distance et le fonctionnement des équipes scientifiques. Renforcer les capacités, y compris l'expertise et le personnel hautement qualifié.

## 2 ATMOSPHÈRE DE MARS

L'atmosphère de Mars revêt toujours une grande importance dans toute mission d'exploration vers cette planète. Il est important d'étudier l'atmosphère, non seulement pour faire avancer la connaissance scientifique du système solaire, mais aussi pour des raisons pratiques : comprendre l'atmosphère martienne est essentiel à l'atterrissage des véhicules à la surface et au maintien d'éventuelles opérations robotiques et humaines.

Pour répondre à certaines des principales questions scientifiques sur Mars – notamment la présence d'eau liquide et la possibilité que la planète puisse ou ait pu soutenir la vie -, il faut en savoir plus sur l'atmosphère, non seulement sur son état actuel, mais aussi sur son évolution au fil du temps.

Les scientifiques cherchent également à comprendre comment la mince atmosphère martienne interagit avec la surface de la planète et crée un climat, ce qui comprend les énormes tempêtes de poussière. Cette connaissance est également importante pour les futures missions vers Mars, y compris une éventuelle colonisation humaine.

Les chercheurs et les entreprises canadiennes participent déjà de façon importante aux études de l'atmosphère martienne. La sonde spatiale Phoenix qui a atterri sur Mars en mai 2008 transportait un module météorologique de construction canadienne, pourvu de capteurs de température et de pression et d'un lidar qui a été le premier appareil du genre à être utilisé avec succès sur une surface planétaire.

Le Canada a une longue histoire de développement d'instruments pour étudier l'atmosphère de la Terre et son expertise scientifique et technologique considérable dans ce domaine peut être mise à profit pour les mesures atmosphériques touchant le cycle hydrologique sur Mars, l'évolution de l'atmosphère martienne et l'interaction entre l'atmosphère et la surface de Mars.

Le Canada peut jouer un rôle de pointe en fournissant plusieurs instruments qui pourraient être déposés sur la surface de Mars et en orbite pour étudier un large éventail de paramètres atmosphériques et météorologiques, y compris la vapeur d'eau et d'autres constituants de l'atmosphère, la poussière et les aérosols (petites particules), les nuages, les précipitations, la température, la pression atmosphérique, les vents et les champs de rayonnement.

Le Canada a déjà une expertise importante dans le développement de plusieurs types d'instruments utilisables dans ces études, y compris les lidars, les spectromètres, les lasers à diode accordés, les instruments météorologiques, l'imagerie Doppler, les systèmes de mesure des particules, les imageurs infrarouges et visibles, et enfin les radiomètres.

### RÉSUMÉ DES OBJECTIFS

AT-M-1 – Étudier les processus atmosphériques qui influent sur le transport de l'eau sur Mars et l'échange de l'eau avec la surface.

AT-M-2 – Étudier l'évolution de l'atmosphère martienne.

AT-M-3 – Étudier les interactions entre l'atmosphère et la surface de Mars.

### OBJECTIFS ET ÉTUDES

**Objectif AT-M-1 : Étudier les processus atmosphériques qui influent sur le transport de l'eau sur Mars et l'échange de l'eau avec la surface.**

Les sources d'eau, son stockage, son transport et son élimination sont des questions essentielles à l'étude de l'habitabilité passée et actuelle de Mars. La recherche sur les formations terrestres de Mars et la chimie des sols démontrent qu'il y a eu de l'eau liquide à la surface de la planète dans le passé. Aujourd'hui, la glace d'eau est abondante dans les calottes polaires, qui renferment une quantité d'eau équivalente à une couche uniforme de 20 mètres de profondeur sur la planète. L'orbiteur Odyssey a fait la découverte majeure d'une vaste quantité de glace sous la surface, ce qui a été récemment confirmé par des fouilles faites en surface au cours de la mission de l'atterrisseur Phoenix.

Il existe un cycle hydrologique sur Mars dans lequel l'atmosphère déplace l'eau entre des réservoirs séparés par de grandes distances. Les mesures faites en orbite ont révélé un cycle saisonnier de la quantité d'eau dans l'atmosphère, avec un maximum au-dessus de la région polaire nord en été. L'étude des processus atmosphériques qui influent sur le transport de l'eau et l'échange avec la surface restera une priorité pour les futures missions d'exploration de Mars.

Le lidar canadien embarqué sur la mission Phoenix a permis de découvrir qu'il y a des précipitations de cristaux de glace d'eau sur la surface de Mars – en d'autres mots, il neige, et selon un cycle quotidien. Au cours de la journée, la vapeur d'eau est transportée vers le haut par turbulence et par convection, et la nuit, l'eau forme des nuages de cristaux de glace qui tombent à la surface. Cette combinaison de processus locaux n'a pu être observée lors des précédentes missions d'orbiteurs et d'atterrisseurs : elle a été découverte uniquement par des observations au sol à l'aide du lidar. Cette découverte modifie notre compréhension actuelle du cycle de l'eau sur Mars et stimule de nouvelles études.

#### Études :

1. Mesurer le profil vertical de la vapeur d'eau atmosphérique, aux sites d'atterrissage et sur toute la planète. Comme l'eau est toujours transportée dans l'atmosphère, le profil de vapeur d'eau est un paramètre initial pour toutes les autres études couvertes par cet objectif.
2. Étudier les processus de transport d'eau autour de Mars, y compris la mesure des variables dynamiques atmosphériques comme les vents. Les mécanismes de transport à grande échelle déplacent la vapeur d'eau entre les pôles sur une base saisonnière.
3. Mesurer l'échange d'eau entre l'atmosphère et le sol. On en connaît très peu sur le transfert entre l'eau incorporée à la surface et l'atmosphère, mais le réservoir de surface pourrait être énorme.
4. Observer les nuages et les précipitations aux sites d'atterrissage et sur toute la planète.
5. Suivre les changements liés au dépôt et à la sublimation de l'eau et du dioxyde de carbone, en particulier aux pôles. Ces processus présentent les changements saisonniers et peuvent également évoluer sur de longues périodes, en fournissant des indices sur l'évolution du climat martien.
6. Mesurer la taille, la forme et la densité des particules de poussières et des cristaux de glace. La mission Phoenix a démontré qu'il est important de tenir compte autant des solides que des gaz.
7. Modéliser le cycle hydrologique de Mars pour interpréter et mettre en contexte les mesures. Il faudra de nombreuses missions pour obtenir les résultats requis.
8. Utiliser les résultats des essais sur Terre et dans des environnements analogues pour mieux interpréter les données, afin de mettre au point des instruments terrestres et orbitaux analogues à ceux qui sont requis pour Mars et pour maintenir un pool d'experts pour les missions futures.
9. Concevoir des instruments pour mesurer les propriétés fines des aérosols (petites particules atmosphériques.)

**Objectif AT-M-2 : Étudier l'évolution de l'atmosphère martienne.**

Mars possède actuellement une fine atmosphère composée principalement de dioxyde de carbone. Selon certaines données, l'atmosphère était plus épaisse dans le passé, mais au fil du temps, elle s'est en grande partie échappée dans l'espace. Il n'y a pas de mesures directes de l'atmosphère passée de Mars, bien entendu; néanmoins, nos connaissances proviennent du déchiffrement des entités à la surface de la planète et de l'étude des caractéristiques des couches de glace des calottes polaires, qui offrent également un aperçu de l'histoire planétaire.

En analogie directe avec la Terre, les scientifiques interprètent les vallées de Valles Marineris comme une preuve que l'eau liquide a existé à la surface de Mars. Certaines caractéristiques de surface suggèrent également qu'il y a pu avoir des écoulements récents d'eau liquide. Si cette interprétation est correcte, l'atmosphère martienne était autrefois assez épaisse pour créer une pression atmosphérique suffisante pour que l'eau liquide ait existé à la surface.

Il existe également des preuves solides de glaciation dans certaines régions de Mars. Cette interprétation a été renforcée par les résultats de la modélisation atmosphérique qui suggèrent que certaines régions peuvent générer des nuages de glace accompagnés de précipitations. La modélisation atmosphérique des impacts de la dérive des pôles – c.-à-d. les changements dans l'orientation de l'axe de rotation de la planète par rapport à son plan orbital – prévoit également une migration à grande échelle de l'eau des pôles actuels vers l'équateur, lorsque l'angle d'inclinaison des pôles par rapport au Soleil augmente. D'autres études dans ce domaine permettront de démontrer comment la distribution de l'eau et la glace a changé au fil du temps, pour produire la situation actuelle.

On peut aussi en apprendre plus sur l'histoire de l'atmosphère de Mars en mesurant les rapports des différents isotopes (qui sont des formes atomiques légèrement différentes d'un même élément) des gaz rares piégés dans les roches prélevées par les atterrisseurs Viking. Différents processus produisent des rapports isotopiques différents. Les rapports isotopiques caractéristiques de Mars ont été découverts dans des météorites sur la Terre, ce qui a mené les scientifiques à conclure que ces météorites provenaient de Mars et ont été produits par une collision entre Mars et un gros objet, ce qui a éjecté des matières solides dans l'espace. Cette collision pourrait également avoir éjecté par la même occasion une partie importante de l'atmosphère de Mars.

L'atmosphère de Mars continue de s'échapper dans l'espace lointain par divers mécanismes, notamment l'évaporation thermique, les processus chimiques et l'interaction avec le vent solaire (flux de particules chargées provenant du Soleil), ce qui peut avoir un effet « abrasif » sur la haute atmosphère.

**Études :**

1. Mesurer les variables dynamiques comme la température, la pression et les vents afin d'établir les régimes de circulation à grande échelle et les voies de transport dans l'atmosphère. Ces données peuvent être utilisées pour construire une image précise de l'atmosphère afin de valider les modèles informatiques.
2. Mesurer les profils des constituants chimiques de l'atmosphère actuelle, notamment le dioxyde de carbone, le monoxyde de carbone, l'oxygène, l'ozone et de nombreuses autres substances. On pourra ainsi déterminer l'état actuel de l'évolution de l'atmosphère martienne; les rapports isotopiques peuvent indiquer la source et l'histoire des composants.
3. Mesurer la composition des couches supérieures de l'atmosphère. Ces mesures sont importantes pour la compréhension des processus en cause dans la fuite de l'atmosphère de Mars vers l'espace.

4. Mesurer l'interaction de l'atmosphère avec la surface et la quantité de matériau échangée entre les deux. Pour comprendre les conditions à la limite entre l'atmosphère et la surface de Mars, il faudra également prendre des mesures géologiques et in situ à l'aide d'atterrisseurs.
5. Cartographier l'emplacement et le volume des calottes polaires et les changements qui s'y produisent. Les atterrisseurs capables de forer sous la surface pourraient recueillir des données en profondeur, y compris les rapports isotopiques, qui permettraient de dater la composition des calottes.
6. Modéliser l'évolution de l'atmosphère martienne jusqu'à son état actuel. Les modèles peuvent fournir une image de l'atmosphère en établissant des liens entre les séries de mesures. Ces modèles devraient inclure le régolithe (roches de surface) ainsi que l'interface entre l'atmosphère et l'espace.
7. Utiliser les résultats des essais sur Terre et dans des environnements analogues pour mieux interpréter les données, afin de mettre au point des instruments terrestres et orbitaux analogues à ceux qui sont requis pour Mars et pour maintenir un pool d'experts pour les missions futures.

**Objectif AT-M-3 : Étudier les interactions entre l'atmosphère et la surface de Mars.**

La surface joue un rôle crucial dans le bilan énergétique de la planète. Elle absorbe une partie du rayonnement solaire incident à la surface et émet de la chaleur. La surface est l'interface par laquelle la chaleur et l'eau sont échangées avec l'atmosphère. C'est aussi une source et un puits de poussière qui joue un rôle important dans la météorologie et la climatologie de Mars.

La vapeur d'eau et, dans les régions polaires, le dioxyde de carbone se condensent à la surface et se subliment depuis celle-ci. C'est un processus qui influe grandement sur les cycles annuels de pression atmosphérique et de teneur en eau sur Mars. Comme sur Terre, la couche limite de l'atmosphère (la plus basse est généralement comprise entre 1 et 6 kilomètres au-dessus de la surface de Mars) joue un rôle crucial dans l'interaction entre le système global que constituent la surface et l'atmosphère.

Au cours de la mission Phoenix, le module météorologique canadien embarqué sur l'atterrisseur a joué un rôle clé dans l'étude des interactions entre l'atmosphère et la surface. Le lidar, le premier appareil du genre à être utilisé à la surface d'un corps extraterrestre, a fourni des informations uniques sur le rôle des nuages et des précipitations dans le cycle de l'eau au site d'atterrissage de Phoenix, au nord du cercle arctique martien. Du brouillard glacé a également été observé et le profil de poussière a fourni de nouvelles informations sur la profondeur de la couche limite atmosphérique.

Outre le lidar, le module météorologique de Phoenix était plutôt rudimentaire (trois capteurs de température et un capteur de pression), mais certaines données sur le vent ont été obtenues. La sonde de conductivité thermique et électrique, conçue principalement pour mesurer l'humidité du sol, a été utilisée pour mesurer la pression de vapeur d'eau atmosphérique, une information cruciale.

Malgré les succès obtenus à ce jour, la recherche sur l'interaction entre l'atmosphère et la surface de Mars en est encore à ses balbutiements. À l'heure actuelle, il existe de sérieuses limitations associées aux missions d'atterrissage sur Mars, comme les sites d'atterrissage et la durée des mesures; les missions futures plus sophistiquées devraient permettre des études plus exhaustives des caractéristiques de la surface. Mars possède des types de surface très divers : à mesure que les caractéristiques propres des différentes régions (comme les calottes polaires) sont répertoriées, il est important de traiter séparément chaque région et d'échantillonner autant d'endroits que possible pour affiner la compréhension scientifique des interactions surface-atmosphère.



## Études :

1. Effectuer des mesures in situ des paramètres météorologiques près de la surface, comme la température, la pression, la concentration de vapeur d'eau, ainsi que la vitesse et la direction du vent. Toute mission d'atterrissage sur Mars devrait comporter une station météorologique. Il est important d'effectuer des mesures en continu pendant un sol complet (un sol est un jour martien) pour au moins une région de Mars, même dans les régions polaires. Les mesures in situ de la turbulence et du vent sont les plus difficiles à effectuer sur Mars, mais elles sont indispensables à la compréhension de l'atmosphère locale. Des mesures directes du bilan énergétique (intrants et extrants) s'imposent également.
2. Effectuer des observations globales des nuages et des précipitations. L'obtention d'images des nuages et la détermination de la température au sommet des nuages fournissent des informations sur la « météo » martienne. L'information sur l'évaporation et la condensation des matières dans les régions polaires pourrait être obtenue depuis des altimètres orbitaux en mesurant les changements subtils dans l'élévation de la surface des régions polaires, ainsi que les concentrations de poussière et de nuages. Il serait même possible d'obtenir des données sur les éruptions de gaz et de particules par les geysers.
3. Obtenir des mesures locales des nuages et des précipitations. Les données obtenues par l'atterrisseur Phoenix ont montré que des événements locaux, comme les précipitations et les effets des couches limites, peuvent influencer sur les interactions entre l'atmosphère et la surface.
4. Faire de la modélisation à l'échelle locale, distincte de la modélisation à plus grande échelle dans laquelle elle s'inscrit. Cela peut démontrer comment les mesures prises en un même endroit peuvent être liées à l'ensemble de la planète.
5. Utiliser les résultats des essais sur Terre et dans des environnements analogues pour mieux interpréter les données, afin de mettre au point des instruments terrestres et orbitaux analogues à ceux qui sont requis pour Mars et pour maintenir un pool d'experts pour les missions futures.

## FEUILLE DE ROUTE

L'exploration de l'atmosphère martienne convient particulièrement bien à l'expertise scientifique et industrielle du Canada, car les Canadiens observent depuis longtemps l'atmosphère de la Terre depuis l'espace et savent travailler dans un environnement froid et hostile comme l'Arctique canadien. L'expertise canadienne pourrait être développée dans plusieurs domaines spécialisés et être à la pointe des efforts mondiaux.

Le succès de la mission Phoenix ouvre la voie à des mesures météorologiques plus complètes dans le cadre des missions avec atterrisseurs. Le Canada devrait chercher à fournir un module météorologique pour chaque atterrisseur afin de créer un réseau de stations à la surface de Mars. Il faudrait pouvoir déployer ces modules loin des atterrisseurs, parce que ceux-ci modifient grandement l'environnement météorologique autour d'eux. Le capteur de mesure du vent doit être amélioré; même si la sonde Phoenix a été couronnée de succès, elle n'a pas fourni de données de qualité suffisante pour un réseau météorologique. Il est nécessaire que l'unité compacte ne comporte aucune pièce mobile.

Le succès du lidar et de l'altimètre laser MOLA (non canadien) embarqués sur Phoenix ont démontré le potentiel offert par le lidar et les instruments similaires tant en surface qu'en orbite. Le cœur de ces instruments est le laser : l'efficacité électro-optique, la durée de vie, la longueur d'onde et le poids de ces unités sont des paramètres essentiels à la réussite et au rendement

d'un système lidar. Des investissements dans des sous-systèmes laser compacts, durables et à haut rendement devraient ouvrir la voie à des missions plus performantes.

Le Canada a déjà eu du succès dans le déploiement de spectromètres orbitaux pour mesurer la composition et la structure de l'atmosphère de la Terre (par exemple, le satellite SCISAT et l'instrument OSIRIS sur un satellite suédois). Le développement d'instruments similaires pouvant utiliser plusieurs techniques de mesure présenterait un faible risque et serait une très bonne occasion pour le Canada de participer aux missions planétaires orbitales. Le concept « SCISAT vers Mars » offre d'intéressantes perspectives scientifiques avec un instrument connu.

Pour assurer l'entrée sécuritaire des véhicules dans l'atmosphère martienne, ainsi que l'aérofreinage et l'atterrissage, il faut connaître l'état de l'atmosphère au moment de l'entrée. Le Canada a beaucoup d'expérience avec des instruments orbitaux qui permettent de mesurer les vents et les températures dans la moyenne atmosphère. L'instrument WINDII a fait la preuve de cette capacité en orbite terrestre. En construisant un instrument qui peut fournir les informations requises pour le soutien opérationnel pendant l'entrée, le freinage et l'atterrissage sur les surfaces planétaires, le Canada pourrait encourager le développement continu du marché pour cette technologie dans les missions d'exploration.

La transmission des données depuis la surface de Mars et les sondes en orbite est essentielle à la réussite des missions. L'amélioration continue des instruments s'accompagne de la nécessité de transmettre l'information plus rapidement. Toutefois, il existe actuellement de graves limitations technologiques, à la fois dans la capacité de transmission de la sonde spatiale (taux de transfert de données) et dans la capacité de réception (temps disponible par jour pour la réception des données par les stations au sol). Pour résoudre ce problème, il faudra développer de meilleurs systèmes de communication, et accroître le nombre de stations au sol et le temps de réception aux stations terrestres. Le Canada a déjà une expertise dans ce domaine, grâce à sa participation importante aux réseaux de communications par satellites en orbite terrestre.

Les tests et la caractérisation de ces instruments sont très importants. Il n'est pas nécessaire de disposer de vastes sites analogues représentant Mars, mais il faut des sites reproduisant les conditions météorologiques martiennes et des installations pour tester les instruments orbitaux. Le Canada dispose d'un laboratoire déjà utilisable dans le Haut-Arctique et les scientifiques canadiens ont une grande expérience de travail dans cet environnement.

Il est crucial de modéliser à la fois l'atmosphère martienne et les instruments qui permettent de la sonder. Comme le coût d'envoi d'un instrument sur Mars est très élevé, le coût de la modélisation préalable pour assurer le succès d'une mission est un investissement des plus rentables. Le Canada doit également investir dans les techniques de traitement des données qui permettront aux scientifiques d'interpréter de manière fiable les données transmises depuis Mars.

Enfin, les Canadiens doivent pouvoir utiliser des données fournies par les instruments canadiens et étrangers dans les modèles atmosphériques pour mieux comprendre l'atmosphère martienne. Plusieurs modèles conçus en université pourraient être élargis à cette fin.

Il est essentiel de mesurer la poussière et les aérosols, car ils jouent un rôle important dans l'atmosphère martienne. Les instruments actuels fournissent peu d'information sur les aérosols dans l'atmosphère; de nouveaux instruments sont nécessaires pour mesurer la composition et la répartition de la taille de ces particules.

Les études de l'atmosphère martienne ont un intérêt pratique, car elles permettent de mieux planifier l'atterrissage des sondes spatiales à la surface. En outre, ces recherches augmentent notre compréhension des planètes de notre système solaire. Le fait que Mars et la Terre aient toutes deux des atmosphères signifie que les compétences et les connaissances acquises pour l'une peuvent être utiles pour l'autre.

Les études planétaires sont à la fois intellectuellement stimulantes et passionnantes, ce qui peut amener les jeunes à étudier en sciences physiques et en génie et à recevoir la formation rigoureuse exigée dans ces domaines. Cette formation contribue non seulement aux études spécialisées de l'atmosphère martienne, mais profitera aussi à la science et à la société canadienne dans son ensemble, quand ces personnes hautement qualifiées travailleront dans l'industrie, le gouvernement et les universités.

### **3 GÉOLOGIE ET GÉOPHYSIQUE PLANÉTAIRE**

La géologie et la géophysique planétaire (GGP) étudient l'origine, la structure et l'évolution des formations rocheuses et glacées de notre système solaire. Dans le cadre de la Stratégie mondiale d'exploration, ce champ d'étude englobe notre Lune, Mars et ses deux lunes, les astéroïdes, les comètes et les lunes de Jupiter et de Saturne.

La GGP comprend la recherche fondamentale, notamment la compréhension des vitesses et des mécanismes de différenciation planétaire en noyaux, manteaux et croûtes, et les changements dans ces réservoirs causés par le volcanisme, les cratères d'impact et l'érosion du paysage par le vent, les rivières et les glaciers. Ce domaine englobe également les études appliquées, telles que la recherche de glace d'eau et de ressources minérales pour leur extraction et leur transformation en vue de subvenir aux besoins des colonies humaines, et la caractérisation de la poussière planétaire pour la conception adaptée des astromobiles.

Les chercheurs en GGP ont des formations diverses et comprennent entre autres des géologues spécialisés en cartographie sur le terrain et en évaluation des ressources, des géochimistes spécialisés en analyses chimiques et en conception d'instruments, et des géophysiciens experts en modélisation numérique et expérimentale. La plupart étudient la Terre et les autres planètes non seulement pour comprendre les propriétés et les processus des corps extraterrestres qui peuvent avoir des analogues terrestres, mais aussi pour concevoir et tester les instruments qui seront lancés vers d'autres mondes.

Les géologues et les géophysiciens canadiens sont très réputés pour la planification et la réalisation de travaux de terrain dans les zones reculées de la planète, ce qui s'apparente à l'exploration des autres corps planétaires.

La GGP présente des chevauchements importants avec d'autres disciplines, dont l'astrobiologie, les sciences de l'atmosphère, la physique solaire et l'astronomie. De nombreuses recherches en GGP sont interdisciplinaires et s'adaptent bien à l'approche des grandes équipes utilisée pour l'exploration des planètes par l'ensemble des nations intéressées par l'espace.

#### **RÉSUMÉ DES OBJECTIFS**

##### **Lune**

PG-L-1 – Cartographier la distribution et l'âge du substratum lunaire.

PG-L-2 – Caractériser les propriétés physiques, chimiques et minérales des roches de surface, du sol et de la poussière.

PG-L-3 – Déterminer la nature et l'étendue de l'eau et de l'hydrogène aux pôles nord et sud.

PG-L-4 – Estimer les taux, les processus et les effets des cratères d'impact.

PG-L-5 – Améliorer les données géophysiques sur les propriétés et la structure de l'intérieur de la Lune.

##### **Mars**

PG-M-1 – Comprendre l'hydrologie et l'hydrogéologie passées et actuelles de Mars.

PG-M-2 – Caractériser la minéralogie et la géochimie de la croûte martienne.

PG-M-3 – Améliorer les mesures géophysiques de la structure interne de Mars.

## PETITS CORPS ET LUNES DES PLANÈTES EXTÉRIEURES

PG-S-1 – Étudier en détail la géologie, la minéralogie, la chimie, la gravité et le magnétisme des astéroïdes et des comètes.

PG-S-2 – Décrire et modéliser la dynamique de la glace d'eau sur Ganymède, Europe et Encelade.

## LA LUNE

### Objectif PG-L-1 : Cartographier la distribution et l'âge du substratum lunaire.

Une question fondamentale en géologie est de savoir si la croûte externe des planètes s'est formée rapidement au début de leur histoire, ou plus progressivement au fil du temps. La Lune est un témoin des débuts de la formation de la croûte, car elle n'est pas affectée par les interactions des grandes plaques tectoniques qui ont bouleversé la surface de la Terre. La Lune sert donc de référence pour comprendre les mécanismes qui ont pu participer à la formation des croûtes initiales sur toutes les planètes terrestres.

Pendant un certain temps au cours des 100 premiers millions d'années d'existence de la Lune, au moins sa moitié externe était entièrement en fusion. Un minéral légèrement coloré, le feldspath plagioclase, s'est cristallisé à partir de cet océan de magma et a flotté à la surface, pour finir par s'accumuler et former des roches appelées anorthosites. Ces roches de couleur blanche sont préservées aujourd'hui dans le relief lunaire sous forme de massifs, en particulier sur la face cachée de la Lune.

Plus tard, après que la croûte d'anorthosite et le manteau dense sus-jacent se soient solidifiés, et ensuite pendant un milliard d'années, l'intérieur de la Lune a fondu à maintes reprises. Des coulées de lave basaltique ont surgi sur l'ancienne surface, en particulier dans les bassins formés par les impacts de grosses météorites, formant des plaines volcaniques de couleur sombre appelées « mers ». La séquence des couches de lave, empilées l'une sur l'autre, constitue un vestige de la composition et de la minéralogie des domaines du manteau de la Lune qui ont fondu au fil du temps.

Il faut étudier plus à fond l'âge et la composition des massifs précoces et des roches ultérieures des mers pour déterminer la vitesse à laquelle l'océan de magma s'est solidifié, et comment sa composition et celle du manteau ultérieurement solidifié a varié dans le temps et dans l'espace. À cette fin, il faut connaître la répartition du substratum à la surface et échantillonner des endroits clés en vue des analyses, soit à distance sur la Lune, soit au retour des échantillons dans les laboratoires sur Terre. Les roches lunaires que l'on peut étudier actuellement n'ont pas été prélevées directement dans le substratum (échantillons d'Apollo), ou bien elles proviennent de lieux inconnus sur la surface lunaire (météorites lunaires).

### Études :

1. Utiliser des données de télédétection pour la Lune (imagerie multispectrale, radar, gravité, magnétisme), y compris celles de l'ère Apollo et les plus récentes images prises par les sondes spatiales, ainsi que les données radar obtenues depuis la Terre, avec les techniques des systèmes d'information géographique (SIG), afin de cartographier le substratum.
2. Élaborer un système intégré de télédétection par lidar et d'imagerie par spectroscopie sur les atterrisseurs, qui serait installé sur les astromobiles pour caractériser les propriétés minéralogiques et physiques du substratum et définir des cibles d'échantillonnage ou de forage en vue

- d'analyses géochimiques plus poussées ou du retour des échantillons sur Terre.
3. Réaliser des analyses géochimiques et minéralogiques de la Lune, afin d'affiner notre connaissance de la diversité des types de roches lunaires.
  4. Mesure les isotopes de l'uranium et de plomb, formés par la désintégration radioactive en minéraux comme le zircon et la baddeleyite dans les échantillons d'Apollo, les météorites lunaires et les futurs échantillons qui seront ramenés sur Terre pour déterminer les âges absolus du magmatisme lunaire.

**Objectif PG-L-2 : Caractériser les propriétés physiques, chimiques et minérales des roches de surface, du sol et de la poussière.**

Le substratum lunaire est recouvert de roches de surface appelées régolithe, composé de fragments de roches et de minéraux, de sol et de poussière formée par de multiples impacts de météorites. C'est la principale source de matériaux bruts et la plus facilement accessible sur la Lune pour la construction, le soutien de la vie et la production de carburant pour soutenir l'exploration humaine.

Même après les missions Apollo, la profondeur et l'étendue de la stratification de régolithe lunaire restent mal connues. L'ilménite minérale (titane, oxyde de fer) présente un intérêt particulier, et elle est inégalement répartie dans le régolithe. Ce minéral est une source potentielle d'oxygène lorsqu'il est chauffé sous vide. Il pourrait également être utilisé comme semi-conducteur et pour la production de cellules photovoltaïques pour fournir de l'électricité. Il faudra définir les endroits où sa concentration est la plus élevée, en vue de l'établissement de colonies humaines sur la Lune.

La poussière lunaire est la fraction très fine des particules contenues dans le régolithe. Lorsqu'elle est soulevée de la surface, elle adhère facilement aux surfaces par charge électrostatique, ce qui entraîne une multitude d'effets néfastes – tant pour les astronautes que les instruments. Par exemple, au cours des missions Apollo, la poussière a dégradé les joints d'étanchéité sur les combinaisons spatiales et réduit la traction des astromobiles lunaires. Pour atténuer ces effets, les propriétés de la poussière lunaire doivent être mieux comprises.

**Études :**

1. Prendre des images et effectuer des analyses spectroscopiques pour cartographier la répartition des principales ressources lunaires dans le régolithe, comme l'ilménite, à la fois depuis des sondes orbitales et des véhicules en surface.
2. Caractériser les propriétés physiques, chimiques et minéralogiques du régolithe lunaire et de la poussière soulevée, par diverses mesures géophysiques et géochimiques depuis des atterrisseurs ou des astromobiles.
3. Analyser systématiquement les sols prélevés par Apollo et les matériaux terrestres similaires aux sols lunaires en utilisant une gamme de techniques géochimiques de micro-analyse dans les laboratoires terrestres.

**Objectif PG-L-3 : Déterminer la nature et l'étendue de l'eau et de l'hydrogène aux pôles nord et sud.**

L'eau sera essentielle aux colonies humaines sur la Lune. Elle pourrait être synthétisée (avec beaucoup d'effort) à partir de l'hydrogène et de l'oxygène que l'on pense trouver dans le régolithe lunaire, mais elle existe peut-être déjà, « prête à l'emploi », sous forme de glace de sol, et elle serait donc plus facile à récupérer.

La glace de sol, si elle est présente, se trouve probablement dans les zones polaires sud et nord qui sont soustraites aux rayons du Soleil. Ces zones, surtout sur les planchers et le bas des parois intérieures des cratères d'impact, sont tellement froides (sous -230 °C) que l'eau et l'hydrogène amenés sur la Lune par l'impact de comètes et des astéroïdes au cours de sa longue histoire n'ont pas pu s'échapper vers l'espace.

Outre sa valeur cruciale pour la survie, l'eau préservée aux pôles lunaires aurait aussi une immense valeur scientifique. Si l'on pouvait déterminer les âges relatifs des différents gisements de glace de sol, cela fournirait des indications sur les changements dans la composition et l'origine des météorites qui ont heurté la Lune au cours des milliards d'années.

La nature et l'étendue de la glace de sol lunaire sont inconnues. Les missions orbitales Clementine et Lunar Prospector ont trouvé des preuves circonstancielles de glace de sol lunaire au pôle Sud, mais l'imagerie radar obtenue par des télescopes terrestres suggère que les dépôts de glace, s'ils existent, forment seulement des cristaux épars dans le régolithe lunaire. Il sera essentiel de cartographier et de caractériser la géologie des régions où serait préservée la glace de sol, de déterminer la teneur en eau, la chimie et la minéralogie du régolithe, et de comprendre son histoire thermique.

#### Études :

1. Entreprendre la cartographie géologique initiale par télédétection depuis des sondes spatiales.
2. Détecter la glace de sol depuis des astromobiles, par les méthodes de la conductivité électromagnétique et de radar pouvant pénétrer le sol.
3. Effectuer un échantillonnage in situ et des analyses par spectrométrie de masse depuis des astromobiles, pour déterminer l'abondance et la distribution de l'eau et de l'hydrogène.
4. Tester sur des sites terrestres analogues aux sites lunaires des méthodes de détection et de cartographie de la glace de sol.

#### Objectif PG-L-4 : Estimer les taux, les processus et les effets des cratères d'impact.

Des cratères se sont formés sur les surfaces solides de tous les objets planétaires quand ceux-ci ont été heurtés par des fragments de comètes ou des astéroïdes, ce qui a produit de grandes explosions appelées impacts. Les cratères d'impact sont considérés comme le plus important processus de surface sur la Lune, car sa croûte n'a pas été refaçonée par la tectonique des plaques comme sur Terre, ni par l'érosion du paysage par l'eau, la glace et le vent comme sur Terre et Mars.

En comprenant les taux, les processus et les effets des cratères d'impact sur la Lune, où l'information est le plus clairement préservée, les chercheurs peuvent mieux comprendre le phénomène des cratères sur tous les corps planétaires. Cela est important pour diverses raisons. Sur la Lune, Mars, Vénus, Mercure et les astéroïdes, le nombre de cratères préservés dans la roche exposée est le principal moyen pour déterminer leur âge relatif. En outre, l'éjection des roches délogées par les cratères d'impact fournit une méthode naturelle d'échantillonnage des niveaux plus profonds de la croûte planétaire, ce qui évite le recours aux coûteux forages en profondeur.

Sur Terre, la formation des cratères d'impact a entraîné la concentration d'énormes ressources en métaux, comme le nickel dans la structure d'impact de Sudbury, en Ontario. Il est possible que d'importants gisements de minéraux aient également été formés dans les cratères lunaires.

**Études :**

1. Étudier les isotopes radioactifs des minéraux et des verres fondus au moment de l'impact dans les météorites lunaires et les échantillons ramenés par les missions Apollo pour déterminer l'âge et le taux absolu des bombardements d'impact pour la Lune (et, par extension, pour l'ensemble du système solaire intérieur).
2. Réaliser des études comparatives et étalonner les pressions et les températures dans les matériaux lunaires ayant subi le choc de l'impact et dans des sites analogues terrestres des cratères de Mistastin (Labrador) et de Manicouagan (Québec), par la caractérisation minéralogique et des simulations expérimentales.
3. Réaliser des missions sur le terrain dans des sites analogues terrestres où se trouvent des cratères d'impact avec des couvertures d'éjecta bien préservées, p. ex., le cratère de Ries (Allemagne), pour comprendre la profondeur de la provenance des matériaux éjectés selon la taille du cratère, la composition des roches cible et l'angle d'impact, de concert avec une étude systématique des dépôts d'éjectas lunaires.

**Objectif PG-L-5 : Améliorer les données géophysiques sur les propriétés et la structure de l'intérieur de la Lune.**

Malgré la multitude de données recueillies par les missions Apollo, de nombreuses propriétés géophysiques de la Lune restent mal définies et peu comprises. La caractérisation et l'interprétation du magnétisme de la croûte lunaire représentent un grand problème scientifique à résoudre pour lequel il existe plusieurs modèles concurrents.

La cartographie globale du champ de gravité de la Lune, en particulier de la face cachée, est incomplète. La taille et la composition du centre lunaire ne sont pas connues avec précision. Les épaisseurs et les volumes absolus de la croûte n'ont pas été déterminés avec précision par les mesures sismiques faites par les missions Apollo.

De nouvelles études géophysiques fourniront des informations sur l'intérieur de la Lune et les processus qui ont conduit à sa formation. Elles aideront aussi à quantifier la distribution des ressources vitales (l'ilménite, les volatiles polaires) et les risques naturels (séismes lunaires, rayonnement du aux rayons cosmiques), données essentielles pour planifier l'exploration et la colonisation de la Lune par l'humain.

**Études :**

1. Mesurer le magnétisme ancien de la croûte terrestre par satellite sur orbites lunaires à basse altitude, et analyser avec plus de précision les échantillons de roche lunaire ramenés dans les laboratoires sur Terre.
2. Effectuer des mesures in situ du flux thermique, de la sismicité, de la gravité et du magnétisme et imposer des limites à la structure intérieure et à l'histoire thermique de la Lune.
3. Étudier la conductivité électrique de la croûte et du manteau supérieur pour mieux comprendre leur composition, en particulier la présence d'eau et de gaz.
4. Effectuer des mesures par réseau sismique pour étudier les séismes lunaires, simultanément à l'aide d'au moins quatre stations pour une période d'au moins six ans, ce qui correspond au cycle des forces gravitationnelles de la Terre et du Soleil sur la Lune qui engendrent les séismes lunaires en profondeur.
5. Déployer des réseaux sismiques passifs en utilisant des plates-formes mobiles sur de grandes distances (plusieurs centaines de kilomètres) pour imager la base de la croûte lunaire.



## MARS

### **Objectif PG-M-1 : Comprendre l'hydrologie et l'hydrogéologie passées et actuelles de Mars.**

Si la vie a évolué sur Mars, l'eau était presque certainement un ingrédient essentiel à sa genèse et à son développement. Comprendre la distribution et la forme (liquide, solide, gaz) de l'eau sur Mars, tout au long de son histoire géologique, est donc d'une importance considérable. Le climat de Mars est actuellement assez froid et sec. Globalement, la température de l'air dépasse rarement 0 °C et est habituellement de l'ordre de -60 °C. Elle est même plus froide près des pôles martiens pendant les longues nuits polaires.

L'eau sur Mars est présente en diverses quantités sous forme de glace dans le sous-sol gelé en permanence. Mais certains dépôts et reliefs à la surface de Mars semblent avoir été formés par des rivières ou des glaciers, ce qui suggère que l'eau liquide a déjà été présente, non seulement aux débuts de son histoire, mais peut-être aussi dans un passé récent. La présence d'eau liquide indique que le climat de Mars aurait été plus chaud au cours de ces périodes

Tout comme sur Terre, les changements à long terme dans le climat martien sont causés par des changements périodiques des propriétés orbitales de la planète dans sa course autour du Soleil. Ces changements sont révélés par les variations de certaines propriétés de la glace d'eau formée au fil du temps, comme les proportions des isotopes d'oxygène et d'hydrogène.

Des travaux futurs sont requis pour améliorer la détection des masses de glace d'eau sous la surface du sol, à la fois dans les calottes polaires de Mars et dans le régolithe gelé en permanence. Ces masses de glace d'eau constitueraient non seulement une ressource sur place pour soutenir l'exploration humaine, mais pourraient également contenir des indices d'ancienne vie microbienne. En comprenant mieux le contexte géologique et le cycle hydrologique, on pourrait reconstruire en détail le climat de Mars à long terme par l'analyse des isotopes de l'oxygène et l'hydrogène dans des échantillons de carottes prélevées dans les calottes glaciaires et les réservoirs de glace de sol.

#### **Études :**

1. Détecter à distance la glace dans le sous-sol à l'aide de radars à haute résolution embarqués sur des satellites orbiteurs.
2. Détecter directement la glace d'eau à l'aide d'atterrisseurs pourvus d'instruments géophysiques et géochimiques.
3. Détecter des indices de vie microbienne dans l'ancien pergélisol/glace de sol.
4. Tester dans des sites analogues terrestres des technologies de forage prêtes pour les missions, en vue de déterminer la distribution de la glace et de prélever des échantillons de carottes pour analyse.

### **Objectif PG-M-2 : Caractériser la minéralogie et la géochimie de la croûte martienne.**

La croûte de Mars est d'un très grand intérêt pour les géologues canadiens, et ce, pour deux raisons. Premièrement, elle est très vieille par rapport à la surface de la Terre, laquelle a été profondément labourée par la tectonique des plaques. Plus de la moitié de la surface martienne est âgée de plus de 2 ou 3 milliards d'années, et il est probable que des roches datant de l'âge de la formation de Mars, il y a 4,5 milliards d'années, y soient préservées. Ainsi, grâce aux études actuelles par télédétection, aux mesures in situ et au retour éventuel sur Terre d'échantillons martiens, les géologues seront en mesure de comprendre précisément comment la première croûte de Mars a été formée et a évolué, ce qui est encore une énigme pour la Terre.

Deuxièmement, même si la surface de Mars est en grande partie composée d'un substratum peu modifié, un certain nombre de minéraux ont été identifiés en divers endroits. Outre les preuves photographiques de sédiments qui, pense-t-on, ont été déposés par l'écoulement de l'eau, ces minéraux secondaires indiquent que des périodes chaudes et plus humides ont existé au début de l'histoire de Mars et ont peut-être été propices à la vie.

Des composés organiques fossiles et d'autres indications physiques, chimiques et isotopiques indirectes d'activité biologique, appelées « biosignatures », seront probablement trouvés dans les environnements géologiques secondaires où la minéralisation est la plus préservée. Il sera essentiel d'avoir des données géologiques pour identifier ces sites.

**Études :**

1. Cartographier directement la surface des zones de minéralogie primaire et secondaire par imagerie et analyse spectroscopique.
2. Explorer le sous-sol rocheux par forage et par spectrométrie.
3. Rechercher dans l'atmosphère des gaz à l'état de trace d'origine biologique (c.-à-d. du méthane) et leurs sources en surface ou en subsurface.
4. Évaluer directement la composition des roches de surface de Mars au moyen d'atterrisseurs et d'astromobiles.
5. Évaluer le potentiel de vie dans des sites analogues martiens sur Terre, en particulier là où l'eau chaude a circulé à travers les rochers, comme les cratères d'impact météorique et les sources chaudes acides.
6. Accroître le niveau de préparation technologique pour les instruments et l'infrastructure à destination de Mars par des tests et leur déploiement dans des sites analogues martiens sur Terre.
7. Élaborer et tester une stratégie de retour d'échantillons martiens, axée sur la compréhension de l'origine de la croûte, le changement climatique et la recherche de la vie.

**Objectif PG-M-3 : Améliorer les mesures géophysiques de la structure interne de Mars.**

Sous sa croûte, Mars est composé d'un noyau riche en fer, entouré d'un épais manteau de roches de silicate denses. Nous devons mieux estimer la taille, la composition et l'histoire des changements de température dans le noyau et le manteau martiens. Cette information portera sur l'origine des caractéristiques à grande échelle de la croûte et sur l'histoire du champ magnétique, et leurs effets sur l'atmosphère et le climat.

La croûte martienne est épaisse, montagneuse et très marquée par des cratères au sud, tandis qu'elle présente des plaines volcaniques plates au nord. Une protubérance volcanique remarquable, de la taille de l'Amérique du Nord, s'élève à environ 10 km au-dessus des terres basses dans la région de Tharsis. Le volcanisme associé aux terres basses du nord et à Tharsis aurait libéré d'importantes quantités d'eau et d'autres gaz, dont peut-être du dioxyde de carbone, dans l'atmosphère, ce qui a modifié les milieux de vie.

Le volcanisme a vraisemblablement été causé par des changements dans la structure et les taux de convection dans le manteau martien, et par des mécanismes de perte de chaleur depuis le noyau. Ces processus peuvent être étudiés par le comportement des ondes sismiques à travers Mars, et des simulations expérimentales et des calculs de la stabilité et des propriétés des roches et des minéraux soumis aux très hautes pressions qui existent à l'intérieur de Mars.

Les champs magnétiques planétaires sont produits par des courants électriques générés par la convection de liquides riches en fer dans le noyau (la dynamo). Un champ magnétique intense fait dévier le vent solaire, qui est un flux de particules chargées éjectées par le soleil; sur Terre, c'est ce qui protège de vent solaire l'atmosphère et la surface.

Pour des raisons inconnues, la dynamo sur Mars a cessé de fonctionner et le champ n'est plus généré. Par conséquent, n'étant plus protégée par un champ magnétique intense, l'atmosphère martienne a probablement été arrachée par le vent solaire, ce qui a rendu Mars peu hospitalier pour la vie. Même aujourd'hui, le vent solaire serait un danger pour les astronautes qui travailleraient sur la planète.

Toutefois, des vestiges des champs magnétiques produits par les roches de la croûte formées avant la perte de la dynamo pourraient fournir une protection à des endroits précis. Il sera donc essentiel de caractériser le champ magnétique en détail à ces endroits avant l'exploration et la colonisation de Mars par les humains.

#### Études :

1. Caractériser la composition et la minéralogie de l'intérieur profond de la planète Mars, en utilisant un réseau mobile d'au moins trois sismomètres, avec des modèles de répartition des minéraux qui sont stables à l'intérieur de Mars.
2. Déterminer en détail la structure et la composition de la croûte martienne à l'échelle locale pour le choix de sites d'atterrissage et détecter la présence de ressources minérales, en utilisant une combinaison de mesures in situ au sol et de données recueillies à partir d'un avion ou d'un ballon volant à basse altitude.
3. Réaliser des études théoriques et expérimentales du transfert de chaleur dans le manteau et le noyau qui pourraient expliquer l'origine de la province volcanique de Tharsis et de la dichotomie entre les terrains montagneux du sud de la planète et les plaines du nord.
4. Recueillir des données magnétiques, à l'altitude la plus faible possible dans les régions de champs magnétiques très intenses produits par la croûte dans les zones de l'hémisphère sud, où les astronautes et le matériel pourraient être protégés contre les effets néfastes du vent solaire.
5. Faire des levés magnétiques à haute résolution pour caractériser le champ magnétique relativement peu intense de l'hémisphère nord et des grands cratères d'impact.

## PETITS CORPS ET LUNES DES PLANÈTES EXTÉRIEURES

**Objectif PG-S-1 : Étudier en détail la géologie, la minéralogie, la chimie, la gravité et le magnétisme des astéroïdes et des comètes.**

Les astéroïdes et les comètes sont des fragments des matériaux constitutifs qui se sont accumulés pour former les planètes rocheuses et gazeuses du système solaire. La connaissance de leur composition offrira une fenêtre unique sur les premiers instants de notre système solaire, et nous aidera à comprendre les processus physiques et chimiques qui se sont produits ultérieurement sur les planètes.

Des fragments d'astéroïdes atteignent parfois la Terre (ce sont alors des météorites) et peuvent être étudiés dans les laboratoires terrestres. L'étude des météorites est la méthode la moins coûteuse et présentant le moins de risque pour l'échantillonnage des astéroïdes. Mais l'étude directe est nécessaire pour comprendre à fond la variété et les caractéristiques de ces petits corps.

Les objets proches de la Terre, désignés souvent par le sigle anglais NEO, sont des astéroïdes (et quelques comètes) dont les orbites les rapprochent périodiquement de la Terre, et qui offrent les meilleures chances d'étude par des sondes orbitales, des modules de pénétration (petits engins autonomes et instrumentés qui entrent en collision avec une surface à grande vitesse) ou

des atterrisseurs. En raison de leur faible gravité et de la proximité de la Terre, ce sont des sources potentiellement rentables de matières premières (métaux et eau) qui pourraient fournir du carburant et des ressources pour les missions vers la Lune et Mars.

Les deux petites lunes de Mars, Phobos et Deimos, que l'on pense être des astéroïdes capturés, pourraient être étudiées de concert avec Mars et servir de base de préparation en orbite basse pour les opérations sur Mars.

Il est nécessaire de caractériser en détail la géologie, la topographie, la masse, le volume, la densité de la distribution interne, la composition, la minéralogie, la teneur en eau dans le régolithe près de la surface et les propriétés géophysiques de ces objets pour comprendre leur origine et évaluer leur potentiel en ressources.

**Études :**

1. Étudier par télédétection les propriétés des objets proches de la Terre (p. ex., imagerie, propriétés spectrales, magnétisme, gravité).
2. Étudier la surface des objets proches de la Terre (p. ex., les atterrisseurs/pénétrateurs pour la mesure de propriétés physiques; les études géologiques et minéralogiques sur place; le prélèvement d'échantillons retournés vers la Terre).

**Objectif PG-S-2 : Décrire et modéliser la dynamique de la glace d'eau sur Ganymède, Europe et Encelade.**

Deux des lunes galiléennes de Jupiter, Ganymède et Europe, et un satellite de Saturne, la minuscule Encelade, sont composés en surface de coquilles de glace d'eau relativement lisses, sous lesquelles se trouvent des océans d'eau enfouis. Ces lunes sont des sites privilégiés pour la recherche de vie extraterrestre, outre Mars et Titan, la plus grande lune de Saturne qui possède une épaisse atmosphère d'azote et des lacs d'hydrocarbures liquides.

En 2005, la sonde spatiale Cassini a découvert des panaches riches en eau remarquables provenant de la région polaire sud d'Encelade, semblables aux geysers sur Terre.

Des recherches sont nécessaires pour définir la nature et la taille des océans d'eau dans le sous-sol de ces lunes, et pour comprendre pourquoi et comment leurs surfaces sont refaçonnées par les éruptions d'eau.

**Études :**

1. Utiliser des faisceaux radar capables de pénétrer la glace pour cartographier la distribution d'eau à l'intérieur des coquilles de glace et éventuellement sous celles-ci.
2. Étudier la tectonique des glaces et les mécanismes qui refaçonnent les lunes glacées, d'après des modèles de formation des nappes de glace continentales et de la dynamique de la Terre.
3. Développer et tester des technologies de télédétection sur des sites analogues terrestres, notamment les sources riches en soufre qui se déversent à la surface de la glace de glacier dans le fjord de Borup, dans le Haut-Arctique du Canada.

**FEUILLE DE ROUTE**

La communauté canadienne des chercheurs en GGP est relativement petite par rapport à l'ensemble des chercheurs canadiens en sciences de la Terre, mais elle a une expertise bien reconnue dans des domaines particuliers, dont les études dans les sites analogues, les cratères

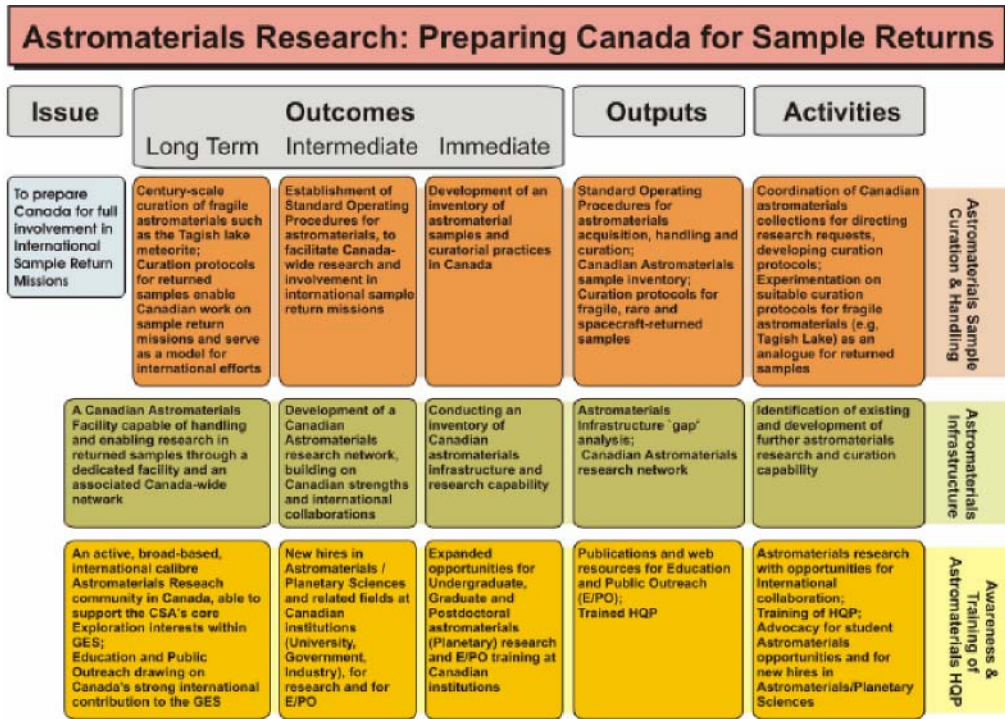
d'impact, la télédétection, l'hydrogéologie, la minéralogie des météorites, la microanalyse in situ, la géochronologie et la géochimie isotopique, la géophysique de terrain et la modélisation numérique.

Cette expertise se développera davantage et offrira aux géologues et aux géophysiciens (ainsi qu'aux étudiants) des possibilités de participer aux missions planétaires dans le cadre de la Stratégie mondiale d'exploration.

Les associations et les groupes nationaux peuvent jouer un rôle important en faisant connaître l'expertise canadienne en GGP aux planificateurs de missions, tant au Canada qu'à l'étranger. De tels groupes ont récemment été établis, comme le Réseau canadien de recherche lunaire et la Division planétaire de l'Association géologique du Canada.

Il sera également important de créer des installations nationales axées sur les principales méthodes de recherche qui soutiennent les objectifs scientifiques de la GGP. Par exemple, mentionnons les installations nécessaires à la conservation et à l'analyse des échantillons qui seront prélevés sur la Lune, Mars et les astéroïdes et retournés sur Terre, et au développement et à l'essai des instruments de terrain portables pour les mesures géochimiques et géophysiques in situ.

Un groupe de travail sur les astromatériaux (Astromaterials Discipline Working Group – ADWG) a été constitué en vertu d'un contrat avec l'ASC 2007 à 2009 pour examiner attentivement les moyens par lesquels le Canada et les chercheurs canadiens peuvent commencer à se préparer dès maintenant pour les échantillons qui seront ramenés par les futures missions spatiales. Les membres du groupe ADWG estiment que la recherche sur les astromatériaux est tributaire des infrastructures et non de missions spécifiques, c.-à-d. qu'elle soutient l'ensemble des études ci-dessus qui portent sur la GGP, et qui couvrent plusieurs années et plusieurs missions. Ce groupe de travail a déterminé que le Canada peut se bâtir une capacité de recherche sur les astromatériaux par la conservation et la manipulation des échantillons, l'analyse et l'amélioration des infrastructures, la formation de personnel hautement qualifié et la sensibilisation du public. Le groupe a proposé des activités immédiates à cette fin, et il a examiné les risques associés à la réalisation et la non-réalisation de ces plans. Le groupe ADWG a présenté ses idées dans un livre blanc sommaire (disponible sur demande), et dans le modèle logique ci-dessous :



November 24, 2008

Anglais	Français
Astromaterials research...	Recherche sur les astromatériaux : Préparer le Canada pour le retour des échantillons
Issue	Enjeu
Outcomes...	Extrants Long terme      Moyen terme      Immédiats
Outputs	Résultats
Activities	Activités
To prepare Canada for...	Préparer le Canada à une pleine participation aux missions de retour d'échantillons.
Century-scale curation...	Conservation pendant des siècles d'astromatériaux fragiles comme la météorite du lac Tagish; les protocoles de conservation des matériaux ramenés sur Terre permettent aux Canadiens de participer aux missions de retour d'échantillons et de servir de modèles pour les efforts internationaux.
Establishment of Standard Operating...	Établissement de protocoles opératoires normalisés pour les astromatériaux, afin de faciliter la recherche dans tout le Canada et de participer aux missions internationales de retour d'échantillons.
Development of an inventory of...	Mise en place d'un inventaire d'échantillons d'astromatériaux et de pratiques de conservation.
Standard Operating Procedures for astromaterials...	Protocoles opératoires normalisés pour l'acquisition, la manutention et la conservation des astromatériaux; protocoles de conservation pour les échantillons fragiles, rares et ramenés de l'espace.
Coordination of astromaterials collection...	Coordination des collections canadiennes d'astromatériaux pour l'orientation des demandes de recherche; élaboration de protocoles de conservation; expériences sur des protocoles appropriés de conservation des astromatériaux fragiles (p. ex., météorite du lac Tagish), pouvant servir de conditions analogues pour les échantillons ramenés de l'espace.
Astromaterials Sample...	Conservation et manutention des échantillons d'astromatériaux

A Canadian Astromaterials Facility...	Installation canadienne des astromatériaux pouvant traiter et étudier les échantillons ramenés dans des laboratoires spécialisés, et réseau canadien connexe.
Development of a Canadian Astromaterials research...	Établissement d'un réseau canadien de recherche sur les astromatériaux, s'appuyant sur les atouts canadiens et les collaborations internationales.
Conducting an inventory of...	Inventaire des infrastructures et des capacités de recherche canadiennes en astromatériaux.
Astromaterials Infrastructure « gap »...	Analyse des lacunes dans les infrastructures d'étude des astromatériaux; réseau canadien de recherche sur les astromatériaux.
Identification of existing and...	Identification des capacités canadiennes actuelles en conservation et en étude des astromatériaux, et développement de ces capacités.
Astromaterials Infrastructure	Infrastructures des astromatériaux
An active broad-based...	Une communauté canadienne active, large et de calibre internationale pour la recherche sur les astromatériaux, pouvant soutenir les principaux objectifs d'exploration de l'ASC dans le cadre de la Stratégie mondiale d'exploration; éducation et sensibilisation du public s'appuyant sur les importantes contributions internationales du Canada à la Stratégie mondiale d'exploration.
New Hires in Astromaterials...	Nouveaux postes créés dans le domaine des astromatériaux, des sciences planétaires et autres secteurs connexes dans les établissements canadiens (universités, gouvernement, industrie) pour la recherche et pour l'éducation et la sensibilisation du public.
Expanded Opportunites for Undergraduates...	Occasions accrues de recherche sur les astromatériaux (sciences planétaires) au premier cycle, aux cycles supérieurs et au niveau postdoctoral dans les établissements canadiens, et pour l'éducation et la sensibilisation du public.
Publication and Web...	Publications et ressources sur le Web pour l'éducation et la sensibilisation du public; formation de PHQ.
Astromaterials research with opportunities...	Recherche sur les astromatériaux avec des possibilités de collaboration internationale; formation de PHQ; nouveaux débouchés pour les étudiants et nouveaux emplois dans les domaines des astromatériaux et des sciences planétaires.
Awareness and training...	Sensibilisation et formation de PHQ dans le domaine des astromatériaux.
November 24, 2008	24 novembre 2008

## 4 SCIENCE SOLAIRE-TERRESTRE

L'espace est fondamentalement un milieu hostile – un environnement à la fois invisible et dominé par le plasma (gaz ionisé), les champs électriques et magnétiques, du rayonnement et des particules énergétiques. En raison de ce caractère hostile, la science solaire-terrestre et l'exploration de l'espace sont complémentaires, ce qui est la fois un bienfait et une nécessité.

L'objectif primordial de la science solaire-terrestre est de faire progresser les connaissances de la *physique fondamentale et des liens entre* le Soleil et les autres corps du système solaire, et d'améliorer notre capacité de prévoir et d'atténuer les effets sur la société.

Le programme de la Stratégie mondiale d'exploration (SME) fournira des occasions uniques pour les études prioritaires du milieu Soleil-Terre et des corps planétaires proches, comme les processus physiques du plasma dans le milieu spatial près des planètes et leurs effets sur l'exploration spatiale. Tout aussi important, la SME offrira des possibilités d'étude à *partir de ces corps*, p. ex., avec un observatoire lunaire pour étudier le milieu solaire ou près de la Terre (milieu géospatial).

Dans le cas de la Lune, la recherche porte sur plusieurs points essentiels :

- l'environnement plasmique lunaire et ses régions;
- l'ionosphère lunaire – la partie ionisée de l'atmosphère d'une planète. Les recherches récentes laissent à entendre que la Lune pourrait avoir une ionosphère malgré l'absence d'une atmosphère détectable;
- la poussière lunaire et les tempêtes de poussière;
- les processus plasmiques à échelles multiples dans le sillage lunaire et les anomalies magnétiques. Le sillage lunaire est la région juste derrière la Lune qui est l'abri du vent solaire, lequel est constitué de particules chargées éjectées par le Soleil;
- l'utilisation de la Lune comme observatoire solaire-terrestre pour les observations solaires, terrestres et près de la Terre (milieu géospatial).

Dans le cas de Mars, l'accent est mis sur les points suivants :

- le champ magnétique et les sources d'anomalies magnétiques;
- la structure, la dynamique et l'histoire de son atmosphère et de son ionosphère;
- les effets du bombardement par le vent solaire sur l'évolution de l'atmosphère de la planète et de ses gaz volatils, qui peuvent s'échapper dans l'espace.

Dans les deux cas, la science solaire-terrestre fournit les connaissances de base pour développer une capacité de prévoir la « météo de l'espace » (c.-à-d. la connaissance des conditions dans l'espace). Cette recherche permettra également de développer des mesures de protection et des stratégies d'atténuation contre le rayonnement spatial et d'autres effets nocifs de l'environnement spatial. Ces étapes sont des conditions préalables à la fois pour l'exploration robotique et humaine de l'espace.

### RÉSUMÉ DES OBJECTIFS

ST-L-1 – Étudier l'environnement plasmique lunaire et ses régions.

ST-L-2 – Mettre en orbite lunaire un observatoire solaire-terrestre.

ST-L-3 – Prévoir et atténuer le rayonnement spatial.

ST-M-1 – Étudier le champ magnétique de Mars.

ST-M-2 – Étudier le bombardement par le vent solaire de la haute atmosphère de Mars.

ST-M-3 – Étudier la météorologie de Mars.



**OBJECTIFS ET ÉTUDES**

**Objectif ST-L-1 : Étudier l'environnement plasmique lunaire et ses régions.**

L'environnement électromagnétique et plasmique près de la Lune joue un rôle dominant dans la dynamique des processus physiques dans les différentes régions de la Lune. Un exemple en est l'ionisation de la surface lunaire par les matériaux de surface par la lumière ultraviolette extrême (UVE) émise par le Soleil, ce qui entraîne l'émission de « photoélectrons » par la surface lunaire, et qui lui procure une charge électrique positive. Du côté nuit de la Lune, la surface peut avoir une charge négative beaucoup plus grande que le côté jour chargé positivement – au point de créer un danger pour les activités d'exploration robotique et humaine.

La Figure 1 est une représentation artistique de l'environnement plasmique de la Lune, y compris ses différentes régions de plasma et leurs interactions avec le vent solaire.

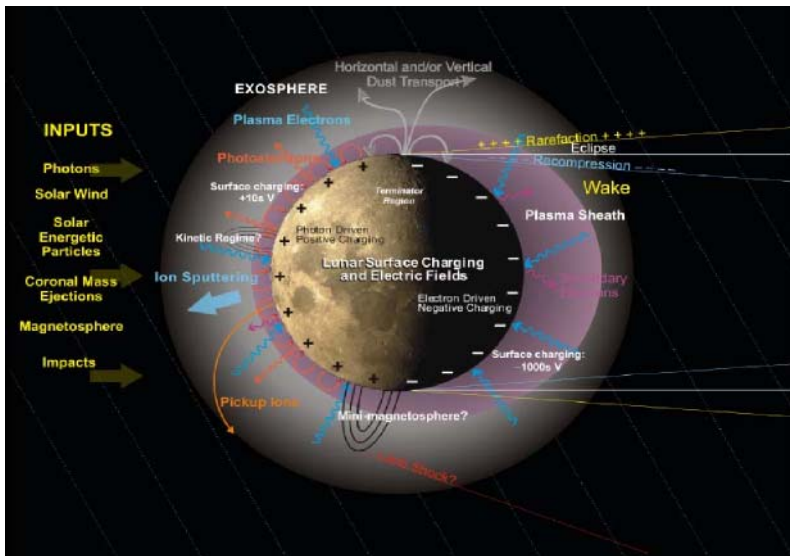


Figure 1 – Environnement et régions plasmiques de la Lune et leurs interactions avec le vent solaire. (DELORY et autres, 2008 / UC Berkeley)

Anglais	Français
Inputs	Intrants
Photons	Photons
Solar Wind	Vent solaire
Solar Energetic Particles	Particules solaires énergétiques
Coronal Mass Ejections	Éjections de matière coronale
Magnetosphere	Magnétosphère
Impacts	Impacts
Exosphere	Exosphère
Plasma Electrons	Électrons plasmiques
Photoelectrons	Photoélectrons
Surface Charging	Accumulation de charge à la surface
Kinetic Regime	Régime cinétique
Ion Sputtering	Pulvérisation d'ions
Pickup Ions	Ions implantés
Horizontal and/or Vertical	Transport vertical et/ou horizontal de poussières

Dust Transport	
Terminator Region	Région du terminateur
Photons Driven Positive Charging	Accumulation de charge positive due aux photons
Lunar Surface Charging and Electric Fields	Champs électriques et charges à la surface de la Lune
Electron Driven Negative Charging	Accumulation de charge négative due aux électrons
Mini-magnetosphere	Mini-magnétosphère
Shock	Choc
Rarefaction	Raréfaction
Eclipse	Éclipse
Recompression	Recompression
Wake	Sillage
Plasma Sheath	Limites périsphériques du plasma
Secondary Electrons	Électrons secondaires
Surface charging -1000 e V	Accumulation de charge en surface -1 000 eV

### Études :

- 1. Mini-magnétosphères** : Un élément important des équations électromagnétiques près de la Lune est constitué par les anomalies « mini-magnétosphériques » créées par la croûte sous la surface lunaire. Ce sont des régions localisées de champs magnétiques intenses du côté opposé des cratères d'impact sur la Lune, atteignant de 50 à 100 km d'altitude au-dessus de la surface lunaire.

  - Ce sont d'excellentes cibles de recherche en raison de leur nature localisée et de la façon dont elles interagissent avec le vent solaire pour former des versions miniaturisées des structures de champs magnétiques que l'on trouve près de la Terre, comme la magnétopause et l'« onde de choc ». La magnétopause est la frontière entre le champ magnétique interplanétaire et le champ magnétique intrinsèque de la Terre, et l'« onde de choc » est le front créé à proximité par le ralentissement du vent solaire supersonique incident.
  - Les mini-magnétosphères lunaires représentent en outre le seul plasma astrophysique accessible pour étudier la physique des plasmas à une échelle suffisamment petite pour élucider les propriétés fondamentales du plasma. Elles sont importantes pour les levés magnétiques de la Lune et leur étude ouvrira la voie à leur utilisation potentielle comme magnétosphères artificielles et coquilles protectrices pour blinder les astronautes et les équipements sensibles contre le rayonnement et les particules énergétiques qui heurtent la surface lunaire.
- 2. Ionosphère lunaire** : L'orbiteur lunaire japonais « Kaguya » a récemment révélé l'existence possible d'une ionosphère sur la Lune. La densité d'ionisation est plus de 100 fois supérieure à ce qui était prévu, compte tenu que la Lune est pratiquement dépourvue d'atmosphère. Kaguya a également observé de façon inattendue des ions réfléchis par la Lune. Percer les secrets de l'ionosphère lunaire est donc important pour comprendre la Lune et son évolution.
- 3. Terminateur lunaire** : La physique du terminateur lunaire (la limite entre les côtés jour et nuit de la Lune) et du sillage lunaire est d'un intérêt fondamental. Les astronautes d'Apollo avaient signalé des tempêtes de poussière sur le terminateur, qui ont également été observées fréquemment par les orbiteurs lunaires. La densité d'électrons changeante sur l'ensemble du terminateur lunaire est censée générer des champs électriques, qui peuvent causer des « tempêtes de poussière » en accélérant le mouvement de la poussière chargée.

Ces tempêtes présentent un défi majeur pour les opérations sur une base lunaire – p. ex., il pourrait être difficile de maintenir un environnement exempt de poussière pour les capteurs et les équipements sensibles.

- La séparation des charges (positives et négatives) dans la région d'ombre du « sillage plasmique » lunaire provoque, pense-t-on, diverses ondes plasmiques et fréquences ultra-basses (ULF), qui sont susceptibles d'influer sur le transport du plasma dans cette région. Le sillage lunaire servira d'environnement analogue pour les études ultérieures des ondes plasmiques sur les astéroïdes et les queues de comètes, où des processus plasmiques similaires sont à l'œuvre, croit-on, et jouent un rôle important dans la formation des queues de comètes. Comprendre les effets des champs électriques et magnétiques, ainsi que la dynamique résultante de la poussière sur le terminateur lunaire et dans le sillage de la Lune, est une priorité importante pour les scientifiques et pour des raisons opérationnelles.
- 4. Poussière lunaire et tempêtes de poussière :** Gene Cernan, astronaute d'une mission Apollo, a déjà fait remarquer que « la poussière est probablement l'un des plus grands obstacles aux activités nominales sur la Lune. » À mesure que la poussière se déplace autour de la Lune, les particules de poussière du côté jour sont chargées positivement, tandis que du côté nuit elles sont chargées négativement. Cela crée un « plasma poussiéreux » dans lequel des grains de poussière de même charge peuvent léviter à une altitude atteignant 100 km du côté nuit. Ce transport de poussière chargée, qui est affecté par les champs électriques qui traversent la surface lunaire, constitue un danger pour les instruments déployés sur la surface lunaire.
- En caractérisant l'environnement de la poussière lunaire et en étudiant la charge associée à la surface, on pourra faire des comparaisons importantes avec d'autres lunes et planètes, comme Mercure et les lunes de Jupiter. On saura aussi comment mieux réduire les effets néfastes de la poussière sur les opérations à la surface lunaire.
- 5. Physique fondamentale des plasmas à échelles multiples :** Le sillage de plasma et les anomalies magnétiques à la surface de la Lune offrent un laboratoire naturel pour l'étude de la physique fondamentale du plasma astrophysique à échelles multiples (c.-à-d. du plasma qui varie sur plusieurs échelles spatiales et temporelles). Les processus plasmiques tant dans le sillage que dans les anomalies se produisent, croit-on, sur une large gamme d'échelles spatiales et temporelles et le comportement du plasma est dominé par des processus à très grande et à très petite échelles. En cela, ils sont similaires aux nombreux plasmas auroraux et magnétosphériques d'intérêt sur la Terre et les autres planètes. Les études de ces processus à échelles multiples font progresser nos connaissances en physique fondamentale des plasmas astrophysiques.

**Objectif ST-L-2 : Mettre en orbite lunaire un observatoire solaire-terrestre.**

L'idée d'utiliser la Lune comme observatoire « orbital » pour imager l'espace près de la Terre et étudier la physique du système solaire (l'héliophysique) a été proposée pour la première fois par les chercheurs canadiens dans ce domaine dans le Plan à long terme pour l'espace de 1990. Un rapport récent de la NASA sur l'héliophysique à partir de la Lune a ravivé l'intérêt dans l'utilisation de la Lune pour imager la surface solaire, l'espace près de la Terre et les limites du système solaire.

La Lune est une plate-forme parfaite pour la télédétection, car elle n'a pas d'atmosphère qui absorbe les rayonnements et fausse les mesures. Elle n'a pas de champ magnétique intrinsèque, ce qui est idéal pour étudier diverses questions scientifiques importantes, dont la composition du vent solaire, l'histoire du bombardement de la Lune par le vent solaire, le Soleil, le système solaire intérieur et les rayons cosmiques provenant de l'extérieur du système solaire.

**Études :**

1. **Reconnexion magnétique** : le processus de «reconnexion magnétique» se produit lorsque les lignes de force magnétique, originaires de deux régions géophysiques distinctes se « reconnectent » et libèrent leur énergie magnétique stockée en énergie cinétique des particules dans une région localisée et de manière explosive. Ce processus est central dans l'écoulement de masse et d'énergie entre les systèmes de plasma magnétisé astrophysiques, comme le Soleil, la Terre et les autres planètes magnétisées (p. ex., Jupiter et Saturne).
2. **Imagerie de la géocouronne et des aurores boréales** : L'imagerie globale de la géocouronne, qui consiste en lumière solaire dans l'ultraviolet lointain réfléchi par la couche d'atomes neutres au sommet de la haute atmosphère terrestre, est un outil extrêmement puissant pour observer la dynamique des différents constituants de la haute atmosphère. De même, l'imagerie des aurores boréales nous permet de surveiller en permanence la dynamique globale du champ magnétique de la Terre. C'est un outil important et rentable pour le suivi et la caractérisation de la météo spatiale en temps réel à l'échelle mondiale.
3. **Télé-détection des processus atmosphériques de la Terre** : En étudiant l'albédo global (réflexion du rayonnement solaire par la surface d'un corps), les nuages, les éclairs atmosphériques, la lumière du ciel (faible émission de lumière par l'atmosphère de la Terre) et les vents en haute atmosphère, nous comprendrons mieux les interactions entre les différents processus dans l'atmosphère terrestre et la haute atmosphère.
4. **Éjection de matière coronale** : Une éjection de matière coronale (CME) est une éjection de plasma énergétique du Soleil à des vitesses atteignant 10 millions km/h. Quand une CME atteint la Terre, elle peut perturber les transmissions radio, causer des pannes majeures de courant, désactiver les satellites de communications ou perturber le fonctionnement des systèmes de navigation par satellite.

**Objectif ST-L-3 : Prévoir et atténuer le rayonnement spatial.**

Même à 30 000 pieds au-dessus de la surface de la Terre, et en dépit de la protection fournie par le champ magnétique de la Terre, les effets nocifs du rayonnement corpusculaire provenant du Soleil sont un sujet de grave préoccupation pour les passagers des vols aériens transpolaires. En fait, les compagnies aériennes modifient souvent leurs plans de vol pour des trajets plus longs et plus coûteux afin d'éloigner les avions du pôle magnétique, parfois même lorsqu'ils sont déjà dans l'air.

Au-delà des limites immédiates de la Terre, le rayonnement spatial pose un défi important pour l'exploration robotique et humaine. Par exemple, les ceintures de rayonnement qui entourent la Terre opacifient les objectifs des caméras et dégradent les fibres optiques des câbles, les rendant inutilisables en quelques semaines. Par conséquent, les équipements sensibles doivent être protégés de manière adéquate afin de réduire la dose de rayonnement à un niveau acceptable. Il en est de même pour les astronautes. La science solaire-terrestre fournira les connaissances de base pour la mise au point de mesures de protection et de stratégies d'atténuation contre le rayonnement spatial et les autres effets nocifs du milieu spatial.

**Études :**

1. Suivre et prévoir en temps réel les conditions géospaciales qui peuvent affecter les astronautes en route vers la Lune et sur celle-ci (en d'autres mots, connaître la météo spatiale).

2. Suivre et diffuser en temps réel les événements de bombardement de la surface lunaire par le rayonnement spatial.
3. Concevoir des blindages magnétiques assurant une protection contre les rayonnements.

**Objectif ST-M-1 : Étudier le champ magnétique de Mars.**

Mars est un terrain d'étude aussi intéressant que la Lune pour la recherche solaire-terrestre. La sonde Mars Global Surveyor (MGS) a récemment confirmé que le champ magnétique de Mars est inexistant ou très faible (3 000 fois plus faible que celui de la Terre), et a révélé la présence de sources locales et intenses d'anomalies magnétiques de la croûte qui sont associées à du terrain ancien.

La Figure 2 est une carte des anomalies magnétiques de la croûte, avec superposition des grands cratères et de la frontière dichotomique nord-sud, qui sépare les terrains anciens et les massifs du sud, des terrains plus jeunes au nord. La présence d'anomalies au sud de cette frontière et leur absence au-dessus des grandes structures volcaniques et des cratères d'impact suggère que la croûte magnétisée a été détruite par les impacts et que la dynamo magnétique sur Mars s'est probablement arrêtée il y a environ 3,9 milliards d'années.

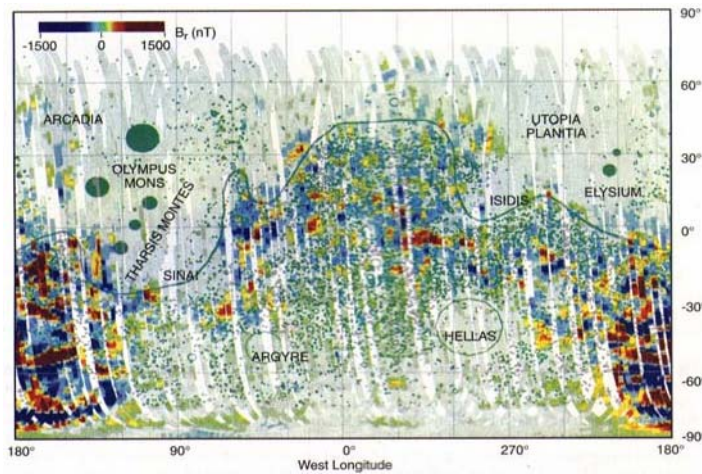


Figure 2 – Carte des anomalies magnétiques de la croûte martienne, avec superposition des grands cratères et de la frontière dichotomique nord-sud, l'intensité du champ magnétique étant représentée par un code couleur (ACUNA, M. H., et autres, Global Distribution of Crustal Magnetization Discovered by the Mars Global Surveyor MAG/ER Experiment, 1999).

**Études :**

1. **Évolution des mini-magnétosphères** : La dynamo magnétique qui a créé un champ magnétique sur Mars a peut-être fonctionné pendant quelques centaines de millions d'années après la formation de la planète avant de s'arrêter. Évidemment, la formation de la frontière dichotomique est postérieure à l'arrêt de la dynamo, et des régions localisées de l'ancienne croûte mince et magnétisée ont été modifiées par des impacts profonds et les flux magmatiques (flux de roches en fusion sous la surface). Le réchauffement et la tectonique – c.-à-d. les mouvements des plaques rocheuses qui forment la croûte extérieure de Mars, ce qui équivaut aux séismes sur la Terre – peuvent également avoir joué un rôle.

Ainsi, les anomalies magnétiques nous permettront d'étudier l'origine et l'histoire de la structure du champ magnétique et les anomalies de la croûte sur Mars, ainsi que les vestiges de la vie et de l'eau à l'intérieur des mini-magnétosphères.

**Objectif ST-M-2 : Étudier le bombardement par le vent solaire de la haute atmosphère de Mars.**

En l'absence d'un fort champ magnétique interne, le bombardement direct du vent solaire sur l'atmosphère de Mars transmet de l'énergie aux ions dans l'ionosphère martienne, ce qui leur permet ensuite de vaincre la gravité de Mars et de s'échapper de son atmosphère. De plus, ces ions entrent en collision avec les atomes neutres (sans charge) dans l'atmosphère, ce qui projette ces atomes loin de la planète.

**Études :**

1. **Interactions avec le vent solaire et évolution des gaz atmosphériques volatils** : On estime que le processus de bombardement par le vent solaire a causé une importante perte de constituants de l'atmosphère de Mars au cours de son histoire. On estime que la perte, dans le passé, des gaz atmosphériques volatils, y compris l'eau, est comparable à la masse actuelle de l'atmosphère de Mars. Des observations in situ de la fuite d'ions et d'atomes neutres nous permettront de déterminer le rôle clé de la perte d'atmosphère dans l'évolution de l'eau et d'autres substances volatiles sur la planète.
2. **Atmosphère et ionosphère de Mars** : Un objectif scientifique important dans l'exploration de Mars est de comprendre la structure, la dynamique et l'histoire de son atmosphère et de son ionosphère. À cause du bombardement par le vent solaire, l'ionosphère martienne semble avoir une toute autre distribution en altitude que l'ionosphère terrestre. Sur Mars, il y a une « ionopause » où la densité d'ionisation baisse de façon marquée sur une très faible plage d'altitude. L'altitude de cette ionopause semble varier en fonction des modifications de la pression dynamique du vent solaire.
  - Cela explique l'importance des liens entre la variabilité ionosphérique, la pénétration du vent solaire, le plasma et la fuite de l'atmosphère, le couplage ionosphère-atmosphère, ainsi que l'évolution de l'atmosphère sur Mars. L'étude exhaustive de ces liens a été et est le but de nombreuses missions martiennes passées et actuelles, et se poursuivra avec les futures missions.

**Objectif ST-M-3 : Étudier la météorologie de Mars.**

Mars constitue un excellent point d'observation pour la surveillance et l'étude de la météo spatiale dans le système solaire interne. Par ailleurs, pour assurer la sécurité et le succès des missions d'exploration vers Mars, il faut prévoir et atténuer les effets néfastes de la météo spatiale.

**Études :**

1. **Météorologie spatiale sur Mars – prévision et atténuation** : Ces études doivent inclure à tout le moins la surveillance et les prévisions en temps réel de la météo spatiale qui affectent les astronautes sur Mars ou en route vers cette planète, et le développement de blindages magnétiques pour protéger les astronautes et l'équipement contre le rayonnement incident sur la surface martienne. Il est également important de comprendre et de prévoir les effets des variations de la densité atmosphérique sur les engins spatiaux qui utilisent le

freinage aérodynamique pour réduire leur vitesse quand ils sont en orbite autour de Mars ou atterrissent à sa surface.

## 5 ASTRONOMIE SPATIALE

L'espace offre un environnement idéal pour l'astronomie. Sur Terre, la turbulence atmosphérique limite la résolution et la sensibilité des télescopes au sol, en particulier dans la région visible du spectre électromagnétique. En outre, l'atmosphère absorbe fortement la lumière dans l'ultraviolet et dans la majeure partie de l'infrarouge, ce qui bloque la plus grande partie du spectre.

L'émission de lumière par les atomes et les molécules dans la haute atmosphère est une source importante de bruit, ce qui réduit considérablement la sensibilité, en particulier dans l'infrarouge.

Ces limitations ont motivé la conception du télescope spatial Hubble (HST), un projet couronné de succès, et de son successeur, le télescope spatial James Webb (JWST) dont le lancement est prévu en 2013.

En raison de la nature ondulatoire de la lumière, la résolution d'un télescope est proportionnelle au diamètre de son ouverture, habituellement le miroir primaire du télescope. Le pouvoir collecteur de lumière augmente avec le carré de ce diamètre, et pour les observations de sources peu lumineuses, la sensibilité augmente proportionnellement à la puissance quatrième, d'où l'énorme potentiel scientifique des télescopes de grande ouverture.

Les coûts et les problèmes technologiques ont jusqu'ici limité la taille des télescopes spatiaux. Le HST possède un miroir primaire de 2,4 m et le JWST en aura un de 6,5 m. Par ailleurs, les plus grands télescopes sur terre ont une ouverture de l'ordre de 8 à 10 m. Une nouvelle génération de télescopes de 30 à 40 m est prévue.

La Lune offre une occasion unique de surmonter bon nombre de limitations qui affectent les télescopes sur Terre et certaines limitations qui restreignent la taille des télescopes spatiaux. Comme la Lune n'a pas, à toutes fins utiles atmosphère, la performance d'un télescope lunaire serait similaire à celle d'un télescope spatial de même ouverture.

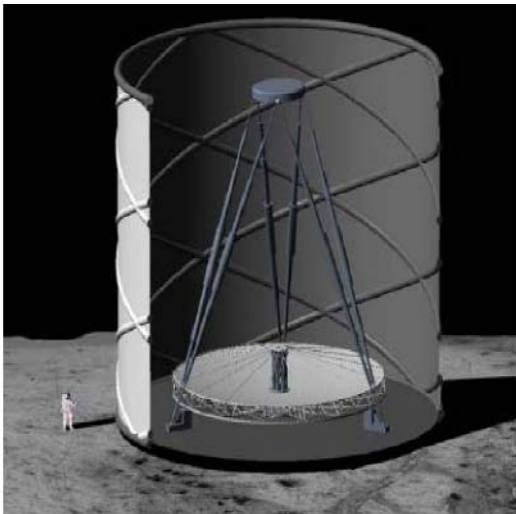


Figure 2.4.1. Conception artistique d'un grand télescope lunaire. (T. Connors, Univ. of Arizona)

La Lune offre plusieurs autres avantages : elle constituerait une plate-forme stable à long terme pour les télescopes, dont l'infrastructure pourrait profiter du soutien des nouvelles missions



lunaires prévues dans la Stratégie mondiale d'exploration en cours d'élaboration par les agences spatiales du monde.

En outre, la gravité de la Lune, qui est le 1/6 de celle de la Terre, permettrait l'emploi de nouvelles technologies pour construire des télescopes lunaires à grande ouverture dans les plages optique et infrarouge, à moindre coût que les télescopes spatiaux en vol libre ou en orbite. La Lune pourrait également offrir des avantages pour l'astronomie à d'autres longueurs d'onde. Par exemple, un radiotélescope situé sur la face cachée de la Lune serait libre des interférences dues aux transmissions radio sur Terre.

Dans les sections suivantes, nous présentons plusieurs questions scientifiques fondamentales que l'on tentera d'élucider avec les télescopes lunaires.

## RÉSUMÉ DES OBJECTIFS

SA-1 – Étudier la nature de la matière noire et de l'énergie sombre.

SA-2 – Déterminer le moment de formation des premières étoiles et galaxies et leurs propriétés.

SA-3 – Étudier l'évolution des galaxies et l'histoire de la formation des étoiles au fil du temps.

SA-4 – Étudier le mode de formation des étoiles et des systèmes planétaires ainsi que leurs propriétés physiques.

SA-5 – Déterminer si des planètes de type terrestre sont courantes et étudier les conditions de vie sur ces planètes.

## OBJECTIFS ET ÉTUDES

### Objectif SA-1 : Étudier la nature de la matière noire et de l'énergie sombre.

Au cours des dernières décennies, on a commencé à se faire une idée cohérente de l'histoire de l'Univers. Issu spontanément il y a environ 13,6 milliards d'années, l'espace a connu une expansion rapide au cours d'une période initiale d'« inflation » qui a duré environ  $10^{-30}$  secondes. À la fin de l'inflation, les particules élémentaires ont été créées et sont devenues la matière et le rayonnement que nous voyons aujourd'hui. C'était ce que l'on appelle le « Big Bang ».

Après cette brève mais intense période, l'univers a continué de s'élargir et de se refroidir, mais à un rythme plus lent, pour devenir transparent à la lumière quelque 400 000 ans plus tard. (Fig. 2.4.2).

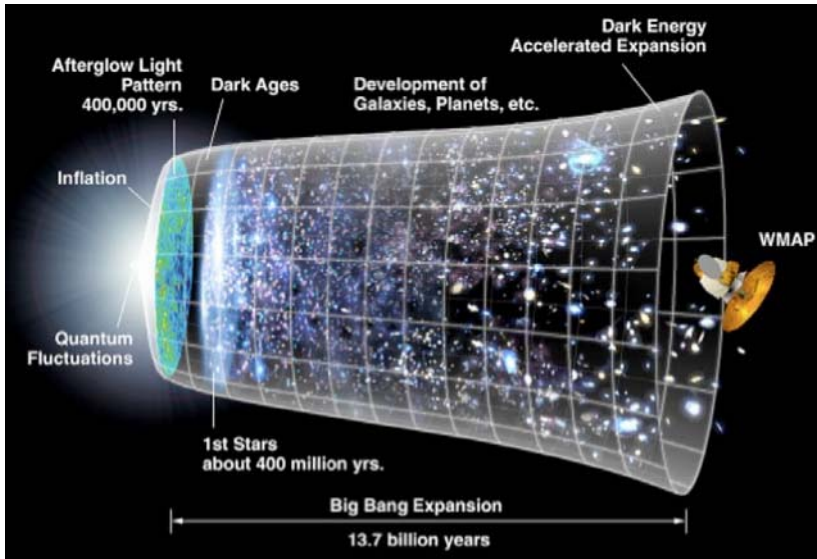


Figure 2.4.2. Histoire de l'Univers (NASA : équipe WMAP).

Anglais	Français
Quantum Fluctuations	Fluctuations quantiques
Inflation	Inflation cosmique
Afterglow...	Lueur du fond diffus cosmologique, après 400 000 ans
Dark Ages	Âges sombres
1st stars...	Premières étoiles, après env. 400 millions d'années
Development of Galaxies...	Formation des galaxies, des planètes, etc.
Dark energy...	Accélération de l'expansion de l'Univers par l'énergie sombre
WMAP	WMAP
Big Banf Expansion	Expansion de l'Univers
13.7 billions years	13,7 milliards d'années

Le gaz primordial produit par le Big Bang a rapidement commencé à s'agglutiner sous sa propre gravité, formant des objets lumineux chauds qui ont été les premières étoiles. Celles-ci, et les générations subséquentes d'étoiles, ont produit des éléments plus lourds par le biais des réactions nucléaires se produisant dans leur cœur, et ces éléments ont été éjectés dans tout l'espace par l'explosion des supernovae. Ces éléments sont devenus la matière constitutive des planètes comme la Terre.

On a récemment fait une découverte des plus remarquables : les étoiles, les planètes et les gaz diffus qui constituent la matière visible dans tous l'Univers ne représentent qu'une petite fraction de sa masse totale. Cette matière ordinaire (dite « baryonique ») représente environ 4 % de la densité totale de masse-énergie de l'Univers (Fig. 2.4.3). Un pourcentage plus important de masse, 22 %, serait une nouvelle forme de matière qui n'a pas encore été vue sur la Terre. Cette « matière noire » n'émet pas de lumière, mais sa présence est déduite de son influence gravitationnelle sur les mouvements des étoiles et des galaxies.

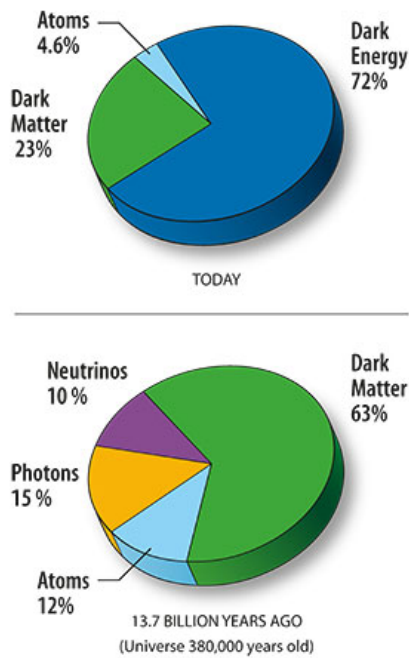


Fig. 2.4.3. Composition de l'Univers.  
(NASA/Équipe scientifique WMAP)

Anglais	Français
74 % Dark Energy	Énergie sombre : 74 %
22% Dark Matter	Matière noire : 22 %
4% Atoms	Atomes : 4 %

Encore plus surprenant est le fait que les données semblent indiquer fortement que 74 % de la masse totale de l'Univers se compose d'une nouvelle forme de matière aux propriétés très inhabituelles. La matière et l'énergie normales génèrent une force gravitationnelle qui est toujours attractive. Toutefois, cette nouvelle matière, appelée « énergie sombre », génère une force gravitationnelle répulsive. Cette énergie sombre est présente dans tout l'Univers et sa présence cause l'accélération de l'expansion de l'Univers.

La meilleure façon d'en savoir plus sur la nature de la matière noire et de l'énergie sombre, c'est d'installer de nouveaux télescopes dans l'espace ou sur la Lune.

#### Études :

1. Étudier les galaxies éloignées : La nature de la matière noire peut être sondée par l'étude des galaxies lointaines. La lumière émise par les étoiles de ces galaxies est déviée par le champ gravitationnel des amas de matière noire quand elle se déplace vers nous. Il en résulte de faibles distorsions de la forme apparente des galaxies (Figure 2.4.4).

Grâce à une analyse statistique de millions de galaxies, les scientifiques peuvent déterminer le degré d'agrégation de la matière noire, qui fournit d'importants indices sur sa nature. Ce type d'observation requiert un télescope offrant un large champ de vision et une excellente qualité d'image, ce qu'offrent les télescopes spatiaux ou lunaires.

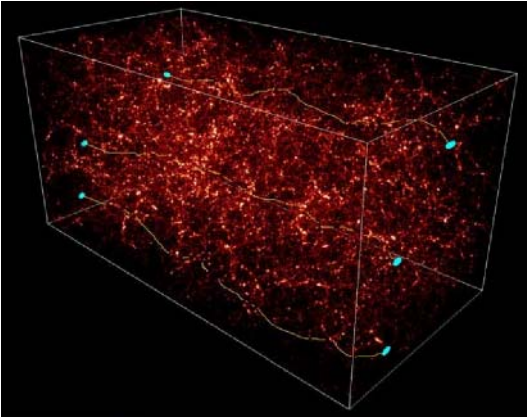


Fig. 2.4.4. L'effet de lentilles gravitationnelles, causé par les fluctuations de matière noire (orange), déforme les images des galaxies lointaines (cercles bleus), en augmentant leur ellipticité (S. Columbi, IAP).

2. Étudier l'expansion de l'Univers : L'énergie sombre peut être étudiée par son effet sur l'expansion de l'Univers. L'expansion entraîne une augmentation de la longueur d'onde de la lumière qui se propage dans l'Univers, appelé « décalage vers le rouge ». En mesurant le décalage vers le rouge en fonction de la distance des objets qui émettent cette lumière, il est possible de déterminer l'évolution de la vitesse d'expansion au cours du temps cosmique. Cela est lié à l'équation d'état de l'énergie sombre, c'est-à-dire la relation entre sa pression et sa densité d'énergie. Par conséquent, les mesures du décalage vers le rouge et de la distance des objets éloignés peuvent être utilisées pour tester les théories sur l'énergie sombre.

Ce type d'étude, qui emploie les supernovae (étoiles en explosion) comme « chandelles de référence », a conduit à la découverte que l'expansion de l'univers s'accélère. Au cours des dernières décennies, les scientifiques ont utilisé des télescopes sur Terre pour déterminer les décalages vers le rouge et les distances de plusieurs centaines de supernovae. L'extension de ces mesures à de plus grandes distances permettra de mieux valider les différents modèles d'énergie sombre, ce qui nécessitera un télescope spatial ou lunaire d'une grande sensibilité et avec un grand champ de vision.

### **Objectif SA-2 : Déterminer le moment de formation des premières étoiles et galaxies et leurs propriétés.**

Plusieurs centaines de millions d'années après le Big Bang, le gaz primordial qui remplissait l'univers s'est suffisamment refroidi pour être soumis à l'effondrement gravitationnel et former les premières étoiles (Figure 2.4.5). Ces premières étoiles étaient supermassives, leur masse étant d'une centaine de fois supérieure à celle du Soleil et leur vie était relativement courte.

Leur prodigieux rayonnement et l'énergie libérée par leur mort explosive ont réchauffé le milieu interstellaire, ce qui a créé des bulles de gaz ionisé en expansion. Cela a empêché la formation d'autres étoiles, car les gaz chauds résistent à l'effondrement gravitationnel. Seuls les amas d'étoiles les plus massifs avaient une attraction gravitationnelle suffisamment forte pour accréter les gaz et bâtir une population stellaire. Ces immenses collections d'étoiles et de gaz ont été les premières galaxies.

**Études :**

1. Ces premières galaxies devraient être détectables par le télescope JWST. Toutefois, il faudra disposer de la résolution et de la sensibilité d'un télescope spatial de 20 mètres pour révéler les premières étoiles et permettre l'étude détaillée des propriétés des premières étoiles et galaxies.

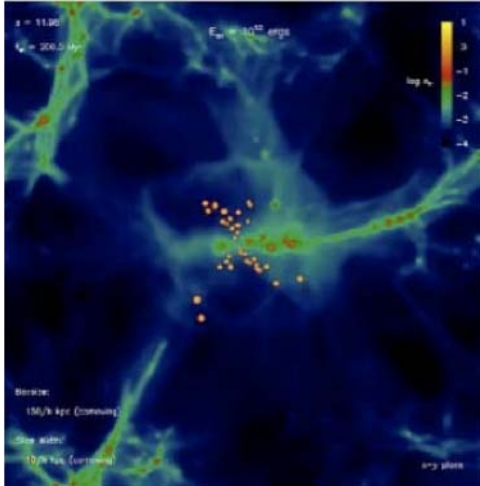


Figure 2.4.5. Simulation de la formation des premières galaxies, montrant la densité de gaz quelque 200 millions d'année après la formation des premières étoiles. Les points orange indiquent les explosions de supernovae (GREIF, T. H., et autres, Towards the first Galaxies, First Stars III: First Stars II Conference 2008).

**Objectif SA-3 : Étudier l'évolution des galaxies et l'histoire de la formation des étoiles au fil du temps.**

Au fil du temps, les galaxies ont augmenté de taille en avalant leurs voisins (Figure 2.4.6). Ces fusions de galaxies ont comprimé les gaz, ce qui a provoqué une intense formation d'étoiles. Nous ignorons quels processus ont produit le vaste éventail de types de galaxies qui sont visibles aujourd'hui. L'étude détaillée et à haute résolution spatiale des systèmes individuels nous permettra de mieux comprendre la physique de la formation et l'évolution des galaxies.

Le gaz primordial consistait presque entièrement en hydrogène et en hélium. Quand et comment les éléments plus lourds ont-ils été formés? Ces éléments sont produits dans les étoiles et dispersés dans le milieu interstellaire par les explosions de supernovae. Ainsi, en mesurant la vitesse à laquelle les étoiles se forment dans une large plage de temps cosmique, on peut déterminer le moment où l'essentiel de ces éléments a été formé.

**Études :**

1. Un télescope lunaire de 20 mètres, une centaine de fois plus sensible que le télescope spatial Hubble, permettra aux astronomes de déterminer le taux de formation d'étoiles depuis l'époque des premières galaxies jusqu'à aujourd'hui. Une décennie d'observations avec le télescope spatial Hubble a montré que le taux de formation d'étoiles était plus élevé dans le passé, lorsque l'Univers était plus dense d'un ordre de grandeur. Le télescope lunaire permettra aux

scientifiques d'étudier les décalages vers le rouge et la luminosité des galaxies très peu lumineuses, ce qui les aidera à déterminer l'histoire complète de la formation des étoiles dans l'Univers.

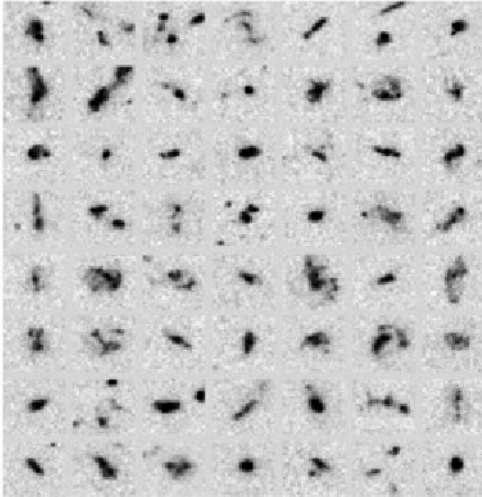


Fig. 2.4.6. Galaxies lointaines imagées par le télescope Hubble. Celles-ci sont beaucoup moins régulières que la Voie lactée, et on voit des formations éparses d'étoiles et la fusion de galaxies plus petites (C. Steidel, Caltech).

**Objectif SA-4 : Étudier le mode de formation des étoiles et des systèmes planétaires ainsi que leurs propriétés physiques.**

Les étoiles et les planètes se forment lorsque des nuages de gaz et de poussières interstellaires deviennent instables et s'effondrent sous l'effet de la gravitation (Figures 2.4.7 et 2.4.8). Les détails de ce processus ne sont pas bien compris, car il s'agit d'une interaction complexe mettant en cause la physique nucléaire, l'hydrodynamique, et les transferts d'énergie et de quantité de mouvement.

Nous sommes pour le moment incapables de répondre aux questions fondamentales, comme « qu'est-ce qui détermine la masse d'une étoile? » et « qu'est-ce qui détermine la masse et l'orbite des planètes? ».

**Études :**

1. Grâce à un télescope lunaire de grande ouverture (20 mètres ou plus), nous pourrions tenter de répondre aux questions sur le mode de formation des étoiles et des systèmes planétaires et leurs propriétés. Il faut faire des observations qui pénètrent les nuages moléculaires denses et poussiéreux, afin de voir comment les noyaux de systèmes stellaires s'effondrent en systèmes de plus petite taille. Cela nécessite des observations dans l'infrarouge à haute résolution spatiale et spectrale et à haute sensibilité.

Les télescopes au sol sont limités dans ce domaine, et même si le télescope spatial James Web permettra des avancées importantes, sa résolution spatiale et spectrale est limitée également. Un télescope lunaire permettrait d'étendre l'observation des systèmes protostellaires aux étoiles de faible masse, ce qui comblerait le fossé entre les étoiles et les planètes. L'observation directe des disques protoplanétaires autour de jeunes étoiles nous permettra de découvrir des planètes

nouvellement formées et d'étudier leur relation avec la poussière et les gaz environnants. Ainsi, nous pourrions mieux comprendre la physique de la formation planétaire.



Fig. 2.4.7. Le Grand Nuage de Magellan, une galaxie en orbite autour de la Voie Lactée. La concentration rougeâtre dans le coin gauche supérieur est la région de formation d'étoiles 80-Doradus (NASA).



Fig. 2.4.8. Image prise par le HST de la région de formation stellaire N1 1 B dans le Grand Nuage de Magellan. Ici, nous voyons de jeunes étoiles bleues et des nuages sombres qui contiennent de nouvelles étoiles et planètes en formation. (NASA, ESA et l'équipe Hubble Heritage – AURA/Sci).

**Objectif SA-5 : Déterminer si les planètes de type terrestre sont courantes et étudier les conditions de vie sur ces planètes.**

Près de 500 planètes extrasolaires ont été découvertes à ce jour. Ces planètes sont toutes beaucoup plus massives que la Terre, et elles ressemblent à Jupiter ou Neptune. Mais cela est dû aux limites des télescopes actuels – les planètes plus petites et moins massives sont plus difficiles à détecter. Les planètes ressemblant à la Terre (et donc dites « de type terrestre ») seraient courantes.

L'observation directe des planètes est entravée par la proximité de leur étoile hôte; vu à des distances comparables, le Soleil semble 1 010 fois plus brillant que la Terre. Certaines techniques ont permis l'observation de quelques grosses planètes (Figure 2.4.9), mais les planètes de type terrestre ne seront pas encore observables même avec la prochaine génération de très grands télescopes au sol.

**Études :**

1. Construire de nouveaux télescopes spatiaux ou lunaires pour découvrir et étudier des planètes terrestres. Comme les télescopes spatiaux n'ont pas à composer avec l'atmosphère, ils peuvent surmonter les limites dont souffrent les télescopes au sol. Les télescopes du type Terrestrial Planet Finder, un concept de mission actuellement à l'étude par la NASA, permettraient d'étudier les planètes de type terrestre. Un télescope comparable situé sur la Lune serait tout aussi efficace.
2. Construire de nouveaux télescopes spatiaux ou lunaires afin d'étudier la chimie des gaz interstellaires. Certaines molécules organiques prébiotiques ont déjà été détectées dans des régions de formation stellaire proches (Figure 2.4.10). Un télescope spatial ou lunaire de grand diamètre permettrait aux scientifiques de détecter des molécules plus complexes et de suivre la composition et la distribution de ces molécules à l'intérieur des systèmes protoplanétaires individuels.
3. La spectroscopie directe des planètes de type terrestre pourrait révéler la présence de molécules biologiques comme l'oxygène. Ce serait une preuve importante de la présence de vie sur ces planètes.

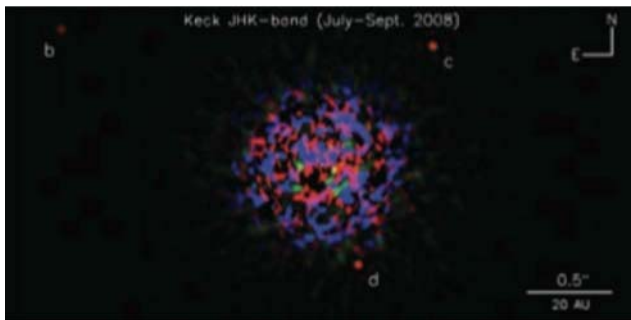


Fig. 2.4.9. Trois planètes joviennes (b, c, d) en orbite autour d'une étoile proche, HR 8799. La grande tache au centre est la lumière diffractée résiduelle de l'étoile centrale (Marois, C., et autres, Direct imaging of multiple planets orbiting the star HR 8799, 2008).

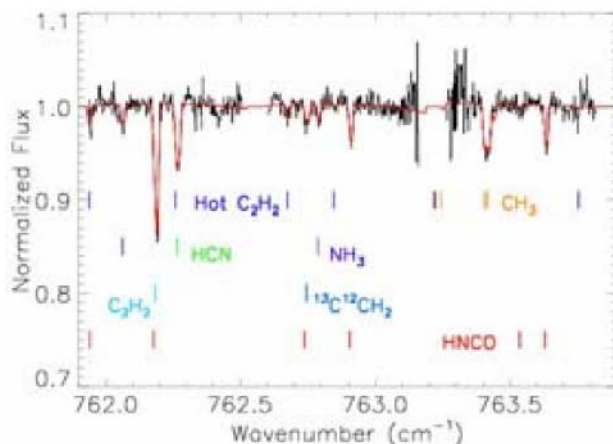


Fig. 2.4.10. Spectre infrarouge de la protoétoile massive NGC 7538 IRC 1, montrant des lignes d'absorption de molécules organiques. Ces molécules et d'autres molécules prébiotiques sont les précurseurs de la vie (KNEZ, C., et autres, 2005).



## 6 SYSTÈMES DE SURVIE AVANCÉS

Le but des systèmes de survie est de maintenir la vie durant les missions dans l'espace, principalement en fournissant de l'air, de l'eau et de la nourriture. Les systèmes de survie « avancés » de l'avenir amélioreront les systèmes actuellement utilisés dans les missions dans l'espace.

Dans la plupart des cas, des systèmes de survie biologiques, qui ont recours à des systèmes comme des plantes et des micro-organismes, sont proposés pour les futures missions dans l'espace de longue durée, en raison de leur capacité de recycler l'air, l'eau et la nourriture. Meilleure sera la capacité d'un système de survie de recycler les déchets de l'équipage et moins d'air, d'eau et de nourriture l'équipage devra transporter à bord.

Nous savons que les systèmes de survie biologiques fonctionnent parce qu'ils le font constamment ici sur Terre. Mais si nous voulons les utiliser dans les missions d'exploration du futur, nous devons déterminer leur adaptabilité dans de nouveaux environnements dans l'espace et sur d'autres planètes. Par exemple, ces environnements ont normalement une gravité et une pression atmosphérique plus faibles et des niveaux de rayonnement plus élevés que sur Terre – et ces facteurs peuvent altérer sensiblement la viabilité d'organismes biologiques.

Le Canada a commencé à mener des recherches sur les systèmes de survie biologiques dans l'espace au début des années 1990. Depuis, nos capacités ont augmenté énormément et le Canada est aujourd'hui le leader mondial en recherche sur les systèmes de survie biologiques et en développement de cette technologie. La croissance rapide de l'expertise du Canada est due à plusieurs facteurs, notamment à son secteur important et techniquement complexe de culture en serre qui s'est développé avec succès dans des conditions climatiques difficiles, à des stratégies bien planifiées de transfert de technologie entre les secteurs de la recherche et industriels et à un fort accent mis sur les collaborations internationales entre les chercheurs.

Certaines activités récentes, comme la contribution du compartiment des plantes supérieures de l'usine pilote MELiSSA de l'Agence spatiale européenne et la téléopération de la serre Arthur Clarke Mars Greenhouse dans le Haut-Arctique canadien, illustrent les capacités du Canada et peuvent s'appliquer directement aux systèmes de survie avancés (SSA).

Il existe également un fort potentiel au sein d'institutions et d'organisations canadiennes en ce qui a trait aux technologies de survie avancées directement applicables dans des domaines comme les stratégies de gestion horticole pour des cultures candidates, les milieux de culture, la transformation des aliments, la gestion de l'eau, la gestion de l'atmosphère, la gestion de l'énergie, l'imagerie, la gestion des déchets, les capteurs d'environnement, la thermorégulation, les systèmes d'éclairage, la robotique, le maniement des commandes et des données, les systèmes de communication, les structures, l'utilisation sur place des ressources, les milieux apparentés à l'espace et la conduite opérationnelle de mission.

La robotique spatiale constitue depuis déjà un bon moment un créneau clé du Canada et le pays peut continuer d'exceller dans ce domaine en l'appliquant aux futurs systèmes de survie biologiques dans l'espace. Les institutions canadiennes sont également fortement représentées dans les domaines de l'imagerie et des capteurs d'environnement, lesquels sont aussi nécessaires dans des systèmes de survie avancés.

En ce qui a trait à l'exploration spatiale du futur, la communauté canadienne de survie avancée centre ses travaux sur l'infrastructure pour les surfaces planétaires comme la Lune et Mars plutôt que sur des environnements de microgravité comme en orbite basse terrestre ou dans des astronefs s'éloignant de la Terre.

Nous proposons plusieurs éléments de la surface lunaire qui permettront au Canada de faire pousser les premières plantes sur une autre planète, d'explorer des aspects scientifiques importants de la culture de plantes dans l'environnement radioactif et gravitationnel lunaire et de faire les premiers pas vers la création de systèmes de production de plantes à plus grande échelle. Cette expérience permettrait au Canada de développer un système de survie biologique qui pourrait fournir une partie de l'air, de la nourriture et de l'eau dont les équipages d'exploration auront besoin pour survivre sur d'autres planètes.

Il serait difficile de développer ces systèmes lunaires sans qu'il y ait un progrès correspondant des technologies apparentées sur la Terre. Des institutions canadiennes ont déjà créé une chambre de culture de plantes en collaboration avec des universités européennes. La capacité opérationnelle technique des systèmes pour les missions lunaires proposées peut être augmentée en améliorant ces technologies terrestres.

Plusieurs autres développements terrestres sont également requis, dont des installations pour télécommander des systèmes terrestres et spatiaux de survie avancés, pour intégrer et tester ces systèmes et pour initier les astronautes et les contrôleurs au sol à leur mode d'emploi. Ces installations réduiraient les risques techniques et financiers associés au développement de systèmes pour les surfaces planétaires.

Les activités canadiennes en survie avancée ont déjà connu du succès en transfert de technologie terrestre et dans la formation de personnel hautement qualifié et ces aspects seront au cœur des recherches à venir sur les systèmes dans l'espace. Les systèmes spatiaux doivent surmonter de nombreux défis liés aux limites de réapprovisionnement et des ressources, aux conditions environnementales et au temps limité de l'équipage. La solution de ces problèmes profitera également aux systèmes terrestres, lesquels doivent surmonter de nombreux défis semblables. Par exemple, les systèmes de survie avancés dans l'espace requerront d'importantes capacités en robotique et en gestion de l'énergie et l'application de ces technologies aidera les serriculteurs canadiens à réduire leurs deux coûts les plus importants, soit la main-d'œuvre et l'énergie.

L'effet d'entraînement de la technologie de l'espace peut aussi aider les cultivateurs terrestres à faire face aux lois et règlements environnementaux récents. En particulier, les serriculteurs canadiens doivent adopter des technologies de recyclage de l'eau ou alors investir dans des systèmes de traitement sur place des eaux usées pour se conformer aux récentes lois sur la gestion des nutriments.

Les systèmes de survie biologiques dans l'espace exigeront qu'on puisse recycler la plus grande partie de la production de déchets humains reliés aux systèmes d'air, d'eau et de nourriture tels que le dioxyde de carbone, les eaux usées et la biomasse non comestible. Par conséquent, les solutions efficaces pour minimiser l'utilisation des ressources et les déchets seront éminemment transférables au secteur terrestre.

Parmi les autres avantages de la feuille de route canadienne proposée en matière de survie avancée, citons la conception de systèmes adaptés de production de plantes en usine pour les communautés éloignées et nordiques, une meilleure sécurité alimentaire, des édifices verts, le biocontrôle des ravageurs des plantes et une utilisation plus efficace de l'eau.

La recherche sur la survie avancée comporte également un important potentiel éducatif, comme l'a montré le grand succès du projet Tomatosphère, grâce auquel on distribue des graines de tomates exposées à la microgravité ou à un environnement simulant la surface de la planète Mars dans des milliers de classes d'écoliers au Canada.

## **BUT**

**Permettre l'exploration planétaire humaine soutenue grâce à des percées technologiques assurant l'alimentation de l'équipage, le régénération de l'air et le recyclage de l'eau potable.**

Le but intrinsèque d'un système de survie est de maintenir la vie d'équipages en mission dans l'espace. Pour atteindre ce but, la communauté canadienne de survie avancée centre ses efforts sur le développement de technologies et d'applications novatrices qui augmenteront notre capacité d'exploiter les systèmes de survie biologiques en améliorant la fiabilité des systèmes et en augmentant l'autonomie en air, en nourriture et en eau.

Nous prôtons une stratégie cumulative pour faire progresser la technologie de survie avancée, en commençant par des activités terrestres menant à des recherches dans l'espace.

## **SOMMAIRE DES OBJECTIFS**

SA-1 : BANCS D'ESSAI TERRESTRES DE SYSTÈMES DE SURVIE

SA-2 : SYSTÈME CANADIEN DE SURVIE AVANCÉ ADAPTABLE AUX CONDITIONS LUNAIRES

## **OBJECTIFS ET ÉTUDES**

### **OBJECTIF SA-1 : BANCS D'ESSAI TERRESTRES DE SYSTÈMES DE SURVIE**

#### ***1. Utilisation de chambres de culture :***

Cette activité tirera profit de l'expertise et des infrastructures canadiennes actuelles tout en améliorant les collaborations au sein de la communauté canadienne de survie avancée. Le but est de rendre l'infrastructure de culture de plantes ordinaires accessible aux institutions participantes partout au pays et à l'étranger, en utilisant à la fois l'infrastructure existante et de nouveaux systèmes.

La recherche dans ces installations sera centrée sur :

- des études de caractérisation des aliments pour évaluer la qualité et la production de cultures candidates dans des conditions opérationnelles, comprenant une pression variable, les compositions atmosphériques, la source de lumière, etc.
- des études sur les exigences génétiques (p. ex. tolérance à une lumière faible et autres adaptations au stress environnemental, architecture de la plante, attributs nutritionnels, etc.).
- développements et applications technologiques novateurs tels que des protocoles de recyclage, des capteurs et des techniques de contrôle des pathogènes qui ne laissent aucun résidu toxique.

Des procédures opérationnelles standard seront élaborées pour les institutions participantes, permettant des comparaisons directes des études.

Ces études bénéficieront des collaborations de recherche existantes entre l'université de Guelph, l'université de Gand en Belgique, l'université de Berne en Suisse et l'université de Naples en Italie, centrées sur la caractérisation des aliments et sur des essais de production de plantes dans les quatre pays. D'autres partenaires internationaux pourraient se joindre à des études semblables.

#### ***2. Installations de contrôle terrestres***

La communauté canadienne de survie avancée se propose de créer une série d'installations décentralisées de commande et de contrôle pour contrôler les systèmes de survie avancés terrestres et spatiaux. Ces centres de contrôle permettront aux institutions canadiennes qui possèdent une expertise pertinente en survie avancée de suivre et de contrôler les éléments d'infrastructure proposés. Des infrastructures existantes comme le Centre de télé-exploitation de charges utiles de l'ASC pourraient être utilisées comme premiers éléments.

### **3. Banc d'essai terrestre de systèmes de survie intégrés**

Cette installation serait utilisée pour intégrer les diverses capacités requises pour les systèmes de survie biologiques dans l'espace. Dans de nombreux cas, ces capacités ont été reconnues isolément, mais n'ont pas encore été intégrées dans un système de production de plantes.

Cette installation permettrait de tester ces capacités ensemble et, ainsi d'aborder les questions d'intégration et d'interface, ainsi que d'architectures de culture (c.-à-d. d'optimiser les systèmes de production et la disposition des cultures pour des systèmes en environnement contrôlé). Elles fourniraient également des données sur le fonctionnement global du banc d'essai et permettraient ainsi de formuler de meilleures estimations touchant la taille et les exigences d'un système de culture sur la Lune de faible masse et peu énergivore.

L'installation proposée serait située dans un endroit accessible (p. ex. au siège de l'ASC) où les chercheurs canadiens pourraient apporter leurs systèmes pour des essais intégrés. Le potentiel de transfert de technologie terrestre et de formation d'un personnel hautement qualifié dans une telle installation serait important.

### **4. Centre terrestre intégré de formation et de simulation**

Comme les systèmes de survie avancés sont conçus pour aider des équipages humains, il faut de toute évidence vérifier ces systèmes sur Terre avec des êtres humains avant toute mission dans l'espace. La feuille de route ci-dessous propose la construction d'une installation pour mener des tests humains intégrés. Cette installation pourrait être érigée à un site du Réseau canadien de recherche analogue (RCRA), afin de répondre aussi aux besoins des communautés scientifiques voisines qui s'intéressent aux milieux s'apparentant à l'espace et à d'autres domaines scientifiques associés tels que la médecine appliquée dans l'espace, l'astrobiologie et la géologie.

Un centre terrestre intégré humain de formation et de simulation est nécessaire parce qu'il :

- offrira un environnement pour définir des exigences réalistes des systèmes
- fournira des flux de déchets métaboliques et des dynamiques de systèmes réels
- vérifiera les débits des systèmes de survie et leur acceptabilité pour des êtres humains
- étudiera les questions d'intégration
- étudiera les questions d'habitabilité pertinentes (caractère adéquat des installations, maintenabilité, temps des membres d'équipage).

En outre, une telle installation apporterait une formation unique aux astronautes et contrôleurs terrestres dans l'utilisation des systèmes de survie avancés. Ce travail requerra probablement des partenariats internationaux, étant donné que le développement de systèmes de survie humains intégrés de haute fidélité exige des fonds considérables et pose de grands défis en matière de sécurité.

## **OBJECTIF SA-2 : SYSTÈME CANADIEN DE SURVIE AVANCÉ ADAPTABLE AUX CONDITIONS LUNAIRES**

### **1. Module lunaire de culture végétale**

La feuille de route comprend un module d'alunissage robotique pour faire pousser la première plante sur un autre corps céleste. Cette contribution prendrait vraisemblablement la forme d'une charge utile dans une mission menée avec des partenaires internationaux. Elle comporterait un système simplifié – semis d'arabette cultivés sur plaque de gélose – pour démontrer la faisabilité d'une culture sur la surface lunaire et améliorer notre compréhension des effets de l'environnement lunaire sur la croissance végétale. En particulier, cette étude utiliserait un système de télé-imagerie (fluorescence) pour déterminer les effets du rayonnement lunaire sur les semis.

Cette mission à court terme aiderait à mobiliser et à constituer la communauté canadienne ainsi qu'à établir d'importantes collaborations internationales.

## **2. Machine à salade lunaire**

Une « machine à salade » constituerait une transition entre un système non intégré dans le système de survie humaine et un système sur lequel l'équipage pourrait compter pour ses contributions modestes à la survie et ses bienfaits psychologiques. En particulier, plusieurs études et témoignages d'équipages ont montré que les plantes peuvent apporter un soutien psychologique aux équipages en station éloignée et dans les missions en orbite basse terrestre. Dans les premières phases, surtout pour les missions sur la Lune, les systèmes de survie de base seront des systèmes physico-chimiques qui incorporent des processus physiques et chimiques non biologiques pour recycler les produits périssables.

Une machine à salade lunaire apporterait une plus grande confiance dans les systèmes de survie biologiques sur la Lune. Elle utiliserait également un système de culture incorporant certaines des technologies qui seraient plus tard utilisées pour créer un système de production végétale lunaire à plus grande échelle. En particulier, elle utiliserait des éléments modulaires semblables à ceux qui serviraient plus tard dans le Système canadien de survie avancé adaptable aux conditions lunaires.

## **3. Système canadien de survie avancé adaptable aux conditions lunaires (CanALSS)**

Les systèmes de survie biologiques sont conçus pour permettre une exploration planétaire humaine soutenue et réduire les besoins de réapprovisionnement de la Terre. Le Système canadien de survie avancé adaptable aux conditions lunaires (CanALSS) aiderait à atteindre cet objectif en fournissant une partie de l'air, de la nourriture et de l'eau nécessaires à l'équipage.

Les technologies modulaires développées au cours des étapes cumulatives antérieures et les éléments proposés amélioreraient l'état de préparation de la technologie et le degré de confiance pour ce système de culture à plus grande échelle. Ce système serait une contribution importante à l'infrastructure lunaire et, en retour, apporterait au Canada un meilleur accès à d'autres possibilités de lancement, aux résultats de la science lunaire et à des affectations d'astronautes canadiens dans les équipages.

Il est proposé que cet élément soit à la fois modulaire et adaptable et il prendra progressivement de l'ampleur au fil des déploiements d'infrastructure sur la Lune. Cela apportera des améliorations continues dans l'autonomie en air, en nourriture et en eau pour les avant-postes lunaires ou même pour des colonies humaines de longue durée sur la Lune.

La Lune servira à la communauté internationale de banc d'essai pour Mars et cela s'appliquera de même au développement de systèmes canadiens de survie avancés. Les systèmes conçus pour la Lune seraient élaborés en vue d'une mission sur Mars et seraient facilement adaptables à l'exploration humaine sur Mars. Ces étapes mettraient le Canada sur la voie du développement de systèmes de survie biologiques ayant une masse recyclée modérée d'ici 2050. L'objectif est d'atteindre un recyclage de 50 % de la nourriture et des niveaux considérablement plus élevés pour l'air et l'eau.

Ce programme permettrait au Canada d'établir très tôt sa présence sur la Lune avec des systèmes biologiques et fournirait d'excellentes occasions de transfert de technologie terrestre, de formation de personnel hautement qualifié et de rayonnement éducatif.

## **BIENFAITS POUR LES CANADIENS**

Les progrès des capacités du Canada en matière de systèmes de survie avancés offriront un important potentiel de transfert de technologie sur terre. Cet aspect a été la pierre angulaire du financement actuel de la recherche et du développement technologique dans les systèmes de survie avancés. Ainsi, il y a un lien direct entre le développement technologique spatial et terrestre. Parmi plusieurs exemples notables, citons :

- des améliorations de l'efficacité de la main-d'œuvre et énergétique dans les serres
- des stratégies de gestion horticole robotisées
- des stratégies de conformité environnementale dans les secteurs agroalimentaires
- des technologies de production de plantes pour les communautés nordiques et éloignées recherchant une plus grande autonomie dans la production et la distribution alimentaire

- des édifices « verts » et la biofiltration de l'air intérieur pour atténuer le syndrome des bâtiments malsains
- une meilleure sécurité alimentaire grâce à des technologies non toxiques de désinfection des résidus
- le biocontrôle des ravageurs des plantes et l'efficacité de l'utilisation de l'eau
- des protocoles de recyclage de l'eau et des déchets
- la technologie de capteurs d'ions dans les systèmes de gestion des nutriments
- des stratégies touchant les matières recyclables et la gestion du recyclage
- l'éducation et la vulgarisation, la sensibilisation aux sciences et à la science spatiale.

## FEUILLE DE ROUTE CANADIENNE EN SURVIE AVANCÉE

Les efforts canadiens en matière de survie avancée sont centrés sur l'exploration planétaire humaine durable grâce à des percées technologiques touchant l'autonomie alimentaire, la régénération de l'air et le recyclage de l'eau. Des discussions au sein de la communauté de SA, des études et les résultats des discussions en petits groupes lors de l'atelier CSEW6 ont aidé à produire une feuille de route pour la recherche et le développement en systèmes de survie avancés au Canada jusqu'en 2030 (Figure 1).

Il est présumé que, en 2030, il existera sur la Lune un système de production végétale capable de répondre à une partie (p. ex. 5-10 %) des besoins de survie d'un équipage. La progression de ce système opérationnel, à l'objectif d'un système de production végétale planétaire en 2050 capable d'assurer au moins 50 % d'autonomie alimentaire sera principalement atteint grâce à l'expérience opérationnelle obtenue de ce système, lequel sera modulaire, ce qui permettra une extension pour assurer une contribution croissante aux exigences de survie. Ces jalons sont fondés sur des percées progressives des technologies et des applications venant appuyer les initiatives d'exploration spatiale.

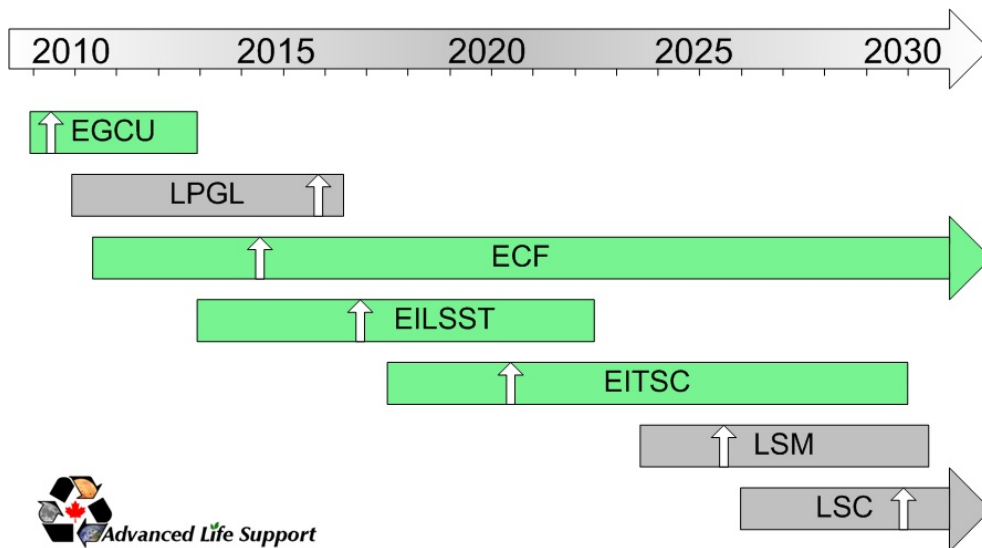


Figure 1 : Feuille de route du système canadien de survie biologique (Légende : Utilisation de la chambre de culture terrestre (UCCT), Installations de contrôle terrestres (ICT), Banc d'essai terrestre de systèmes de survie intégrés (BETSSI), Centre terrestre intégré de formation et de simulation (CTIFS), Module d'atterrissage lunaire de culture de plantes (MALCP), Machine à salade lunaire (MSL), Système canadien de survie avancé adaptable aux conditions lunaires (SAL). Les flèches verticales représentent le début des opérations de pleine installation ou des dates de lancement)

## 7 MÉDECINE SPATIALE OPÉRATIONNELLE

Le groupe de médecine spatiale opérationnelle (MSO) est le corps médical de l'Agence spatiale canadienne (ASC) responsable de la santé et de la sécurité des astronautes canadiens. Le groupe de MSO utilise l'expertise de la communauté canadienne des sciences médicales en vertu de contrats ou de protocoles d'entente et les commentaires de cette communauté forment le gros de cette section du rapport.

Les principales fonctions du groupe de MSO sont :

- les opérations médicales – apporter un soutien clinique et médical opérationnel aux astronautes canadiens
- participer à des projets visant à élaborer des concepts, technologies et procédures en médecine pour améliorer le rendement et pour diagnostiquer, prévenir et traiter des maladies et blessures
- développer et encourager l'expertise canadienne en médecine aérospatiale.

Comme le travail en MSO est centré sur le bien-être individuel, l'approche scientifique de ce groupe diffère de celle d'autres disciplines. Les astronautes canadiens étant ses principaux « clients », les objectifs du groupe de MSO en exploration de l'espace sont mieux vus comme des objectifs médicaux de réduire les risques connus pour la santé humaine durant les vols dans l'espace.

La communauté médicale canadienne a beaucoup à offrir au programme international d'exploration humaine de l'espace en matière de connaissances et d'expertise, de capacité de recherche et de développement de technologie médicale. Ces forces sont applicables tant dans l'espace que dans des milieux terrestres éloignés.

La médecine spatiale a été reconnue comme une composante importante d'un programme d'exploration canadien équilibré lors d'un atelier parrainé par l'ASC intitulé *Exploration Canada 2006 : Consultations sur les contributions du Canada à l'exploration scientifique, humaine et robotique du système solaire*. Au même moment, le groupe de MSO de l'ASC a fait appel à la communauté médicale pour mener sa propre étude de « besoins et capacité » centrée sur les soins médicaux nécessaires pour les missions humaines de longue durée dans l'espace. Cette étude priorisait les besoins en soins médicaux et les solutions possibles pour les missions sur la Lune et sur Mars.

L'étude de besoins et de capacité a retenu les défis suivants pour les missions de longue durée :

- contrôle du rayonnement et protection
- aspects psychosociaux et comportementaux
- effets de la microgravité et de la gravité réduite et contre-mesures correspondantes
- maintien de la santé et soins médicaux de l'équipage, comprenant les technologies de diagnostic, de surveillance et de traitement ainsi que la formation clinique et le maintien des aptitudes des fournisseurs de soins médicaux à l'équipage
- soutien par télémédecine.

L'étude a également déterminé la capacité actuelle du Canada (tant technologique que non technologique) de répondre aux besoins particuliers du programme d'exploration spatiale. On a notamment jugé que bon nombre des solutions pour les problèmes d'ordre médical reliés à l'espace étaient également applicables dans la prestation de soins médicaux en régions éloignées au Canada.

Après analyse de la capacité du Canada, les trois domaines suivants ont été retenus comme domaines clés pour les efforts et le financement futurs :

- programmes de formation médicale et de maintien des compétences pour les fournisseurs de soins de santé à distance
- programmes de télémédecine, comprenant une capacité de téléconsultation en temps réel et asynchrone
- développement de technologies pour des soins médicaux autonomes dans des milieux éloignés.

Par conséquent, les résultats d'études et de projets antérieurs ont confirmé l'importance pour la communauté canadienne de médecine de l'espace des trois volets fondamentaux : la technologie, la télémédecine et la formation. Les travaux à venir qui auront des objectifs interdisciplinaires dans ces domaines, et d'autres, ajouteront à la valeur de ces efforts.

## **SOMMAIRE DES OBJECTIFS RETENUS AU CSEW6**

MSO-1 Formation clinique et maintien des compétences des fournisseurs de soins médicaux à l'équipage

MSO-2 Soutien par télémédecine

MSO-3 Technologies et procédures de surveillance, de diagnostic et de traitement

MSO-4 Comportement et rendement humains

MSO-5 Physiologie et biologie humaines de base et contre-mesures.

## **OBJECTIFS ET ÉTUDES**

**Objectif MSO-1 : Formation clinique et maintien des compétences des fournisseurs de soins médicaux à l'équipage.** *Quel est le meilleur moyen de former les fournisseurs de soins médicaux à l'équipage affectés à des missions de longue durée et de maintenir leurs compétences médicales ?*

Les équipages en missions d'exploration au-delà de l'orbite basse terrestre requerront un degré élevé d'autonomie médicale. Cela sera particulièrement important lors des expéditions vers Mars en raison du long retard dans les communications interactives (synchrones) avec la Terre. Bien que certaines formes de consultation avec des experts sur terre seront toujours possibles, il sera essentiel de doter les équipages d'exploration de compétences médicales et d'outils avancés qui leur permettront de surveiller, diagnostiquer et traiter et aussi prévenir par eux-mêmes les maladies et blessures, y compris les urgences à durée critique et mettant la vie en danger.

Sur les vols de longue durée, il est probable qu'au moins un astronaute sera désigné comme médecin d'équipage, responsable des soins de santé des astronautes de la mission. Il est nécessaire de concevoir un programme de formation pour ces médecins d'équipage, afin d'assurer qu'ils auront les connaissances et les compétences requises. Les sujets relatifs à la médecine spatiale pourraient constituer un volet intégré d'un nouveau programme de formation en télémédecine qui formerait également des fournisseurs de soins terrestres de manière à ce qu'ils puissent fonctionner de façon autonome dans des régions éloignées.

La première étape d'un tel programme, soit l'établissement d'un cursus initial, est déjà réalisée. Les prochaines étapes, dont sa mise en place, exigeront qu'on fixe des objectifs d'apprentissage détaillés, qu'on élabore un programme continu, et qu'on évalue à la fois des participants et de l'efficacité du programme.

Ce travail pourra tirer profit de l'expertise maintenant bien établie du Canada en télémédecine, en télémentorat et dans l'utilisation de milieux apparentés comme les endroits éloignés dans l'Arctique, comparables par certains aspects aux environnements dans l'espace.



Le Canada est déjà un leader mondial dans les formes novatrices d'éducation en soins de santé et possède une vaste expérience en simulation et formation en robotique spatiale.

Les progrès dans la formation en télémédecine profiteront non seulement aux astronautes, mais également aux Canadiens sur terre. La géographie du Canada et sa faible population créent un besoin concret de fournisseurs de soins de santé à distance bien formés. À l'heure actuelle, cependant, il existe des lacunes dans la fourniture de formation à ces personnes. L'atteinte d'une excellence de classe mondiale dans ce type d'enseignement et la formation de fournisseurs de soins de santé hautement qualifiés pouvant fonctionner de façon autonome dans des milieux éloignés sont aussi conformes aux objectifs du gouvernement du Canada en matière de sciences et de technologie.

En plus de profiter directement aux Canadiens sur Terre, cette recherche permettra au Canada de mettre en valeur la compétence de ses fournisseurs de soins de santé à distance et l'expertise du Canada en simulation et en robotique pour renforcer sa réputation internationale et faciliter sa participation à des projets internationaux d'exploration spatiale de grande envergure.

**Études :**

1. recueillir des données sur l'incidence et la prévalence d'événements médicaux en milieu éloigné, dans les sites apparentés et à bord de la Station spatiale internationale
2. concevoir des prototypes de scénarios de formation et mener des études de validation avec des facultés de médecine et des sites apparentés
3. évaluer l'efficacité et l'efficience de la formation en matière d'acquisition et de rétention de compétences
4. étudier l'utilisabilité et l'utilité de technologies de télésanté, comprenant le matériel, les logiciels et l'infrastructure (p. ex. la télé-échographie)
5. vérifier à quel degré les systèmes d'apprentissage informatisés, les simulations et l'expérience clinique permettent aux fournisseurs de soins de santé de retenir et d'appliquer les compétences opératoires apprises dans des environnements réels.

**Objectif MSO-2 : Soutien par télémédecine.** *Quelles sont les façons les plus efficaces d'utiliser les technologies télémédicales pour maintenir la santé des astronautes dans les missions de longue durée ?*

Nonobstant la nécessité d'augmenter l'autonomie médicale des équipages de missions de longue durée dans l'espace, il faut aussi permettre aux équipages éloignés de consulter des experts et mentors médicaux sur terre et de recevoir un enseignement continu pour maintenir leurs compétences, au moyen de communications à la fois en temps réel et asynchrones.

L'expérience dans des sites apparentés comme des stations dans l'Antarctique a montré que même les médecins les plus chevronnés ont parfois besoin de consulter un soutien médical. Pour les missions sur Mars, un important défi sera l'absence de communications en temps réel avec la Terre en raison de la distance que les signaux devront parcourir entre les deux planètes.

L'utilisation de communications asynchrones ou en mode différé (les données sont stockées puis envoyées plus tard) dans cette situation demeure un sujet de préoccupation qui mérite d'être approfondi. La technique du stockage de données et de leur envoi ultérieur mérite d'être étudiée davantage.

Les percées dans les technologies et programmes de téléconsultation amélioreront également les soins de santé donnés aux personnes vivant dans des endroits isolés ou mal desservis sur Terre.

**Études :**

1. Des études de validation à des sites apparentés sont nécessaires pour évaluer et confirmer la fonctionnalité d'appareils utilisés en téléconsultation. Les facteurs clés sont le temps de transmission des données, la qualité de l'image numérique (p. ex. sonogrammes) et la qualité du son pour des appareils auditifs (p. ex. stéthoscopes).
2. Des études de validation à des sites apparentés pour confirmer l'efficacité de la prestation de soins médicaux en évaluant les résultats médicaux et donc le succès de la prise en charge médicale.

**Objectif MSO-3 : Technologies et procédures de surveillance, de diagnostic et de traitement.** *Quelles sont les meilleures méthodes d'imagerie diagnostique, de diagnostic en laboratoire, de surveillance et chirurgicales pour préserver la santé de l'équipage et traiter les maladies et les blessures dans les missions de longue durée ?*

Le but est de concevoir, de valider et d'éprouver des technologies qui peuvent servir à diverses fins et qui sont flexibles, échelonnables et intégrées (c.-à-d. modestes et polyvalentes). Ces critères faciliteront l'adaptation de ces technologies à de nombreux environnements médicaux dans l'espace et sur Terre et aideront à les rendre compatibles avec la télémédecine.

Certaines technologies – par exemple, l'échographie diagnostique – sont presque prêtes pour une utilisation dans les missions dans l'espace. D'autres sont plus récentes dans ce contexte et devront être étudiées plus en profondeur.

Il est également important de continuer à améliorer la capacité d'utiliser les techniques chirurgicales les moins invasives (p. ex. la laparoscopie). Une meilleure compréhension de l'utilisabilité d'applications robotiques pour les soins médicaux dans l'espace aurait également d'intéressantes retombées sur Terre. Cela permettrait à la communauté médicale de participer aux discussions sur d'importants paramètres de mission comme les exigences en matière de masse, de puissance et de volume et de profiter des occasions de participer à des missions qui pourraient se présenter une fois que ces paramètres seront définis.

Le Canada est reconnu pour avoir à la fois conçu de nouvelles technologies médicales et proposé des utilisations inédites des technologies médicales existantes. Il est déjà un chef de file dans l'utilisation de la télé-échographie et de systèmes robotisés pour pratiquer des interventions chirurgicales minimalement invasives.

Les études suivantes recourraient à divers lieux et plateformes, dont des laboratoires terrestres et des sites apparentés, des vols paraboliques en avions et des missions à destination de l'ISS.

**Études :**

1. Évaluer et démontrer la faisabilité de l'utilisation de diverses technologies pour prévenir, surveiller, diagnostiquer et traiter des problèmes médicaux lors de missions dans l'espace
2. Évaluer le matériel et les procédures
3. Évaluer le rendement de l'opérateur et du matériel
4. Évaluer la rétention de l'opérateur et le transfert de compétences entre les scénarios
5. Confirmer et évaluer les résultats chez les patients.

**Objectif MSO-4 : Comportement et rendement humains.** *Quels sont les meilleurs moyens de suivre, évaluer, maintenir et améliorer le rendement humain dans l'espace ?*

Durant les missions de longue durée dans des milieux isolés et dangereux, il sera important de surveiller et d'évaluer le rendement, le comportement et la santé psychologique des membres de l'équipage. Le but est non seulement de prévenir les baisses de rendement et les problèmes de comportement, mais aussi de trouver des moyens d'améliorer le rendement dans des circonstances aussi exigeantes.

La communauté internationale de médecine dans l'espace a reconnu ce besoin, mais n'a pas encore pu élaborer les outils ou le matériel nécessaires. Ce qui est requis est la capacité de suivre et d'évaluer les habiletés cognitives en utilisant une méthode pratique directe de collecte de données, par exemple les simulations de tâches robotiques plutôt que des tests papier-crayon. Il est permis de croire que la collaboration d'autres pays suivrait si le Canada prenait l'initiative.

Un outil pratique d'évaluation conçu pour les missions dans l'espace pourrait s'appliquer dans d'autres domaines sur Terre où les conséquences d'erreurs dans des situations de grand stress sont importantes, par exemple en médecine et chirurgie et en aviation. Ce volet favoriserait également des partenariats fondés sur des facteurs multiculturels et multinationaux.

**Études :**

1. Études terrestres comparant l'efficacité des stratégies directes et des stratégies papier-crayon plus traditionnelles pour juger du rendement
2. Évaluations des effets de la rétroaction sur l'amélioration du rendement (autrement dit : la rétroaction entraîne-t-elle une amélioration du rendement?)
3. Validation de ces résultats dans des sites apparentés et dans la Station spatiale internationale.

**Objectif MSO-5 : Physiologie et biologie humaines de base et contre-mesures.** *Quel est le meilleur moyen d'établir des programmes de contre-mesures personnelles pour les équipages dans l'espace permettant de palier les effets de la microgravité et de l'environnement restreint dans l'espace ?*

Des améliorations de la capacité de surveiller les effets de l'environnement spatial sur le corps humain nous permettront de recueillir des données médicales plus complexes et plus individualisées. Ces données pourraient être utilisées pour élaborer un programme de contre-mesures personnalisées pour chaque astronaute, suivant sa biologie personnelle. L'approche « taille universelle » pour les contre-mesures ne prend pas en compte la variabilité entre les personnes.

Il est également important d'adopter une approche intégrée des contre-mesures qui embrasse tous les effets physiologiques et psychologiques de l'environnement spatial sur le corps humain. La capacité du Canada de développer des contre-mesures cardiaques, musculaires et squelettiques ainsi que les capacités en radiobiodosimétrie et en séquençage génétique qui se sont développées rapidement à la suite de l'épidémie du SRAS offrent au Canada une excellente occasion d'établir un créneau dans les contre-mesures personnalisées.

En s'appuyant sur ces forces en recherche, le Canada peut faire avancer la compréhension scientifique de la physiologie humaine et la prévention et le traitement des maladies. L'accent mis sur la prévention et les soins personnalisés peut mener à des améliorations de la prestation de soins de santé tant dans l'espace que sur la Terre.

Ce travail favorisera également des partenariats entre la médecine de l'espace et les communautés scientifiques qui étudient les sciences de la vie, le rayonnement ainsi que le comportement et le rendement humains.

**Études :**

1. Études en laboratoire sur terre
2. Sites terrestres apparentés
3. Vols paraboliques
4. Missions à bord de l'ISS.

**NOTE AU SUJET DES ÉTUDES :**

**Le groupe de MSO a comme mandat d'assurer la santé et la sécurité des astronautes. Cela signifie que les études portant sur les objectifs de médecine spatiale doivent être menées par étapes et validées, s'il y a lieu, avant qu'on procède à des tests humains.**

Les plateformes suivantes ont été retenues comme étant les plus indiquées à court et à moyen terme pour permettre les types d'études nécessaires pour atteindre les objectifs en médecine spatiale. Voici des exemples d'études appropriées associées à chaque type de plateforme.

- **Terrestres en milieu non apparenté** (p. ex. laboratoires) : tâches robotisées pour valider le comportement et le rendement humains
- **Environnements apparentés :**
  - terrestres (p. ex. île Devon, environnement arctique) : communications, simulation, formation, réalité virtuelle
  - plateformes de microgravité (p. ex. vols paraboliques en aéronefs) : faisabilité de la procédure; validation de la technologie; biologie humaine de base; manifestation de processus morbides en gravité réduite
- **Station spatiale internationale** : mesures biologiques avant, pendant et après les vols; évaluation de la dégradation des compétences; efficacité du télémentorat et des stratégies d'accompagnement
- **Surface lunaire** : vérification plus poussée des technologies au-delà du stade de validation.

## 8 SCIENCES DE LA VIE DANS L'ESPACE

En sciences de la vie, le principal objet de la recherche en ce qui a trait à l'exploration humaine de l'espace est l'exposition prolongée de systèmes biologiques à l'environnement dans l'espace. Plusieurs éléments de cet environnement sont importants : la gravité réduite, allant de la microgravité à une gravité six fois plus faible sur la Lune et trois fois plus faible sur Mars; le rayonnement spatial; et l'isolement et l'exiguïté des conditions de vie qui peuvent altérer le comportement humain et le bien-être psychologique. L'espace est l'ultime exemple d'un environnement ICE (isolé, confiné et extrême) qui peut même être léthal.

Les scientifiques de la vie souhaitent se servir de la Station spatiale internationale comme d'un laboratoire de recherche pour étudier de nombreuses questions intéressantes, par exemple les effets à long terme de la gravité réduite et d'autres aspects de l'environnement spatial sur les systèmes suivants (indiqués ici sans ordre de priorité) :

1. le corps entier (soit une approche intégrée des effets physiologiques);
2. évaluation des contributions génomiques aux réactions individuelles à la microgravité;
3. structure, composition et fonction des os;
4. radiobiologie;
5. santé et fonctionnement psychologiques;
6. le système cardiovasculaire;
7. structure, composition et fonctionnement des muscles;
8. le système vestibulaire et autres composantes du système nerveux;
9. les processus de développement.

Les scientifiques ayant eu jusqu'ici un accès limité à des environnements de gravité réduite, de nombreuses questions fondamentales demeurent sans réponse au sujet de la réaction à la gravité – ou à son absence – des systèmes biologiques, allant du niveau moléculaire et cellulaire, en passant par les tissus et organes, jusqu'au corps entier.

Qui plus est, ces recherches ont une importante portée pratique. Tous les sujets cités plus haut peuvent être associés à une exécution moins efficace des tâches et à des risques pour la santé des astronautes; par exemple, des changements de la masse osseuse peuvent être liés à un risque accru de fractures, alors que des pertes de force musculaire ou de forme physique peuvent diminuer la capacité d'exécuter les tâches nécessaires et les activités d'urgence.

Il est indispensable de mieux comprendre les changements biologiques et physiologiques qui surviennent dans un environnement de gravité réduite pour réduire les risques pour la santé et la sécurité des équipages dans des missions de longue durée. Par exemple, la compréhension des changements cellulaires et autres qui surviennent dans les os en gravité réduite mènera à de nouvelles approches pour traiter et prévenir la perte osseuse tant dans l'espace que sur Terre.

Il est important de souligner que les objectifs des sciences de la vie dans l'espace recoupent ceux de la médecine spatiale opérationnelle (MSO), laquelle a pour tâche de surveiller, traiter et prévenir les maladies et les blessures chez les membres des équipages dans l'espace.

De même, l'étude des effets du rayonnement dans l'espace peut favoriser les objectifs à la fois des sciences de la vie dans l'espace et de la médecine spatiale opérationnelle. On sait que les équipages en missions d'exploration feront face à des risques accrus de rayonnement, particulièrement lorsqu'ils s'aventureront au-delà de l'orbite basse terrestre et perdront donc la relative protection du champ magnétique de la Terre. On connaît mal toutefois la nature du rayonnement dans l'espace et on ne sait pas exactement quel genre d'atteinte biologique ce

rayonnement peut causer. Ces détails seront importants pour développer des moyens de protection contre le rayonnement et des contre-mesures pour protéger les équipages.

Les scientifiques doivent également mieux comprendre les conséquences de l'activité physique réduite sur l'état musculosquelettique et cardiovasculaire pour exécuter les tâches quotidiennes et opérationnelles et sur la santé des astronautes.

Enfin, il est important de comprendre les effets psychologiques de la vie dans des milieux isolés, exigus et dangereux – astronefs ou colonies planétaires – pendant de longues périodes de temps, particulièrement lorsque les équipages sont formés de personnes de sexe, de nationalité, de culture et de race différents. Il est important tant sur le plan scientifique que pour des raisons de sécurité de comprendre les effets de ces environnements extrêmes sur le comportement et le rendement humains et les risques opérationnels éventuels qu'ils peuvent poser.

L'élaboration de contre-mesures, par exemple des médicaments, de nouvelles technologies ou des programmes alimentaires et d'exercice, pour réduire ou prévenir les effets indésirables de l'exposition à l'environnement de l'espace est un but cardinal tant des sciences de la vie dans l'espace que de la médecine opérationnelle spatiale. La communauté canadienne des sciences de la vie peut faire une contribution importante dans ce domaine en aidant à concevoir des contre-mesures fondées sur les réactions individuelles plutôt que sur une approche « universelle ».

Les variations génétiques chez les êtres humains signifient que différentes personnes réagissent différemment à des interventions pharmaceutiques et autres; une meilleure compréhension de ces différences permettra aux scientifiques de concevoir des contre-mesures plus efficaces et mieux ciblées. L'identification de personnes présentant des risques génétiques particuliers en situation de microgravité sera un aspect critique de l'élaboration de contre-mesures efficaces.

Il est également important de concevoir des contre-mesures intégrées tenant compte de tous les systèmes physiologiques pouvant être touchés plutôt que de se centrer sur chaque système séparément. L'expérience montre que certaines interventions peuvent parfois avoir des effets négatifs imprévus sur les systèmes non visés. C'est un autre domaine dans lequel les chercheurs canadiens en sciences de la vie peuvent apporter une importante contribution.

Enfin, l'étude des effets physiologiques de la gravité réduite peut entraîner d'autres retombées non négligeables. Il existe des parallèles entre la réaction du corps humain à la microgravité et le vieillissement; ainsi, cette recherche pourrait aider les scientifiques à améliorer les soins de santé pour les personnes âgées sur Terre.

## **SOMMAIRE DES OBJECTIFS**

- SVDE-1 Mieux comprendre les risques pour les organismes vivants que représente l'exposition au rayonnement au-delà de l'orbite basse terrestre et mettre au point des contre-mesures
- SVDE-2 Mieux comprendre les changements biologiques et physiologiques qui surviennent dans des environnements de gravité réduite et concevoir des contre-mesures
- SVDE-3 Acquérir une compréhension plus globale des effets biologiques et physiologiques de l'environnement dans l'espace et concevoir des contre-mesures intégrées
- SVDE-4 Mieux comprendre les effets psychologiques des vols dans l'espace et concevoir des contre-mesures
- SVDE-5 Développer du matériel pouvant recueillir des données sur le rayonnement et des données biologiques et physiologiques durant les vols dans l'espace
- SVDE-6 Encourager les communautés cliniques et de recherche à travailler de concert.

## OBJECTIFS ET ÉTUDES

### **Objectif SVDE-1 : mieux comprendre les risques pour les organismes vivants que représente l'exposition au rayonnement au-delà de l'orbite basse terrestre et concevoir des contre-mesures**

À l'heure actuelle, les scientifiques ne comprennent pas entièrement la nature de l'environnement radioactif au-delà de l'orbite basse terrestre et connaissent mal ses effets à court et à long terme sur les systèmes biologiques. Il existe un besoin de connaissances plus précises sur les effets délétères du rayonnement dans l'espace, allant de l'ADN aux organismes entiers. Les effets sur les êtres humains ne sont pas les seuls à être préoccupants : les plantes et les animaux joueront aussi un rôle important dans l'exploration de l'espace. Les plantes, par exemple, formeront une partie intégrante des systèmes de survie dans les astronefs et les colonies planétaires en fournissant à la fois de la nourriture et de l'oxygène.

#### **Études**

1. étudier les effets du rayonnement sur des organismes entiers (p. ex. des mouches des fruits ou des nématodes) sur de multiples générations. Cela jetterait de la lumière sur les types de mutations susceptibles de s'accumuler avec le temps et permettrait de mieux comprendre les risques à long terme de l'exposition au rayonnement au-delà de l'orbite basse terrestre
2. étudier les effets immédiats et à long terme du rayonnement au niveau cellulaire et déterminer comment exactement le rayonnement altère les cellules et l'ADN
3. concevoir des contre-mesures ciblées pour réduire le risque d'exposition au rayonnement au-delà de l'orbite basse terrestre, comprenant des médicaments, des interventions alimentaires et des programmes d'exercice.

### **Objectif SVDE-2 : mieux comprendre les changements biologiques et physiologiques qui surviennent dans des environnements de gravité réduite et concevoir des contre-mesures**

Il est bien connu que les principaux systèmes dans l'organisme sont sensibles à la gravité réduite. Parmi les plus importants, citons les os, les muscles, le cœur, le système nerveux et le système vestibulaire (équilibre). Ces effets ont des conséquences tant sur l'efficacité opérationnelle et la sécurité des missions d'exploration spatiale que sur la santé immédiate et à long terme des équipages.

Il est important de comprendre les changements qui surviennent dans l'espace à toute échelle, de la plus petite (moléculaire, cellulaire) aux plus grandes (tissus, organes, corps entier) pour élaborer des contre-mesures plus efficaces. Par exemple, une meilleure compréhension de la façon dont la réduction de la masse cardiaque et musculosquelettique peut diminuer la capacité des astronautes d'exécuter les tâches requises ou les opérations d'urgence peut influencer sur la nature des programmes d'activité physique prescrits pour améliorer la santé et la sécurité de l'équipage.

Il est également important de comprendre les effets biologiques et physiologiques dans les organismes non humains, par exemple les plantes qui constituent un élément important du système de survie.

#### **Études**

1. étudier la base moléculaire et cellulaire des changements biologiques et de croissance dans des organismes vivants en réaction à la gravité réduite
2. étudier les changements physiologiques qui se produisent dans des organismes vivants en gravité réduite, du niveau cellulaire à celui du corps entier
3. concevoir des contre-mesures pour réduire les effets biologiques et physiologiques indésirables de la vie en gravité réduite, comprenant des médicaments, de l'exercice, des interventions diététiques et nutritionnelles ainsi

que des technologies comme la dépressurisation de la partie inférieure du corps, la gravité artificielle et des systèmes et procédures informatisés.

**Objectif SVDE-3 : acquérir une compréhension plus globale des effets biologiques et physiologiques de l'environnement spatial et concevoir des contre-mesures intégrées**

Jusqu'ici, une bonne partie de la recherche scientifique sur les effets biologiques et physiologiques de l'environnement spatial a été centrée sur des systèmes isolés comme les os, le cœur ou le système vestibulaire. Il est important de mener des études interdisciplinaires ciblant non seulement des parties de l'organisme, mais le corps entier comme système intégré.

Cela est particulièrement important au moment de concevoir des contre-mesures pour assurer que les interventions visant un système n'affaiblissent pas d'autres systèmes. Il serait également utile de concevoir des contre-mesures efficaces dans plusieurs systèmes à la fois, ce qui réduirait d'emblée le nombre de contre-mesures à mettre en œuvre et le risque d'interactions négatives entre elles.

**Études**

1. Constituer une base de données des prédicteurs génomiques des réactions à la microgravité à partir d'études précliniques et apparentées terrestres pouvant ensuite être validées sur l'ISS par des études tant rétrospectives que prospectives.
2. Constituer des groupes de recherche interdisciplinaire pour mener des études terrestres sur divers systèmes physiologiques, en utilisant les mêmes patients et en partageant les données. Un exemple serait l'utilisation d'études d'alitement antiorthostatique simulant des environnements de gravité réduite pour étudier les effets sur les os et les muscles et sur les systèmes cardiovasculaire, neurologique et vestibulaire.
3. Utiliser une approche intégrée pour recueillir et interpréter les données durant les missions dans l'espace
4. Utiliser les données d'études intégrées pour concevoir des contre-mesures ciblant des systèmes multiples et ne causant pas de dommages imprévus dans les systèmes non ciblés.

**Objectif SVDE-4 : mieux comprendre les effets psychologiques des vols dans l'espace et concevoir des contre-mesures**

Les astronautes travaillent dans des environnements restreints, isolés et dangereux. Cela peut avoir des répercussions d'ordre psychologique et altérer leur comportement et leur rendement même durant des missions relativement courtes en orbite basse terrestre. Lorsqu'ils s'aventurent plus loin en direction de la Lune ou de Mars, ces facteurs ne peuvent être qu'aggravés par la durée plus longue des missions, les distances plus grandes entre l'équipage et la Terre et le retard des communications en temps réel qui en résulte.

L'expérience avec des équipages travaillant dans des environnements semblables sur terre (p. ex. des stations de recherche dans l'Antarctique, des chambres d'isolement) a montré que les équipages peuvent éprouver une large gamme d'émotions et d'états – dépression, peur, douleur, colère, fatigue, retrait – entraînant des conflits interpersonnels et une perte de rendement qui pourraient être suffisamment sérieux pour compromettre le succès d'une mission. Des tensions additionnelles peuvent survenir lorsque les équipages comprennent des personnes de sexe, de nationalité, de culture et de race différents.

Dans les longues missions au-delà de l'orbite basse terrestre, par exemple un voyage vers Mars, le retour anticipé à la Terre de l'équipage ou de certains membres ne sera pas une option. Il est par conséquent important d'élaborer de meilleures techniques pour choisir des équipages compatibles et pour déterminer le potentiel de stress psychologique qui pourrait altérer le comportement et le rendement et compromettre des missions de longue durée. En outre, l'établissement de biomarqueurs appropriés et validés et d'outils d'évaluation psychologique pour



définir les risques durant les missions sont nécessaires pour que des interventions efficaces puissent être lancées avant que surgissent des problèmes ou des complications graves.

### Études

1. Améliorer notre compréhension des effets biologiques, psychologiques et sociaux du stress dans un environnement isolé, restreint et extrême et élaborer de nouvelles approches pour les traiter et les prévenir (p. ex. exercice, nutrition, médication, counseling, etc.).
2. Modéliser le processus humain de prise de décision et de traitement de l'information personnelle et sociale. Pourquoi les personnes font-elles ce qu'elles font ?
3. Étudier les besoins émotionnels des équipages (p. ex. nourriture et rituels des repas, compagnonnage, sens communautaire, conditions de vie confortables).
4. Élaborer des méthodes pour mesurer et évaluer le rendement et le comportement humains dans les missions de longue durée.
5. Étudier le potentiel du *biofeedback* comme outil pour aider les personnes à mieux fonctionner dans l'espace.
6. Élaborer de nouvelles technologies comportant des interfaces homme-machine améliorées pour réduire la charge de travail des équipages (p. ex. communications en langue naturelle, gestion des données intelligente).
7. Établir des critères de sélection des astronautes visant à retenir des membres d'équipage psychologiquement aptes à travailler avec une équipe dans des missions de longue durée.
8. Élaborer et valider des biomarqueurs et des outils d'évaluation comme indicateurs de risque psychologique accru pour permettre la conception d'interventions efficaces.

### Objectif SVDE-5 : développer du matériel pouvant recueillir des données sur le rayonnement et des données biologiques et physiologiques durant les vols dans l'espace

Il faut augmenter et améliorer la batterie de matériel et d'instruments disponibles pour recueillir des données biologiques et physiologiques en vol et les transmettre à la Terre. Il est nécessaire d'augmenter la quantité et les types de données recueillies pour élaborer des contre-mesures plus efficaces et mieux ciblées.

### Études

1. Développer du matériel pouvant analyser des échantillons de sang et d'urine en vol au lieu d'avoir à les retourner à la Terre pour analyse. Cela permettrait de mesurer les métabolites médicalement et physiologiquement importants (p. ex. les protéines qui peuvent indiquer un risque accru de maladie cardiovasculaire) et une réponse thérapeutique plus rapide.
2. Étudier l'introduction de technologies médicales non utilisées antérieurement dans l'espace pour améliorer la capacité de déceler et traiter des maladies et des blessures en cours de mission. Par exemple, une technique potentiellement utile serait la cytométrie de flux qui mesure les particules microscopiques circulant dans un flux liquide par rayon laser.
3. Élaborer des systèmes de détection pouvant surveiller la présence de pathogènes microbiens (p. ex. *E. coli*) en temps réel. C'est un domaine dans lequel le Canada possède une expertise.

### Objectif SVDE-6 : encourager les communautés cliniques et de recherche à travailler de concert

Les communautés des sciences de la vie dans l'espace et de MSO partagent de nombreux buts similaires se rattachant à l'amélioration de notre compréhension des effets de l'environnement spatial sur les organismes vivants. Le mandat de la MSO est de surveiller, diagnostiquer et traiter les astronautes pour des maladies et blessures avant, pendant et après des missions dans l'espace, d'assurer leur santé et leur sécurité et d'élaborer des contre-

mesures visant à prévenir les effets indésirables de l'exposition à l'environnement spatial, notamment la gravité réduite, le rayonnement accru, l'isolation et l'exiguïté de vaisseaux.

L'exécution de ces tâches exige une solide base de données scientifiques fournies par la communauté des sciences de la vie dans l'espace. Une collaboration plus étroite entre les deux groupes assurera que les études scientifiques cibleront les domaines où les besoins sont les plus criants et que les résultats se traduiront en traitements et contre-mesures efficaces qui pourront sauver des vies. Ce type de collaboration améliorera également la prestation des soins de santé sur Terre.

## 9 RAYONNEMENT DANS L'ESPACE

L'un des risques les plus sérieux auxquels les astronautes sont exposés dans les missions d'exploration au-delà de l'orbite basse terrestre est le rayonnement spatial. Dès qu'ils échappent à la protection du champ magnétique et de l'atmosphère de la Terre, les astronautes sont exposés à diverses particules d'énergie, dont des neutrons, des protons de haute énergie et des ions lourds. Toutes ces particules peuvent endommager les gènes humains et causer le cancer. En outre, on associe de plus en plus l'exposition au rayonnement à des maladies non malignes, principalement des maladies cardiovasculaires.

L'espace est inondé de rayonnement cosmique provenant de l'extérieur du système solaire. Les équipages dans l'espace peuvent également être exposés à des doses nocives et potentiellement mortelles de rayonnement résultant d'éruptions solaires. Ces irrptions sont particulièrement dangereuses pour les astronautes lorsque ceux-ci travaillent à l'extérieur de leur astronef.

De plus, les particules de haute énergie peuvent interagir avec des matières dans l'astronef et même avec les tissus du corps humain, créant ainsi un rayonnement secondaire sous forme de neutrons. Cela peut parfois entraîner des niveaux de rayonnement plus élevés à l'intérieur de l'astronef qu'à l'extérieur. Des études canadiennes indiquent que les neutrons pourraient être la source d'environ la moitié du rayonnement auquel les astronautes sont exposés.

Des scientifiques du monde entier cherchent actuellement à mieux comprendre le rayonnement dans l'espace afin de pouvoir évaluer plus exactement les dangers auxquels les équipages d'exploration sont exposés. Ils développent également des appareils de contrôle du rayonnement et des spectromètres en temps réel tout en travaillant à des contre-mesures de protection, par exemple des écrans et des médicaments qui protègent contre certaines formes d'atteintes dues au rayonnement.

### SOMMAIRE DES OBJECTIFS EN MATIÈRE DE RAYONNEMENT

RAD-1 Mesures quantitatives du rayonnement (métrologie) :

- a. Développer des appareils personnels de contrôle en temps réel du rayonnement pour les équipages dans l'espace.
- b. Développer des détecteurs en temps réel qui peuvent faire la distinction entre des neutrons et des protons primaires.
- c. Élaborer des méthodes de mesure du rayonnement fondées sur le nombre de particules en interaction avec la matière plutôt que sur la quantité d'énergie déposée, ce qui pourrait être plus pertinent pour les milieux de rayonnement dans l'espace.

RAD- 2 Modélisation du rayonnement :

- a. Élaborer des codes informatisés qui peuvent simuler l'interaction du rayonnement avec des détecteurs et instruments pour mieux comprendre le comportement et la réponse des instruments.
- b. Améliorer la capacité de protéger les équipages contre le rayonnement dans l'espace.
- c. Élaborer des méthodes de modélisation des dommages de l'ADN causés par le rayonnement dans l'espace.

RAD-3 Radiobiologie :

- a. Améliorer la compréhension des risques à long terme de l'exposition au rayonnement dans l'espace, y compris le risque d'atteinte non cancéreuse.
- b. Déterminer des biomarqueurs (p. ex. gènes activés ou niveaux élevés de protéines spécifiques résultant de l'activité des gènes) pouvant servir à mesurer le risque biologique de l'exposition au rayonnement dans l'espace.

- c. Développer des médicaments qui peuvent protéger contre des doses modérées à élevées de rayonnement dans l'espace.

## OBJECTIFS ET ÉTUDES

### **Objectif RAD-1a : Métrologie – développer des appareils personnels de contrôle en temps réel du rayonnement pour les équipages dans l'espace**

Le rayonnement dans l'espace est complexe. Il comporte un mélange de différents types de particules, ayant différents transferts linéiques d'énergie (TLE), et il varie avec le temps. Le TLE décrit la quantité d'énergie déposée par une particule chargée sur une très petite partie de sa trajectoire. Sachant cela, il sera plus facile de déterminer la quantité d'énergie disponible pour endommager de très petites cibles comme l'ADN dans les noyaux des cellules. Il est important d'avoir un contrôle en temps réel de ce qui se produit dans cet environnement pour protéger les membres d'équipage. Le Canada a une longue tradition de recherche sur le rayonnement, reliée à la défense et à son activité en énergie nucléaire, et possède donc une expertise considérable en matière de développement de détecteurs de rayonnement ou de dosimètres.

#### **Études :**

1. Installations terrestres pour tester et calibrer les instruments de contrôle du rayonnement. Il est essentiel d'avoir des laboratoires terrestres utilisant des faisceaux d'ions lourds simulant les rayons cosmiques, les particules énergétiques venant de l'extérieur du système solaire. Comme il est difficile de tester ces instruments dans l'espace en raison de l'accès limité aux vols dans l'espace, les tests terrestres sont essentiels pour développer rapidement de meilleurs instruments. Le Space Radiation Laboratory de la NASA au Brookhaven National Laboratory est un bon exemple d'une telle installation. Il existe d'autres laboratoires au Japon et en Allemagne. L'accès négocié à ces installations pour des travaux de l'ASC ou le développement de lignes de faisceaux dédiées au rayonnement dans l'espace au laboratoire TRIUMF en C.-B. donnerait aux chercheurs les outils dont ils ont besoin pour développer de nouveaux instruments.

### **Objectif RAD-1b : Métrologie – développer des détecteurs en temps réel qui peuvent faire la distinction entre des neutrons et des protons primaires**

De nombreux dosimètres et spectromètres à neutrons existants ne peuvent faire la distinction entre les neutrons et les protons primaires ou encore, leur réponse aux protons de haute énergie est inconnue. Il est important de connaître la distribution de doses des différents types de rayonnement, étant donné que chacun possède ses capacités propres de causer des dommages biologiques. Il est donc plus important encore de connaître la composition exacte des champs de rayonnement dans l'espace.

#### **Études :**

1. Installations terrestres pour tester et calibrer des détecteurs en temps réel du rayonnement.

### **Objectif RAD-1c : Métrologie – élaborer des méthodes de mesure du rayonnement fondées sur le nombre de particules en interaction avec la matière plutôt que sur la quantité d'énergie déposée, ce qui pourrait être plus pertinent pour les milieux de rayonnement dans l'espace**

Le rayonnement dans l'espace est très différent de ce que l'on connaît sur terre pour ce qui est de l'énergie et du transfert linéique d'énergie des particules de même que de la structure du tracé de la particule (l'énergie déposée autour de la trajectoire de la particule alors qu'elle traverse de la matière vivante).

Les quantités telles que la dose absorbée (la quantité totale d'énergie déposée) peuvent ne pas être suffisantes pour exprimer le risque réel, lequel peut dépendre de la nature précise de l'énergie déposée par le rayonnement au niveau cellulaire ou sous-cellulaire. Cela dépendra du patron caractéristique de l'énergie déposée autour de la trajectoire de la particule chargée. Il serait possible d'améliorer la détermination des risques en utilisant des mesures de la structure de trajectoire d'une particule et du nombre de particules qui interagissent avec les cellules avec le temps, c'est-à-dire la fluence des particules.

**Études :**

1. Production de données terrestres sur les interactions des particules chargées.
2. Simulations informatisées des trajectoires des particules.

**Objectif RAD-2a : Modélisation – élaborer des codes de simulation pour modéliser la réponse des instruments**

Le développement d'instruments pour mesurer le rayonnement en temps réel à partir de composants actifs (p. ex. des compteurs proportionnels et des scintillomètres) dépend de façon critique de la capacité d'élaborer des modèles permettant de prédire et de comprendre leurs réponses à différentes intensités de rayonnement. Il existe des codes informatisés pour faciliter cette tâche, mais nous avons besoin de codes sur mesure pour compléter la modélisation détaillée de l'interaction des particules chargées avec les instruments. Ces recherches seront précieuses pour la grande communauté de recherche sur le rayonnement au Canada.

**Études :**

1. Coordination entre différents groupes ayant de l'expérience dans l'utilisation de codes existants et sur mesure pour simuler les réponses de détecteurs aux différents champs de rayonnement.

**Objectif RAD-2b : Modélisation – améliorer la capacité de protéger les équipages contre le rayonnement dans l'espace**

Une partie importante de l'exposition de l'équipage vient du rayonnement secondaire créé lorsque des particules de haute énergie frappent des matières utilisées dans l'astronef, dont de l'équipement utilisé contre le rayonnement. Il est nécessaire de mieux comprendre comment le rayonnement pénètre cet équipement pour créer une protection plus efficace.

**Études :**

1. Simulations informatisées des interactions du rayonnement avec la matière pour évaluer différents matériaux de protection des équipages contre les rayons cosmiques.
2. À partir de ces recherches, optimiser l'épaisseur des outils de protection, l'équipement et son emplacement à bord des astronefs ou dans les colonies permanentes.

**Objectif RAD-2.3 : Modélisation – développer des méthodes de modélisation des atteintes à l'ADN causées par le rayonnement dans l'espace**

L'ADN est endommagé par un jeu complexe entre les particules chargées et la structure et l'environnement de l'ADN lui-même. Ces atteintes sont les précurseurs de la plupart des effets biologiques du rayonnement et il est essentiel de les bien comprendre pour déterminer le pouvoir de produire une atteinte biologique d'une gravité donnée d'un type de rayonnement comparativement à un autre.

Ces recherches seront utiles non seulement en médecine dans l'espace, mais aussi en protection contre le rayonnement et en médecine générale.

**Études :**

1. Consolider l'expertise canadienne en recherche sur la modélisation des altérations de l'ADN. Les chercheurs canadiens qui peuvent travailler en modélisation des altérations

- de l'ADN par le rayonnement sont répartis entre les disciplines de la physique médicale et de la radioprotection. Un soutien est nécessaire pour permettre à ces scientifiques de travailler ensemble à établir des codes de modélisation des altérations de l'ADN applicables au rayonnement dans l'espace.
2. Élaborer des codes de modélisation qui peuvent prendre en compte la physique et la structure de trajectoire des particules chargées lourdes présentes dans les champs de rayonnement dans l'espace.

**Objectif RAD-3a : Radiobiologie – améliorer notre compréhension des risques à long terme de l'exposition au rayonnement dans l'espace, y compris les risques autres que le cancer**

On sait depuis longtemps que l'exposition au rayonnement augmente le risque de cancer, mais les dernières études montrent qu'une telle exposition peut aussi causer des effets non cancéreux comme des maladies cardiovasculaires. De meilleures connaissances sur ces effets permettront de développer de meilleurs moyens de protection contre le rayonnement tant sur terre que dans l'espace. Le Canada a élaboré des techniques et des protocoles pour des études animales dans ce domaine.

**Études:**

1. études longitudinales animales. Pour mieux comprendre les risques à long terme de l'exposition au rayonnement qu'encourent les participants aux missions d'exploration dans l'espace, il est essentiel de mener des études sur les effets de l'exposition chronique au rayonnement sur la vie entière d'un animal pour tous les genres de maladies et les causes éventuelles de décès. Les animaux de laboratoire seraient irradiés en utilisant différents protocoles de rayonnement, puis suivis durant le reste de leur vie. Les causes du décès et l'état des différents tissus et organes au moment du décès seraient enregistrés de manière à pouvoir établir des associations entre le niveau d'exposition et le type et les manifestations de la maladie et de la défaillance des organes. Pour mener ces études, il sera nécessaire d'avoir accès à des installations terrestres de rayonnement de neutrons, de protons énergétiques et d'ions lourds qui peuvent simuler les champs de rayonnement existant dans l'espace de même qu'à des installations de soins de longue durée et d'étude des animaux de laboratoire.

**Objectif RAD-3b : Radiobiologie – déterminer des biomarqueurs (p. ex. gènes activés ou degrés élevés de protéines spécifiques résultant de l'activité génétique) pouvant servir à mesurer le risque biologique de l'exposition au rayonnement dans l'espace.**

Les changements dans les chromosomes qui contiennent nos gènes sont des biomarqueurs connus des effets du rayonnement. Le comptage des aberrations dans la structure chromosomique à la suite d'une exposition au rayonnement peut donner une idée de l'atteinte biologique et du risque encouru. D'autres biomarqueurs peuvent aussi être des indicateurs utiles de l'exposition au rayonnement et seront plus faciles à mesurer chez les membres d'équipage exposés. Un exemple est la mesure des changements dans la régulation des gènes – des gènes particuliers étant alternativement activés et désactivés – et des changements résultants des niveaux de protéines. La détermination de ces biomarqueurs additionnels serait également très utile pour gérer les incidents de rayonnement dans les populations sur terre. Le Canada a été actif dans ce domaine en soutenant la recherche et le développement d'activités antiterroristes.

**Études :**

1. Déterminer des marqueurs possibles et établir des protocoles d'exposition au rayonnement et de dosage pour établir des courbes dose-effet qui permettront d'évaluer l'exposition des personnes. En mesurant les biomarqueurs dans les échantillons de sang, les scientifiques devraient pouvoir déterminer quelle quantité de rayonnement les personnes ont réellement reçue et leur risque de dommage biologique.

**Objectif RAD-3c : Radiobiologie – développer de nouveaux médicaments pouvant protéger contre des doses modérées à élevées de rayonnement dans l'espace**

Le développement de médicaments radioprotecteurs aurait une grande portée non seulement pour le programme spatial, mais aussi dans des applications civiles et militaires sur terre. Le Canada ne peut développer ces médicaments à partir de rien, mais il pourrait jouer un rôle important dans la recherche de substances naturelles qui auraient des effets radioprotecteurs.

**Études :**

1. créer des installations où seront menées des études animales pour développer des médicaments pouvant protéger contre les effets du rayonnement. Les scientifiques qui cherchent à trouver de possibles médicaments et substances de radioprotection travaillent habituellement avec des cultures cellulaires. Toutefois, les éventuels radioprotecteurs devront finalement être testés avec des animaux pour évaluer leur effet sur l'organisme entier. Il existe peu d'installations d'études animales qui pourraient convenir et elles servent à diverses fins. Il est donc important que les groupes de recherche coordonnent des évaluations *in vitro* et d'éventuels essais sur les animaux avec des radioprotecteurs prometteurs.

## 10 SCIENCES PHYSIQUES DE L'ESPACE

Les sciences physiques de l'espace cherchent à comprendre les effets de la gravité, du rayonnement et d'autres aspects de l'environnement spatial sur les systèmes physiques et chimiques, et sur l'utilisation d'un environnement spatial en faible gravité pour étudier les phénomènes physiques non réalisables expérimentalement sur la terre. Ces recherches contribuent non seulement à l'exploration de l'espace, mais, point tout aussi important, elles permettent aux scientifiques d'utiliser les caractéristiques uniques de l'environnement spatial pour comprendre des processus physiques et chimiques importants sur la Terre.

La recherche en sciences physiques est indispensable à la réussite des futures missions d'exploration spatiale (habitée et robotique) en orbite basse autour de la Terre et au-delà. Les recherches canadiennes en sciences physiques de l'espace englobent la science des matériaux, la physique des fluides, la combustion, la biotechnologie et la nanoscience. Elles portent sur des questions clés qui permettront l'exploration humaine future de l'espace et des surfaces planétaires, y compris :

- la conception de sous-systèmes d'engins spatiaux, d'habitats et de sous-systèmes planétaires durables, de systèmes de survie, d'outils, de véhicules et de matériaux, ainsi que l'atténuation des risques connexes;
- le maintien et la surveillance de la santé, de la sécurité et de la productivité des équipes humaines;
- la capacité d'extraire et d'utiliser de manière fiable et efficace les ressources (énergie, oxygène, matériaux) de l'environnement spatial et des autres planètes;
- la capacité de mener des études scientifiques pour répondre aux questions sur la nature, l'histoire et l'évolution du système solaire et de l'univers.

La communauté scientifique canadienne possède déjà une grande expertise dans les sciences physiques de l'espace, ayant participé à des missions depuis les premiers vols de longue durée dans les années 1970 jusqu'aux expériences en cours et prévues dans la Station spatiale internationale. Ce travail a encouragé les partenariats entre les universités, le gouvernement et l'industrie au Canada, ainsi que la coopération entre les gouvernements et la communauté scientifique internationale.

Les autres recherches dans ce domaine sont conformes à la Stratégie des sciences et de la technologie du gouvernement du Canada; elles aident à maintenir l'excellence du Canada en sciences et traitent de ses priorités clés comme l'énergie, l'environnement, la santé, les biotechnologies, les technologies des communications et la science des matériaux.

### RÉSUMÉ DES OBJECTIFS EN SCIENCES PHYSIQUES DE L'ESPACE

Les objectifs scientifiques suivants sont jugés fondamentaux, pratiques et d'une importance stratégique pour le rôle du Canada dans l'exploration spatiale.

SPS-1 – Effet de la gravité sur les fluides et comportement des fluides et des interfaces fluides dans différents environnements gravitationnels.

SPS-2 – Effet de l'environnement spatial sur les matériaux et leur comportement.

SPS-3 – Effet de l'environnement spatial sur la combustion.

SPS-4 – Effet de l'environnement spatial sur la biotechnologie.

SPS-5 – Nanotechnologies développées sur Terre et pouvant servir à l'exploration spatiale.

SPS-6 – Effet de l'environnement spatial sur le transfert de chaleur et de masse.

SPS-7 – Sciences physiques requises pour permettre l'utilisation des ressources in situ.

SPS-8 – Effet de la poussière sur les systèmes spatiaux.



SPS-9 – Sciences physiques nécessaires à l'amélioration de l'efficacité de la conversion de l'énergie.

SPS-10 – Interactions du rayonnement avec la matière et les matériaux.

## OBJECTIFS ET ÉTUDES

### **Objectif SPS-1 : Effet de la gravité sur les fluides et comportement des fluides et des interfaces fluides dans différents environnements gravitationnels**

Les fluides sont présents dans de nombreux aspects de l'exploration spatiale. Ils jouent un rôle essentiel dans le fonctionnement des systèmes des engins spatiaux habités ou non, comme la gestion des propergols liquides, le fonctionnement des réservoirs de carburant, le chauffage et le refroidissement, la gestion des eaux usées et les systèmes de production d'oxygène. Le succès des missions spatiales s'appuie sur une bonne compréhension physique du fonctionnement de ces systèmes dans l'environnement spatial.

Les systèmes de survie et de soins de santé dans les engins spatiaux requièrent aussi la manipulation des fluides, allant de l'eau potable au prélèvement d'échantillons de sang. Enfin, les études et les expériences scientifiques, y compris les études de l'environnement spatial lui-même et des surfaces planétaires, nécessiteront une compréhension détaillée des fluides, allant du pompage des liquides à la production d'énergie et au transfert de chaleur.

La manipulation, l'échantillonnage et le stockage des fluides seront importants pour l'ensemble de ces activités, et les acquis du Canada dans ce domaine sont importants pour l'accroissement efficient des connaissances nécessaires à l'exploration spatiale. La gravité influe sur les propriétés et le comportement des fluides, et il est donc essentiel de comprendre l'influence de différentes intensités gravitationnelles – non seulement la microgravité dans l'espace, mais aussi la gravité réduite sur la Lune et sur Mars ( $1/6^{\text{e}}$  et  $1/3^{\text{e}}$  de celle de la Terre, respectivement).

En combinant les recherches effectuées dans ces différents environnements par les scientifiques et l'industrie au Canada, on pourra fort probablement optimiser les processus terrestres utilisant des fluides.

#### **Études :**

- 1. Mesure et prévision de la géométrie des fluides dans les réservoirs.** Sur Terre, la géométrie des fluides est tributaire de la gravité, qui contraint un fluide à rester au fond de son réservoir. Dans l'espace, la gravité moindre signifie que la configuration du fluide dans un réservoir est dominée par des phénomènes de surface (p. ex., la tension de surface, le mouillage, etc.) En outre, chaque mouvement de l'engin spatial et les activités dans celui-ci provoquent des accélérations que subissent les fluides dans un réservoir, et qui varient en amplitude et direction et peuvent même avoir une composante rotationnelle. Comprendre le comportement des fluides complexes dans des réservoirs est indispensable pour la conception des pompes, des jauges et autres dispositifs de manutention des liquides pour les véhicules spatiaux. Dans les nouveaux engins spatiaux, on utilise désormais les connaissances acquises sur la géométrie des fluides dans l'espace.
- 2. Compréhension et prévision de l'effet de la gravité sur l'angle de contact et le mouillage.** L'angle de contact entre l'interface d'un fluide et un solide et le degré de mouillage déterminent le comportement des fluides dans les systèmes polyphasiques en faible gravité, comme la position du fluide dans les réservoirs, que nous avons mentionnée ci-dessus. Avant l'étude de l'interaction entre la gravité et l'angle de contact par des chercheurs canadiens, on croyait que l'angle de contact dépendait

uniquement de la nature des matériaux en contact. Toutefois, des expériences réalisées en faible gravité et sous gravité variable et des travaux théoriques connexes (soutenus par l'ASC) en thermodynamique des surfaces ont démontré que la gravité influence profondément l'angle de contact. En comprenant l'interaction des champs et de l'angle de contact, nous modifierons la façon dont nous modélisons des processus fondamentaux de la Terre. Les systèmes fluidiques polyphasiques sont présents dans presque tous les aspects de l'industrie canadienne des ressources, et l'interaction des interfaces fluides avec les surfaces solides est importante dans plusieurs domaines de la microfluidique et des nanotechnologies de demain.

3. **Comprendre et prévoir le comportement des surfaces libres dans l'espace, y compris les effets de convection influant sur la tension de surface axée (effet Marangoni).** Les surfaces libres sont présentes dans de nombreux processus sur terre, comme le procédé de zone flottante pour le traitement des cristaux. Le comportement des surfaces libres dans les environnements à faible gravité est extrêmement complexe, car les forces d'inertie et de surface sont souvent comparables. Si la gravité est assez faible, les phénomènes de surface complexes, habituellement très masqués par la gravité terrestre, peuvent être étudiés seuls. À cet égard, l'effet Marangoni est intéressant, car il se manifeste lorsque les gradients de température causent des gradients de tension de surface qui engendrent des écoulements de surface compliqués, et qui affectent le transfert de chaleur et de masse depuis les surfaces. L'effet Marangoni se manifeste partout s'il y a une surface de liquide libre et un gradient de température, ce qu'on peut rencontrer dans l'environnement thermique variable à faible gravité des plates-formes spatiales.
4. **Quantification de l'effet des vibrations externes sur le comportement des fluides et étude de leur effet sur les expériences scientifiques.** Le Canada cherche à être un leader mondial dans les études de l'impact des vibrations sur le comportement des fluides dans les milieux spatiaux, et dans la conception d'équipements permettant d'isoler des vibrations les expériences sur les fluides. Il est important de caractériser les vibrations qui se manifestent dans chaque nouvelle plate-forme spatiale : à la fois le niveau d'accélération et la fréquence, et ce, dans les six degrés de liberté – trois linéaires et trois rotationnels. Les vibrations varient avec le mouvement des engins spatiaux et les activités dans la plate-forme spatiale et il est important de comprendre comment elles affectent les systèmes fluidiques et les résultats des expériences avec les fluides.
5. **Mesure de la diffusion dans les fluides polyphasiques.** La diffusion est au cœur de la plupart des processus de transport de molécules, y compris les systèmes biologiques, la production industrielle, la transformation des matériaux (des métaux aux polymères) et l'extraction de pétrole de la Terre. Pourtant, les coefficients de diffusion requis pour la modélisation informatique sont extrêmement difficiles, voire impossibles, à mesurer sur Terre en raison de la présence de la convection induite par la poussée hydrostatique, qui domine les mécanismes de transport dans la gravité terrestre.
6. **Mesure des effets de la gravité dans des écoulements polyphasiques (gaz-liquide, liquide-liquide, gaz-solide, liquide-solide).** Ces écoulements sont tributaires de la gravité. Les processus de changements de phase sont importants dans les technologies clés comportant le transfert de chaleur et

des cycles de production d'énergie. Les écoulements polyphasiques comprennent également les écoulements gaz-solide, comme le déplacement et la réduction des poussières ou encore l'étude de la combustion des poussières en suspension.

**Objectif SPS-2 : Effet de l'environnement spatial sur les matériaux et leur comportement.**

Tous les matériaux utilisés dans l'exploration spatiale – les métaux, les plastiques, les céramiques, les semi-conducteurs, les tissus – peuvent être affectés par le milieu spatial et les environnements planétaires, dont les niveaux variables de gravité, de température et de pression, les différents environnements chimiques et atmosphériques; les poussières, les débris, les vibrations et le rayonnement.

La compréhension de ces effets et l'utilisation de ces connaissances pour développer des matériaux nouveaux ou améliorés, optimisés pour une utilisation dans l'espace, est un objectif clé des sciences physiques de l'espace afin de soutenir l'exploration spatiale. Cette recherche permettra non seulement d'améliorer les matériaux utilisés dans le programme spatial, mais aussi d'acquérir des connaissances fondamentales pour créer de meilleurs matériaux sur Terre.

Les expériences faites sur les matériaux dans l'espace comprennent divers processus comme la solidification, la formation de dépôts, la précipitation, la purification et la dissolution des matériaux. De nouvelles techniques d'obtention et de traitement des échantillons sont également requises.

**Études :**

1. Quantifier les effets des niveaux variables de gravité, de température et de pression sur les matériaux, y compris les alliages, les céramiques, les biomatériaux et les revêtements. Dans ce domaine, nous nous intéressons aux expériences actuelles et prévues sur les installations de recherche exposées de l'ISS.
2. Comprendre l'influence des conditions chimiques et atmosphériques variables, des niveaux de rayonnement variables, des débris spatiaux et des vibrations sur les matériaux, y compris les alliages, les céramiques, les biomatériaux et les revêtements.
3. Préciser les effets des cycles de température sur les nouveaux alliages métalliques et les nanomatériaux. Les surfaces et les systèmes des engins spatiaux peuvent être soumis à des cycles de températures extrêmes de plusieurs centaines de degrés, sur de courtes périodes de temps.
4. Comprendre les effets des cycles de faible pression et température sur les tissus à haute flexibilité, les nanotissus, ainsi que les matières et tissus synthétiques (p. ex., les combinaisons spatiales et leurs composantes).
5. Élaborer, évaluer, valider les systèmes de survie en circuit fermé et les matériaux des habitats (métaux, alliages, céramiques, biomatériaux, nanomatériaux), ainsi que les matériaux nécessaires à l'utilisation des ressources in situ.

**Objectif SPS-3 : Effet de l'environnement spatial sur la combustion.**

Le feu est l'un des plus graves dangers pour l'équipage d'un engin spatial. On a démontré que plusieurs caractéristiques de l'environnement spatial, dont la faible pression, les variations cycliques des températures de l'environnement et la gravité réduite, affectent la combustion dans l'espace. Il est important de mieux comprendre ces effets sur les processus de combustion, afin d'accroître la sécurité des engins spatiaux, des habitats et des combinaisons spatiales.

Ces connaissances nous permettront également de mieux comprendre les processus de combustion et la production d'énergie sur Terre. Les expériences sur la combustion dans l'espace permettront aux scientifiques d'isoler le transfert de chaleur par rayonnement, et donc de

mieux comprendre l'importance relative du transfert de chaleur par rayonnement et par convection dans les processus de combustion sur Terre.

**Études :**

1. Quantifier le rôle du milieu spatial sur la suppression des incendies et les systèmes de prévention des incendies.
2. Comprendre les mécanismes de base de l'adhérence et de la stabilité des flammes qui déterminent leur propagation.
3. Concevoir des systèmes de détection d'incendie pour les engins spatiaux.
4. Comprendre le rôle de l'environnement spatial sur la propagation des flammes et la formation de suie.
5. Quantifier le transfert de chaleur à partir des flammes et leur propagation en fonction d'un milieu spatial variable.
6. Comprendre le rôle de l'environnement spatial sur les taux de propagation de la flamme pour divers matériaux, allant des tissus aux structures des engins spatiaux.
7. Concevoir, évaluer et valider les outils pour effectuer des analyses de risque, y compris le temps de combustion de la peau et les niveaux de toxicité dans les systèmes de survie en circuit fermé.
8. Caractériser le rôle de la gravité sur l'inflammabilité des tissus, des textiles et des revêtements.
9. Comprendre le rôle de la gravité dans la dynamique des incendies (p. ex., les délais d'inflammation généralisée, la caractérisation des courbes de croissance des incendies).
10. Concevoir, évaluer et valider de nouveaux matériaux et technologies d'ignifugation, dont les brouillards en pulvérisateur.

**Objectif SPS-4 : Effet de l'environnement spatial sur la biotechnologie.**

L'exploration spatiale de longue durée nécessitera l'utilisation de biotechnologies pour le contrôle de l'environnement et la croissance des plantes dans les habitats spatiaux. En outre, il sera nécessaire de recueillir, préparer, stocker et conserver des échantillons biologiques à usage médical et pour les activités de recherche.

La cryoconservation est actuellement la seule méthode pour la préservation de longue durée des cellules et des tissus biologiques, et le Canada soutient des travaux à la fine pointe mondiale en cryobiologie.

**Études :**

1. Comprendre le rôle de plusieurs phénomènes (la diffusion, les couches limites, la croissance des cristaux, la convection et le rayonnement) dans le stockage et le vieillissement des échantillons biologiques.
2. Caractériser l'effet du milieu spatial sur les bioréacteurs servant à produire des cultures de cellules.
3. Concevoir, évaluer et valider les technologies des cellules et tissus de remplacement (thérapie cellulaire et tissulaire) pour une utilisation dans les voyages spatiaux habités de longue durée.
4. Concevoir, évaluer et valider les besoins de transfusion sanguine (p. ex., la lyophilisation du sang). Il est urgent de prélever des échantillons de sang au cours des missions de longue durée et de les ramener sur Terre.
5. Concevoir des technologies efficaces pour rassembler, préparer et entreposer des échantillons biologiques dans des conditions de gravité réduite.
6. Maintenir le leadership scientifique du Canada dans la modélisation thermodynamique des processus cryobiologiques.

7. Concevoir, évaluer et valider les technologies de cryoconservation optimales en énergie et en volume.
8. Répondre aux questions scientifiques relatives aux effets de la gravité réduite sur la régulation des conditions ambiantes et les systèmes de croissance des plantes pour produire de l'eau et des nutriments et réguler la température, le climat et l'exposition à la lumière.

**Objectif SPS-5 : Nanotechnologies développées sur Terre et pouvant servir à l'exploration spatiale.**

Pour les nanomatériaux et les procédés de nanofabrication, on se base actuellement sur les différents comportements mécaniques, optiques ou électriques à l'échelle nanométrique pour créer des revêtements ou des matériaux nanostructurés en vrac présentant des propriétés mécaniques améliorées ou une résistance à l'usure accrue. Ces techniques offrent un grand potentiel d'amélioration pour l'exploration spatiale. Il sera primordial de disposer de nouveaux matériaux pouvant supporter des températures et des contraintes mécaniques extrêmes et des longs cycles d'utilisation pour l'exploration spatiale de longue durée, sans parler des nombreuses applications terrestres. Une nouvelle génération de matériaux intelligents et multifonctionnels est nécessaire.

En outre, les nanomatériaux comme les nanofibres ou les nanoparticules, ainsi que des procédés de nanofabrication comme la nanolithographie, autorisent la fabrication de nanocapteurs de faible poids et de grande sensibilité capable de détecter des interactions au niveau de la molécule. Intégrés à la technologie des laboratoires sur puce, ces nanocapteurs peuvent servir à développer des outils d'analyse miniaturisés pour la préparation des échantillons in situ afin de détecter et de quantifier les espèces chimiques ou biochimiques.

Le Canada est un chef de file dans la recherche sur les nanomatériaux, l'intégration de systèmes et la création d'outils d'analyse pour le diagnostic médical, la surveillance de l'environnement ou la régulation des processus biologiques liés au vieillissement, à la régénération de tissus ou aux neurosciences.

**Études :**

1. Concevoir, tester et valider de nouveaux tissus multifonctionnels nanostructurés utilisant des nanofibres et offrant une protection mécanique, électromagnétique et biochimique accrue.
2. Concevoir des matériaux et des procédés de fabrication pouvant produire des revêtements multifonctionnels capables de capter l'énergie et offrant une résistance mécanique et à l'usure accrues.
3. Élaborer des méthodes et des systèmes de laboratoire sur puce pour le diagnostic rapide des vecteurs de maladies infectieuses pour la surveillance de la qualité de l'eau et de la nourriture.
4. Trouver des méthodes de séparation moléculaire rapide utilisant des systèmes d'analyse totale basés sur la nanofluidique, ainsi que des nano-matériaux magnétiques ou électriquement actifs, destinés à être utilisés sur place pour l'identification des molécules polaires et non polaires dans les échantillons de sol, de glace ou d'eau.
5. Concevoir, évaluer et valider des méthodes et des systèmes pouvant caractériser les effets de la gravité sur les neurotransmetteurs dans des modèles in vitro utilisant des laboratoires sur puce intégrés et des modèles de culture cellulaire/tissulaire.
6. Concevoir, tester et valider les technologies de nanofabrication afin de produire des systèmes de détection de molécule unique basés sur des méthodes spectroscopiques.

7. Élaborer des méthodes et des systèmes capables de détecter et de quantifier les effets à long terme de l'exposition au rayonnement spatial par des approches biologiques.

**Objectif SPS-6 : Effet de l'environnement spatial sur le transfert de chaleur et de masse.**

La gravité, la température, la pression et d'autres aspects du milieu spatial et de l'environnement des surfaces planétaires auront un effet significatif sur le transfert de chaleur et de masse critiques dans de nombreux systèmes spatiaux, y compris les systèmes de survie, les habitats durables, la production d'énergie et la régulation de la température. Ce domaine de recherche permettra également d'améliorer nos connaissances fondamentales sur les environnements planétaires.

**Études :**

1. Comprendre le rôle de la gravité dans les mécanismes d'évaporation et de condensation. Cela est nécessaire à la production efficace d'énergie et à sa régulation dans l'espace.
2. Caractériser le rôle du transfert de chaleur résultant des différences de pression et des cycles thermiques (oscillations de température) dans les systèmes spatiaux.
3. Évaluer et valider les coefficients de transfert de chaleur pour les dispositifs qui seront utilisés dans l'espace, sur la Lune et sur Mars. Ces connaissances serviront à concevoir des systèmes de régulation thermique, de chauffage et de climatisation.
4. Comprendre le transfert de chaleur avec changement de phase dans les milieux poreux comme les conduits caloporteurs, les circuits à pompage capillaire et les conduits caloporteurs à boucle pour le transport de liquides. Cela est important pour l'efficacité du chauffage et du refroidissement des équipements scientifiques, des engins spatiaux habités et des habitats spatiaux.
5. Étudier et optimiser les systèmes de contrôle du stockage, de régulation et d'écoulement des gaz pour les systèmes de survie en circuit fermé qui sont utilisés dans les habitats spatiaux et les activités extravéhiculaires.
6. Comprendre l'effet de la gravité sur la vitesse de sublimation (transformation d'un solide en gaz sans passer par la phase liquide) sur les corps planétaires. Par exemple, cette information pourrait être utile pour prévoir le cycle de l'eau sur Mars.

**Objectif SPS-7 : Sciences physiques requises pour permettre l'utilisation des ressources in situ.**

Le Canada est un chef de file reconnu dans le développement des technologies des ressources, notamment les technologies minières et extractives. Il possède la technologie qui permet de séparer les roches et les minerais, et il dispose du leadership scientifique et de l'expertise dans le domaine des sciences colloïdales et des phénomènes interfaciaux (mélanges liquide-liquide et liquide-solide), grâce aux travaux liés aux sables bitumineux de l'Alberta et à l'exploitation des champs pétrolifères Hibernia en mer. Le Canada est donc bien placé, avec son expertise de classe mondiale, pour contribuer au développement de la science et de la technologie de l'utilisation des ressources in situ pour l'exploration spatiale.

**Études :**

1. Concevoir, tester et valider les systèmes intégrés et les sous-systèmes pour extraire l'eau et/ou l'oxygène des sols lunaire et martien. Cela inclut entre autres techniques l'extraction par hyperfréquences et l'électrolyse de l'eau, la dissolution et l'électrolyse des liquides, l'électrolyse du magma.
2. La régénération et le stockage des produits consommables pour les systèmes de survie et les piles à combustible.

3. Concevoir, tester et valider les systèmes intégrés et les sous-systèmes d'extraction des propergols liquides du sol lunaire (p. ex., l'oxygène et le méthane pour les véhicules robotiques et pilotés, divers gaz pour les travaux scientifiques et le nettoyage).
4. Étudier et tester des méthodes efficaces d'extraction d'énergie dans les environnements planétaires. Cela comprend la conception de piles solaires très efficaces, ainsi que de systèmes permettant d'extraire naturellement des planètes la chaleur et le froid (p. ex., panneaux solaires, concentrateurs, antennes redresseuses, oueds thermique).

**Objectif SPS-8 : Effet de la poussière sur les systèmes spatiaux.**

La poussière est un risque majeur pour les opérations sur les surfaces planétaires, et elle répandue sur les deux corps planétaires visés par l'exploration robotique et humaine – la Lune et Mars. Elle peut entraver le bon fonctionnement d'un large éventail d'équipement essentiel, y compris les astromobiles, les systèmes de survie, les combinaisons d'activités extravéhiculaires et les instruments scientifiques. Il sera essentiel d'élaborer des systèmes pouvant atténuer les effets de la poussière pour réduire les risques d'échec des missions.

Les nouvelles technologies de réduction des poussières seront transférables aux activités terrestres comme l'exploitation minière, les environnements médicaux et l'industrie de production de matériaux. L'amélioration des connaissances sur l'interaction des poussières trouvera des applications sur la Terre (p. ex., l'usure des matériaux.)

**Études :**

1. Caractériser les propriétés électriques, physiques et chimiques de la poussière sur la Lune et de Mars.
2. Comprendre les processus physiques de la poussière, y compris le tassement, l'agrégation et l'adhérence. Il a été établi que pour assurer la présence humaine dans l'espace, il est essentiel de réduire les concentrations de poussières et de l'éliminer des combinaisons spatiales et de l'intérieur des engins spatiaux et des modules d'habitation.
3. Mesurer et prévoir l'interaction de la poussière avec les systèmes spatiaux tels les combinaisons spatiales, les systèmes électriques et mécaniques, les joints d'étanchéité des sas et les systèmes de survie en circuit fermé.
4. Étudier quantitativement la manutention et le filtrage des poussières, à l'appui des objectifs susmentionnés.

**Objectif SPS-9 : Sciences physiques nécessaires à l'amélioration de l'efficacité de la conversion de l'énergie.**

Les systèmes énergétiques sont des éléments essentiels de toutes les activités de l'exploration spatiale. De nouvelles technologies énergétiques efficaces seront nécessaires pour alimenter les engins spatiaux au-delà des orbites basses terrestres, pour créer des habitats durables sur des surfaces planétaires, ainsi que pour les systèmes de survie, le transport en surface et les expériences et les expéditions scientifiques.

Le Canada est un chef de file mondial dans le développement de plusieurs de ces technologies de stockage de l'énergie et cette expertise doit être appliquée au profit des activités canadiennes d'exploration spatiale.

**Études :**

1. Les semi-conducteurs pour la conversion de l'énergie solaire en électricité, avec certification pour les vols spatiaux.
2. La technologie des piles à combustible, avec certification pour les vols spatiaux.
3. Le stockage de l'énergie électrique, avec certification pour les vols spatiaux.
4. Les besoins en énergie nucléaire pour les longues missions d'exploration planétaire.
5. Les matériaux et les systèmes assurant une conversion thermoélectrique plus efficace de l'énergie, pour les applications spatiales.

**Objectif SPS-10 : Interactions du rayonnement avec la matière et les matériaux.**

La compréhension et la caractérisation des sources de rayonnement dans le milieu spatial est d'une importance primordiale pour maintenir la présence humaine dans l'espace.

De concert avec l'objectif de surveillance du rayonnement spatial, cet objectif vise à concevoir de nouveaux matériaux pour protéger les engins spatiaux en blindant les systèmes et la vie qui s'y trouvent, afin de réduire les risques et d'accroître la sécurité de l'exploration spatiale.

**Études :**

1. Définir le rayonnement dans le milieu spatial et ses conséquences pour les humains.
2. Concevoir, évaluer, valider et mettre en œuvre des matériaux et des nanorevêtements pour améliorer la protection contre le rayonnement spatial et protéger les opérations spatiales.
3. Concevoir, évaluer, valider des matériaux et les revêtements pour protéger les humains contre le rayonnement spatial.
4. Concevoir, quantifier et valider des modèles scientifiques de dommages cellulaires et tissulaires dus au rayonnement à divers niveaux d'énergie.
5. Mettre au point des technologies non invasives pour quantifier les dommages radio-induits dans les cellules et les tissus.

**Autres considérations**

La communauté canadienne des chercheurs en sciences physiques de l'espace estime que l'on doit tenir compte d'autres aspects liés aux grands objectifs scientifiques, comme l'avait demandé le président de l'ASC au début de l'atelier. Ceux-ci comprennent :

- s'appuyer sur notre riche expérience en vols spatiaux;
- mettre à profit le milieu universitaire et harmoniser les axes de recherche;
- faire preuve de souplesse et de flexibilité pour s'adapter au calendrier international;
- s'aligner sur les stratégies et les priorités scientifiques et technologiques du gouvernement canadien;
- promouvoir des partenariats internationaux bonifiés.

Les expériences en sciences physiques (microgravité) s'appuient sur notre patrimoine en matière de vols spatiaux. Ces expériences remontent aux premiers séjours de longue durée d'astronautes dans l'espace, avec *Skylab* en 1973. Depuis, les expériences ont porté sur divers sujets : la combustion, les matériaux, les fluides, la croissance des cristaux de protéines, la physique fondamentale et les démonstrations technologiques. Les chercheurs canadiens en sciences physiques de l'espace ont également acquis une expérience spatiale dans la plupart de ces sous-disciplines, grâce à des missions sur des plates-formes en quasi-chute libre, comme les tours d'impesanteur et les avions en trajectoire paraboliques, les fusées-sondes et les satellites



récupérables, la navette spatiale, la station spatiale *MIR*, et maintenant la Station spatiale internationale.

Le programme canadien en sciences physiques de l'espace fait participer la communauté universitaire depuis 1984 grâce aux fonds de contrepartie fournis par le CRSNG et l'industrie canadienne. Depuis, les chercheurs canadiens ont participé à la conception expérimentale, aux essais et à la qualification des missions scientifiques dans l'ensemble des sous-disciplines des sciences physiques de l'espace. Cet effort a permis de réaliser des découvertes profondes en gravité réduite, y compris la quantification du rôle de la convection induite par l'effet Marangoni (tension de surface) à la surface d'un liquide en évaporation, ainsi que l'influence de la gravité sur l'angle de contact.

Les expériences en sciences physiques ont été adaptées avec succès aux calendriers des missions internationales. La recherche expérimentale dans des milieux en quasi-chute libre a été largement entravée par des problèmes d'accès, ce qui a occasionné un long temps d'attente entre les vols. Cela est vrai pour des expériences autant dans des missions spatiales habitées (navettes, Soyouz), que des fusées suborbitales (2,5 années de préparation pour un vol de 7 à 14 minutes) et des satellites récupérables (2,5 années de préparation pour des missions de 14 à 17 jours).

La communauté internationale s'est adaptée à ces reports de calendrier dans la préparation de ces missions, et aussi aux retards habituels dans le parachèvement de l'ISS, en : (a) poursuivant le développement des technologies nécessaires pour atteindre les objectifs de la communauté scientifique, (b) planifiant d'autres vols paraboliques et missions de satellites récupérables et suborbitaux, (c) préparant l'expérience et/ou la mission suivante, selon les fonds disponibles, et (d) développant des occasions pour les Canadiens et transférant les connaissances pour aider directement l'industrie canadienne.

La première possibilité, pour le Canada, de procéder à des expériences répétables a été définie à la fin des années 1990 avec les expériences à bord de la station spatiale russe *MIR*. L'ISS est en voie d'achèvement et constituera un laboratoire de classe mondiale en quasi-chute libre : le temps est venu de procéder à des expériences régulièrement répétables en sciences physiques dans l'espace.

Les sous-disciplines des sciences physiques de l'espace sont harmonisées naturellement avec la stratégie et les priorités du gouvernement du Canada des sciences et de la technologie. Les expériences passées des chercheurs canadiens ont directement porté sur les priorités du gouvernement en matière d'énergie, de santé, de biotechnologies, de technologies des communications et de l'information (médias).

Les chercheurs canadiens sont fortement intéressés à poursuivre les expériences en quasi-chute libre. Le programme canadien reçoit jusqu'à 50 propositions subséquentes à des annonces d'occasions par l'ASC. Ces projets représentent des centaines de personnes hautement qualifiées et visent à maintenir et accroître l'excellence reconnue du Canada dans ce domaine, ainsi que son expérience dans les vols spatiaux opérationnels.

Enfin, le programme en sciences physiques de l'espace a contribué à l'amélioration des partenariats nationaux et internationaux au fil des ans. Le programme a été associé à des missions de la NASA, de l'ESA, de la JAXA et de la Russie au cours des vingt dernières années. Une première coopération avec la Chine a eu lieu en 2002 avec une expérience sur un satellite récupérable. En 2005, le programme a commencé la préparation d'une future collaboration entre l'ASC et de l'Agence spatiale chinoise.

Annexe I : Comité directeur de l'atelier CSEW6

**Comité de rédaction :**

Nom	Titre	Rôle
V. J. Hipkin (Ph.D.)	Gestionnaire de sciences, Exploration planétaire, ASC	Facilitateur de l'atelier CSEW6
M. A. Dixon (Prof.)	Directeur, Controlled Environment Systems Research Facility, président, Département de biologie environnementale, University of Guelph	Président de l'atelier CSEW6, président du Comité consultatif sur l'exploration spatiale
J. R. Drummond (Prof.)	Chaire de recherche du Canada en télédétection des atmosphères, Dalhousie University	
L. Dotto	Rédacteur scientifique pigiste	
D. Williams (Prof.)	Directeur, McMaster Centre for Medical Robotics, professeur de chirurgie, Département des sciences de la santé, McMaster University	
R. Pudritz (Prof.)	Directeur, Origins Institute, professeur, Département de physique et d'astronomie, McMaster University	

**Coprésidents et chefs des groupes de travail disciplinaires**

M. Bamsey	Doctorant, ASC/University of Guelph	Systèmes de survie avancés
M. Beech (Ph.D.)		À inclure? N'a pas participé
L. Cohen (Ph.D.)	Scientifique, Sciences de la vie dans l'espace, ASC	Sciences de la vie dans l'espace
M. Dejmek (Ph.D.)	Scientifique, Sciences physiques dans l'espace, ASC	Sciences physiques dans l'espace
M. A. Dixon (Prof.)	Voir ci-dessus	Systèmes de survie avancés
J. R. Drummond (Prof.)	Voir ci-dessus	Atmosphère de Mars
J. Dupuis (Ph.D.)	Scientifique, Astronomie spatiale, ASC	Astronomie spatiale
A. Ellery (Ph.D.)	Département de génie mécanique et aérospatial, Carleton University	Astrobiologie
J. Elliott (Ph.D.)	Chaire de recherche du Canada en thermodynamique interfaciale, University of Alberta	Sciences physiques dans l'espace
D. Hart (Prof.)	Département de microbiologie et des maladies infectieuses, University of Calgary	Sciences de la vie dans l'espace
C. Herd, (Ph.D.)	Département des sciences terrestres et atmosphériques, University of Alberta	Astromatériaux
R. Herd	Conservateur, Collection nationale des météorites du Canada, Commission géologique du Canada, RNCAN	Astromatériaux
P. Hickson (Prof.)	Département d'astronomie et d'astrophysique, University of British Columbia	Astronomie spatiale
P. Johnson-Green (Ph.D.)	Scientifique principal, Sciences physiques et de la vie, ASC	Sciences de la vie dans l'espace
R. Léveillé (Ph.D.)	Chercheur invité, Exploration planétaire, ASC	Astrobiologie
W. Liu (Ph.D.)	Scientifique, Sciences solaires-terrestres, ASC	Science du milieu Soleil-Terre
J. Saary (Ph.D.)	University of Toronto et Recherche et développement pour la défense Canada (RDDC)	Médecine spatiale opérationnelle
P. Sullivan (Ph.D.)	Agent de projet, Médecine spatiale opérationnelle, ASC	Médecine spatiale opérationnelle
P. Sylvester (Prof.)	Département des sciences de la Terre, Memorial University of Newfoundland	Géologie et géophysique planétaire
A. Waker (Prof.)	Faculté des systèmes d'énergie et de sciences nucléaires, UOIT	Rayonnement
M.-C. Williamson (Ph.D.)	Scientifique, Exploration planétaire, ASC	Géologie et géophysique planétaire
L. Whyte (Ph.D.)	Chaire de recherche du Canada en microbiologie environnementale, Université McGill	Astrobiologie
A. Yau (Prof.)	Chaire de recherche industrielle CRSNG-Com Dev-ASC-Magellan Bristol en sciences spatiales expérimentales, University of Calgary	Science du milieu Soleil-Terre

**Organisation de l'atelier CSEW6 :**

L. Gilbert	Adjoint administratif, Exploration planétaire, ASC
S. Girouard	Adjoint administratif, Exploration planétaire, ASC
D. Lacelle (Ph.D.)	Chercheur invité, Exploration planétaire, ASC

Annexe II : Membres des groupes de travail par discipline

**Systèmes de survie avancés**

Dixon, M, président Guelph  
 Bamsey, M Guelph  
 Bonin, G Toronto  
 Braham, S Simon Fraser  
 Chappell, L MDA  
 Gosselin, A Laval  
 Graham, T Guelph  
 Lasseur, C ESA  
 Rondeau Vuk, T Guelph  
 Scott, A Com Dev  
 Stasiak, M Guelph  
 Wheeler, R NASA KSC  
**Astrobiologie**  
 Whyte, L (président) McGill  
 Anderson, D SETI  
 Banerjee, N Western Ontario  
 Best, M Victoria  
 Cloutis, E Winnipeg  
 Dietrich, P MDA  
 Dumas, S Laval  
 Ellery, A Carleton  
 Fought, J Alberta  
 Fortin, D Ottawa  
 Konnhauser, K Alberta  
 Leveille, R ASC/CSA  
 McKay, C NASA Ames  
 Nadeau, J McGill  
 Osinski, G Western Ontario  
 Pollard, W McGill  
 Pudritz, R McMaster  
 Sherwood-Lollar, B Toronto  
 Slater, G McMaster  
  
 Southam, G Western Ontario  
  
 Sapers, H Western Ontario  
 Suttle, C UBC  
 Vali, H McGill  
 Wing, B McGill  
**Astromatériaux**  
 Herd, C (président) Alberta  
 Cloutis, E Winnipeg  
 Davis, D Toronto  
  
 Flemming, R Western Ontario  
 Herd, R RNCAN  
  
 Higgins, M UQ à Chicoutimi  
 Hudon, P McGill  
 Kissin, S Lakehead  
 McCausland, P Toronto  
 Nicklin, I Musée royal de l'Ontario  
 Osinski, G Western Ontario  
 Spooner, E Toronto  
 Spray, J UNB  
 Srinivasan, G Toronto  
 Tait, K Musée royal de l'Ontario  
 Thomson, L UNB  
 Wilson, G Turnstone Geol. Services

**Atmosphère de Mars**

Drummond, J. R (président) Dalhousie  
 Barnes, G Routes  
 Bernath, P Waterloo  
 Chesser, H York  
 Conway, S York  
 Duck, T Dalhousie  
 Erkorkmaz, S MDA  
 Gagne, M-E York  
 Gafoor, N MDA  
 Girard, T Com Dev  
 Gordon, B Routes  
 Hackett, J Com Dev  
 Jones, D Toronto  
 Kaminski, J York  
 Lange, C Alberta  
 LeBlanc, L Dalhousie  
 LLewelyn, E Saskatchewan  
 McConnell, J York  
 Melo, S ASC/CSA  
 Mohammad, F York  
 Moreau, L ABB  
 Pathak, J York  
 Quine, B York  
 Rahnama, P Com Dev  
 Smith, K Routes  
 Strong, K Toronto  
 Taylor, P York  
 Ward, W UNB  
 Whiteway, J York  
**Médecine spatiale opérationnelle**  
 Saary, J (président) Toronto  
 Brown, R Vancouver General  
 Hospital  
 Gaudet, A Hôpital du Sacré-  
 Cœur de Montréal  
 Hirsch, N ASC/CSA  
 Lange, M Ottawa  
 Lehnhardt, K Western Ontario  
 Lim, D Toronto  
 Musson, D McMaster  
 Otto, C Ottawa  
 Petrescu, N Toronto  
 Saint-Jacques, D Inuulitsivik Health  
 Centre  
 Silverman, D Toronto  
 Smith, M Bubble Tech  
 Industries  
 Stewart, G Ottawa  
 Sullivan, P ASC/CSA  
 Whelan, S McMaster  
 Williams, D McMaster  
**Géologie et géophysique planétaire**  
 Sylvester, P (coprésident) Memorial  
 Williamson, MC (coprésident) ASC/CSA  
 Grasby, S RNCAN  
 Heimpel, M Alberta  
 Herd, R NRCAN  
 Jellinek, M UBC  
 McCausland, P Western Ontario  
 Osinski, G Western Ontario  
 Peterson, R Queens  
 Rivard, B Victoria  
 Samson, C Carleton  
 Soare, R Concordia  
 Stanley, S Toronto  
 Therriault, A RNCAN

**Annexe III – Liste des participants à l'atelier CSEW6**  
(page 1 de 3)

<b>Nom</b>	<b>Prénom</b>	<b>Organisation</b>	<b>Nom</b>	<b>Prénom</b>	<b>Organisation</b>
Abbasi	Viqar	ASC/CSA	Gurtuna	Ozgur	Turquoise Tech. Sols Inc.
Akingunola	Ayodeji	York Univ.	Haddad	Emile	MPB Comm. Inc.
Ali	Mohamed	Univ. Toronto (UTIAS)	Haltigin	Tim	Univ. McGill
Antonenko	Irene	Univ. Western Ontario	Hart	David	Univ. Calgary
Arkani	Hamed-Jafar	Univ. Toronto	Heald	Johanne	ASC/CSA
Asquin	Donald	Routes AstroEngin.Ltd.	Herd	Richard	RNCAN
Auclair	Simon	Univ. Western Ontario	Hickson	Paul	Univ. British Columbia
Bamsey	Matthew	ASC/CSA	Hipkin	Victoria (Vicky)	ASC/CSA
Barfoot	Tim	Univ. Toronto (UTIAS)	Hirsch	Natalie	ASC/CSA
Battler	Melissa	Univ. Western Ontario	Huber	Kathleen	ASC/CSA
Beauchamp	Louise	ASC/CSA	Hughson	Richard	Univ. Waterloo
Bell	Andrew	Com Dev, Canada	Jagersand	Martin	Univ. Alberta
Bellerose	Julie	JAXA/ISAS	Jayarajah	Christine	Univ. Toronto
Bergeron	Alain	INO	Johnson-Green	Perry	ASC/CSA
Berinstain	Alain	ASC/CSA	Jones	Brad	Neptec Design Group
Binsted	Kim	Univ. Hawaii	Joyal	Jean-Sébastien	Hôpital Ste-Justine
Biren	Marc	Univ. New Brunswick	Kaminski	Jacek	WxPrime Corporation
Boily	Jocelyn	AstroKeys Inc.	Kaspi	Vicky (Victoria)	ASC/CSA
Bolger	James	MDA	Kaya	Tarik	Carleton Univ.
Borra	Ermanno	Univ. Laval	King	Geoffrey	Univ. McGill
Boucher	Dale	Norcat	Koujelev	Alexander	ASC/CSA
Boudreault	Richard	Tech. Aérospatiales	Kruzelecky	Roman	MPB Comms Inc.
Braham	Stephen	Simon Fraser Univ.	Lacelle	Denis	ASC/CSA
Bridge	Nathan	Univ. Western Ontario	Lai	Jeanie	ASC/CSA
Brown	Ross	Vancouver Gen. Hospital	Lange	Marvin	Univ. Ottawa
Buckley	Nicole	ASC/CSA	Laurin	Denis	ASC/CSA
Buckley	Robin	Dalhousie Univ.	Lay	Chih-Ying	Univ. McGill
Cantin	Daniel	INO	Lebeuf	Martin	ASC/CSA
Carroll	Kieran	Gedex	Lee	Pascal	Mars Institute
Cavell	Ronald	Univ. Alberta – ISSET	Legacey	Denis	Legacey Consulting
Cloutis	Edward	Univ. Winnipeg	Lehnhardt	Kris	Univ. London, Health Sci Centre
Cofsky	Sylvain	ASC/CSA	Leshner	Rich	NASA
Daly de Carufel	Mike Guy	MDA Corporation Univ. Toronto (UTIAS)	Léveillé	Richard	Univ. McGill
Dejmek	Marcus	ASC/CSA	Levesque	Marc	INO
Dempsey	Dale	IRSC	Lim	Darlene	NASA Ames Res. Centre
Dietrich	Peter	MDA	Lim	Dawn	Univ. Toronto
Dixon	Laura	Carleton Univ.	Lipsett	Mike	Univ. Alberta
Dixon	Mike	Univ. Guelph	Liu	William	ASC/CSA

**Annexe III – Liste des participants à l'atelier CSEW6**  
(page 2 de 3)

<b>Nom</b>	<b>Prénom</b>	<b>Organisation</b>	<b>Nom</b>	<b>Prénom</b>	<b>Organisation</b>
Draisey	Sherry	Good Vibrations Eng. Ltd	Lovi	David	Univ. Alberta
Drummond	James	Dalhousie Univ.	Ma	Zhen Guo	Univ. Saskatchewan
Dsouza	Ian	Com Dev, Canada	Maag	Graeme	MDA
Dupuis	Erick	ASC/CSA	MacLeod	James	MDA
Dupuis	Jean	ASC/CSA	Mader	Marianne	ASC/CSA
Dutil	Yvan	Univ. Laval	Mah	Jason	Carleton Univ.
Ellery	Alex	Carleton Univ.	Mann	Ian	Univ. Alberta
Elliott	Janet	Univ. Alberta	Manuel	John	ASC/CSA
Eyer	Jesse	Univ. Toronto (UTIAS)	Marius- Phaneuf	René-Pier	ASC/CSA
Faragalli	Michele	Univ. McGill	Marsan	Bernard	ASC/CSA
Fazekas	Andrew	SkyNews	Martin	Eric	ASC/CSA
Fazel- Rastgar	Farahnaz	York Univ.	Martinez	Jose	DigiSpace
Flemming	Roberta	Univ. Western Ontario	Maszkiewicz	Michael	ASC/CSA
Forrest	Alexander	Univ. British Columbia	McCausland	Phil	Univ. Western Ontario
Fortier	Rejean	ASC/CSA	McConnell	John	York Univ.
Fortin	Michel	INO	McCullough	Emily	Univ. Western Ontario
Fougères	André	INO	Miles	David	Univ. Alberta
Furgale	Paul	Univ. Toronto (UTIAS)	Mississian	Marina	Com Dev
Gagnon	Martin	UQ à Trois- Rivières	Moffat	Brian	Com Dev
Gaudet	Adrienne	Hôpital Sacré- Coeur Montréal	Moreau	Louis	ABB Bomem Inc.
Ghadaki	Farnaz	Univ. Toronto (ASX)	Mulugeta	Lealem	Chercheur indépendant
Ghafoor	Nadeem	MDA	Musson	David	McMaster Univ.
Girard	Terry	Com Dev	Naud	Marie-Ève	Université de Montréal
Giroux	Jacques	ABB	Negulic	Eric	Dalhousie Univ.
Giroux	Richard	ASC/CSA	Niederberger	Thomas	Univ. McGill
Gordon	Blair	Routes AstroEngineering	Osinski	Gordon	Univ. Western Ontario
Graham	Thomas	Univ. Guelph	Otto	Christian	Univ. Ottawa
Grasby	Stephen	Geol. Survey Canada	Ouellet	Alain	ASC/CSA
Greene	Michael	Univ. Toronto (UTIAS)	Palmieri	Benoit	ASC/CSA
Gulder	Omer	Univ. Toronto (UTIAS)	Patel	Aabid	ASC/CSA

Annexe III – Liste des participants à l'atelier CSEW6  
(page 3 de 3)

<b>Nom</b>	<b>Prénom</b>	<b>Organisation</b>
Pearce	Geoffrey	Univ. Western Ontario
Peterson	Ron	Queen's Univ.
Petrescu	Nicolae	Univ. Toronto
Piontek	Derrick	Bristol/Magellan Aerospace
Pope	Tim	INO
Proulx	Antoine	INO
Quine	Brendan	York Univ.
Radtke	Kristin	Univ. McGill
Rankin	Robert	Univ. Alberta
Ravindran	Gita	MDA
Reid	Donnie	Vancouver Aquarium/PLRP
Renaud	James	ASC/CSA
Rhatigan	Jennifer.L.	NASA
Richard	James	Electric Vehicle Control Ltd.
Richards	Robert (Bob)	Optech
Rivard	Benoit	Univ. Victoria
Roberts	Caroline	Thoth Technology Inc.
Rocheleau	Simon Guy	Univ. Laval
Rondeau Vuk	Theresa	Univ. Guelph
Rowlands	Neil	Com Dev
Saary	Joan	Univ. Toronto
Saint-Jacques	David	Inulitsivik Health Centre
Samson	Claire	Carleton Univ.
Sapers	Haley	Univ. Western Ontario
Scott	Al	Com Dev
Shademan	Azad	Univ. Alberta
Shah	Amee	Univ. Toronto (UTIAS)
Shepard	Rebekah	UC Davis
Sherwood	Barbara	Univ. Toronto
Lollar		
Shortt	Kevin	Canadian Space Society
Silverman	Greg	Univ. Toronto
Singleton	Alaura	Univ. Western Ontario
Smith	Charladean	ASC/CSA
Smith	Martin	Bubble Tech Industries
Soare	Richard	Concordia Univ.
Southam	Gordon	Univ. Western Ontario
Spencer	Henry	SP Systems
Spray	John	Univ. New Brunswick
Sterling	George	ASC/CSA
Stewart	Gregory	Univ. Ottawa
St-Maurice	Jean-Pierre	Univ. Saskatchewan
Stokan	Edward	Univ. Western Ontario
St-Pierre	Jean	L-3 MAPPS
Studd	Duncan	Carleton Univ.
Sullivan	Patrick	ASC/CSA
Sylvester	Paul	Memorial Univ.
Tanguay	Danielle	Trema Gestion Conseil Inc.
Tétreault	Martin	ASC/CSA
Thompson	Lucy	Univ. New Brunswick
Thomson	Laura	Univ. Western Ontario
Tomi	Leena	ASC/CSA
Trichtchenko	Larisa	NRCan

<b>Nom</b>	<b>Prénom</b>	<b>Organisation</b>
Urbain	Jean-Pierre	Science Presse
Vachon	Eric	ASC/CSA
Veillette	Dominic	Univ. Western Ontario
Waker	Anthony	Univ. Ontario Inst. Tech.
Ward	William	Univ. New Brunswick
Whelan	Sheila	McMaster Univ.
Whiteway	James	York Univ.
Whyte	Lyle	Univ. McGill
Wilhelm	Roland	Univ. McGill
Williams	David R.	McMaster Univ.
Williamson	Marie-Claude	ASC/CSA
Wing	Boswell	Univ. McGill
Wong	Julielynn	Univ. Pittsburgh
Wu	Di	York Univ.
Yau	Andrew	Univ. Calgary
Zee	Robert E.	Univ. Toronto (UTIAS)
Zwick	Harold	MDA

