

Architecture de mission utilisant le Starship de SpaceX pour rendre possible une présence humaine durable sur Mars

Article paru le 13 septembre 2022 dans New Space, une des publications scientifiques de MARY ANN LIEBERT, INC. Vol. 10 n°3 ; 2022. Auteure : Jennifer L. Heldmann, Division of Space Sciences and Astrobiology, Planetary Systems Branch, NASA Ames Research Center. Première co-auteurice Margarita Marinova, Independent Consultant, Santa Monica, California. Dix-sept autres co-auteurs, universitaires ou ingénieurs.

ABSTRACT

L'un des principaux objectifs de l'exploration spatiale par vols habités est de faire de l'humanité une espèce multiplanétaire pour que la Civilisation s'étende au-delà de la planète Terre. L'établissement d'une présence humaine autonome sur Mars est essentiel pour atteindre cet objectif et l'utilisation des ressources in situ (ISRU) sur cette planète est essentielle pour permettre aux hommes d'y devenir autonomes dans des avant-postes pérennes. Cet article de New Space se concentre sur une architecture de mission utilisant le Starship de SpaceX comme mode de transport des équipements et des hommes. Les premiers starships seront robotisés et offriront une capacité, sans précédent, pour déposer 100 tonnes de fret en surface par vaisseau et pour permettre d'effectuer les travaux nécessaires pour préparer une présence humaine pérenne et autonome sur Mars. Nous proposons que les activités les plus prioritaires pour ces premiers vaisseaux incluent la prospection des ressources notamment la cartographie et la caractérisation de la glace d'eau identifiée, avec l'ISRU en vue ; les tests de technologies essentielles ; le pré-positionnement de fournitures pour les vols ultérieurs ; le développement des premières infrastructures.

INTRODUCTION

L'exploration spatiale comporte de nombreux secteurs et objectifs interconnectés tels que la recherche de la vie en-dehors de la Terre, la compréhension de la formation de notre Univers et, comme discuté ici, les voies utilisables pour faire évoluer l'humanité en une espèce multiplanétaire. Une étape fondamentale dans le cadre de ce dernier processus est le développement d'une implantation humaine autonome sur Mars, planète la plus proche capable d'héberger des établissements viabilisés et viables. Le projet d'implantation de l'homme sur Mars implique (1) des missions robotiques suivies de missions habitées avec des équipages relativement petits (10 à 20 personnes) ; (2) le développement d'infrastructures pour permettre une croissance planifiée de la communauté, puis l'évolution vers un établissement autonome.

La dernière condition nécessitera une utilisation importante de ressources in situ (ISRU), c'est-à-dire qu'on aura intérêt pour pouvoir survivre sur Mars sur le long terme, à utiliser les ressources locales pour se libérer de la dépendance de la Terre. L'extraction et le traitement de ressources in situ, critiques pour les ergols, le support-vie, la génération d'énergie et la protection contre les radiations ou le gaz d'échappement des fusées, peuvent réduire considérablement la masse qu'on devra lancer depuis la Terre ainsi que les risques et les coûts de l'établissement, humain et robotique, sur Mars.

La ressource la plus précieuse pour l'ISRU sur Mars, ce sont les vastes dépôts de glace d'eau. L'eau sera en effet nécessaire pour le support-vie et l'agriculture mais elle sera aussi utilisée pour produire par électrolyse, de l'hydrogène et de l'oxygène pour les piles à combustibles et les moteurs de fusée. Chaque kg de consommables transporté depuis la Terre implique un coût d'environ 200 kg d'ergols pour le lancement, le transport et l'atterrissage sur Mars (bien entendu cette quantité peut varier selon les spécificités du véhicule). L'ISRU de la glace d'eau facilitera le développement d'une civilisation

autonome puisque le coût de lancement et de transport de cette masse essentielle aussi bien que le risque de manquer, seront éliminés.

En raison de l'importance de l'eau, la caractérisation de la ressource en glace sur Mars est d'ores et déjà une priorité absolue pour les vols robotisés préparatoires aux vols habités. Nous nous concentrerons donc sur l'évaluation des vols initiaux robotisés visant à caractériser la disponibilité des ressources en glace ainsi que les méthodes et les équipements nécessaires pour l'extraire et la traiter. L'installation de l'homme sur Mars est un objectif suffisamment stimulant pour, dès maintenant, développer en outre une expertise sur de nombreux sujets tels que la construction, la planification et le développement d'infrastructures, les systèmes de production d'énergie, les systèmes de communication et tout ce qui concerne la santé et la sécurité de l'homme.

Nous proposons une architecture de mission reposant sur l'utilisation du Starship pour toutes les missions en surface. Les premiers vaisseaux robotisés qui atterriront sur Mars devront être dédiés à la prospection des ressources, au développement des infrastructures et aux tests des technologies nécessaires pour l'arrivée et le séjour de l'homme. Ces premières missions doivent démontrer la possibilité de faire atterrir des vaisseaux habités et permettre de s'assurer d'un ou plusieurs sites d'atterrissage potentiels. Les vols de starship robotisés donnent également la possibilité de tester aussi tôt que possible les éléments essentiels à l'ISRU et à l'établissement humain à long terme. Ils pourront aussi permettre de construire de manière autonome les éléments d'infrastructure de base tels que routes, aires d'atterrissage et remblais protecteurs.

A. ARCHITECTURE DE MISSION AVEC STARSHIP

Considérant une architecture de mission basée sur les vaisseaux de SpaceX, nous formulons les hypothèses suivantes concernant les capacités de la Sté et décrivons l'architecture de mission qui doit en découler.

Nous proposons qu'initialement au moins deux vaisseaux robotisés soient lancés vers Mars pour y atterrir. Ces véhicules sans équipage auront la capacité de se poser à proximité l'un de l'autre (à environ 1 km de distance, pour éviter les dommages qui pourraient être provoqués par les jets des propulseurs et la poussière soulevée) ou pourraient aller se poser dans des régions distinctes si une reconnaissance de plusieurs sites s'avère nécessaire pour sélectionner le lieu d'atterrissage des missions habitées. L'arrivée des vaisseaux sur Mars pourrait également être échelonnée sur 1 à 2 mois, afin qu'une évaluation du site puisse être effectuée avec les données renvoyées par le premier vaisseau avant de décider du site final pour le ou les vaisseaux suivants envoyés lors de la même fenêtre de lancement. Ces premiers vaisseaux sans équipage devraient rester indéfiniment en surface de Mars et servir d'infrastructure à la future Base habitée.

Les fenêtres de lancement de la Terre à Mars s'ouvrent tous les 26 mois environ, lorsque la Terre et Mars sont alignées de manière optimale pour un voyage interplanétaire avec une vitesse maximale et des coûts de propulsion minimaux. La deuxième série de lancements, 26 mois après la première, comprendrait au moins deux véhicules sans équipage et au moins deux vaisseaux avec équipage ; tous ces véhicules atterriraient sur le même site préalablement choisi. Les lancements se poursuivraient à l'ouverture de chacune des fenêtres suivantes. Le plan optimal consisterait à ce que le nombre total de vaisseaux double au minimum à chaque fois, avec une répartition à déterminer entre véhicules robotisés et véhicules habités. Tous les atterrissages devraient être concentrés sur le site de la future Base.

Capacités du Starship

Les starships seront lancés par un lanceur Super Heavy de SpaceX. Cette fusée sera entièrement réutilisable et pourra assurer le transport aussi bien vers l'orbite terrestre que vers la Lune ou Mars. Le

Starship servira d'atterrisseur aussi bien pour les missions sans qu'avec équipage, avec adaptation du volume de charge utile en fonction de la mission.

Compte tenu de sa capacité attendue d'emport de charge utile, le Starship sera en mesure de transporter l'équipement et les hommes nécessaires pour permettre l'exploration humaine et, au-delà, la création de véritables villes sur Mars. Elon Musk a exposé comment les starship prévus pour Mars effectueront leur transfert d'ergols dans l'espace : un lanceur superheavy enverra un starship équipé pour le voyage, sur orbite terrestre où il sera approvisionné en CH₄ et en O₂ par des vols successifs de tankers (d'autres starships qui ne transporteront que des ergols) ; les lanceurs et leur tanker retourneront sur le site de lancement pour être réutilisés. Une fois le plein fait, le starship prévu pour le voyage partira vers Mars. Le remplissage du starship en orbite corrigera les effets négatifs de l'équation des fusées (l'équation de Tsiolkovski) puisqu'il permettra de transporter de beaucoup plus grosses charges utiles que celles qu'il aurait pu hisser tout seul en orbite.

Pour la présente analyse, les auteurs utilisent les capacités attendues du Starship. Ce vaisseau pourra déposer 100 tonnes de charge utile en surface de Mars et pourra utiliser à la fois des capacités de stockage avant et arrière. Il mesure 9 m de diamètre et 50 m de long. Les dimensions nominales de la porte de sas pour déchargement de charge utile sont en principe de 3m x 3m mais pourront être personnalisées si nécessaire. On aura besoin d'une autonomie robotique importante pour le déploiement en surface des charges utiles initiales et pour leur fonctionnement ; les charges utiles ultérieures seront plus facilement contrôlées puisqu'il y aura des hommes à bord et sur Mars.

Le Starship sera également capable de rapporter des hommes et du fret de Mars sur la Terre. Leur vaisseau sera rempli d'ergols sur Mars à partir des ressources locales traitées par une installation de production locale. Le vaisseau décollera de Mars une fois le plein fait, pour effectuer un retour direct sur Terre.

Vols habités du Starship

Les vols de starships transportant les premiers hommes sur Mars seront planifiés pour la fenêtre de lancement vers Mars suivant celles des deux premiers starships sans équipage. Par conséquent, à l'arrivée de l'homme sur Mars, il y aura déjà deux vaisseaux cargo en surface. La seconde série de missions pourra inclure deux vaisseaux habités et d'autres vaisseaux cargo robotisés. Les vaisseaux habités disposeront d'un volume d'environ 1 100 m³ dont la plus grande partie sera pressurisée, d'un réservoir de LOX de 800 m³ et d'un réservoir de méthane de 600 m³ avec une structure en acier inoxydable.

Les réservoirs pour LOX et méthane pourraient, une fois sur Mars, devenir des espaces de vie pressurisés. Nous recommandons que les premiers vaisseaux habités embarquent chacun 10 à 20 personnes et environ 100 tonnes de fret. Le fret transporté comprendra nécessairement des équipements supplémentaires nécessaires à la santé et à la productivité humaines pendant le voyage et en surface martienne. Ces vaisseaux transporteront également le matériel nécessaire pour faire fonctionner la Base, ce qui comprendra probablement des équipements pour la production d'électricité, l'extraction d'eau, des aires d'atterrissage préfabriquées, des boucliers anti-radiations, un équipement de contrôle de la poussière et des abris extérieurs pour les hommes et leurs équipements.

Pendant les premières années sur Mars et jusqu'à ce que des habitats supplémentaires soient construits, les hommes vivront probablement dans leurs starships. Le risque de radiations devra donc être évalué et atténué en conséquence et les équipements nécessaires pour faire fonctionner cette infrastructure initiale devront être prévus. Les premiers starships robotisés pourront également être déplacés selon les besoins. Ce seront des atouts précieux pour le stockage, l'habitat et in fine, comme source de métaux et de composants.

B. UTILISATION DES RESSOURCES IN SITU

Puisqu'une présence humaine continue sur Mars repose sur l'ISRU, un objectif clé pour les premières missions de starships robotisés sera de confirmer la présence de glace d'eau (et d'autres ressources souhaitées) et de caractériser les gisements de ces ressources. Cela servira (1) soit à valider la sélection du site d'atterrissage comme satisfaisant pour un atterrissage habité ultérieur, (2) soit à fournir des informations précieuses pour envisager de déplacer le site d'atterrissage habité vers un autre endroit. Nous décrivons ci-après plusieurs utilisations de l'eau pour l'ISRU et suggérons une charge utile pour caractériser la distribution et les propriétés que la glace d'eau proche de la surface devra avoir pour être utilisable pour l'ISRU.

Utilité de la glace d'eau en tant que ressource locale

Une estimation des besoins en eau pour les 5 à 7 premières années de présence humaine est nécessaire pour établir un budget hydrique pour une Base martienne initiale. Sur la base de l'expérience de la Station Spatiale Internationale (ISS), la quantité d'eau nécessaire (sans recyclage) est estimée à 0,6 kg/h/personne, ce qui inclut l'eau pour la consommation, l'hygiène et la vie quotidienne. Cette estimation est plus élevée pour le long terme, avec moins de restrictions pour les besoins d'hygiène personnelle par rapport aux protocoles actuels de l'ISS, et/ou pour utilisation pour des activités telles que la lessive et le lavage de la vaisselle.

La quantité d'eau requise par personne augmentera également à mesure que la communauté martienne grandira et comprendra éventuellement des activités utilisant de l'eau pour autre chose que l'hygiène personnelle et l'hydratation (par exemple, le traitement du régolithe, la production artisanale/industrielle, la construction, l'assainissement du perchlorate, la croissance des plantes, l'entretien des habitats). Pour la conception de systèmes de traitement et de distribution d'eau sur Mars, il est important de noter qu'il y aura diverses utilisations qui auront chacune des exigences différentes en matière de pureté (par exemple, l'eau pour la consommation humaine par rapport à l'eau pour la construction).

En plus de permettre la survie des habitants, l'eau sera une des deux sources de production d'ergols sur Mars. Ces ergols seront indispensables pour permettre aux starships de revenir sur Terre, avec à la fois une cargaison et des passagers. Le Starship a un rapport comburant/carburant (O/F pour Oxydizer /Fuel) de 3,5. Avec sa capacité d'emport d'ergols de 1.200 tonnes, le Starship a besoin de 933 tonnes d'oxygène et 267 tonnes de méthane. La réaction ISRU adéquate pour produire cet oxygène et ce méthane est $\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ par utilisation de l'électrolyse de l'eau et de la réaction de Sabatier.

Cette réaction nette produit un rapport massique O/F de 4. L'excès d'oxygène produit pourra être utilisé comme gaz atmosphérique dans les habitats. La quantité totale d'eau nécessaire pour recharger un starship par ces procédés est de l'ordre de 600 tonnes métriques, et équivaut à un cube de glace d'environ 9 m de côté.

Il existe deux options pour obtenir cette eau afin d'assurer les vols de retour sur Terre. Elle peut être transportée sur Mars depuis la Terre dans des starships-cargo. Cette approche sera particulièrement importante pour assurer les besoins vitaux des premiers hommes sur Mars avant que l'ISRU de la glace d'eau soit entièrement fonctionnelle et fiable ; de même pour la production d'ergols. Mais cela sera très coûteux en masse. Il sera très vite plus rationnel de l'extraire du sol de Mars.

Accessibilité de la glace d'eau sur Mars

En tant que ressource nécessaire à la survie et au développement d'une civilisation humaine sur Mars, l'emplacement et la facilité d'accès à la glace d'eau sont des facteurs clés pour la sélection du site d'atterrissage. L'emplacement d'une Base martienne adjacente au site d'atterrissage, est l'une des décisions les plus critiques à prendre car toutes les planifications d'architecture et d'activités doivent être compatibles avec les caractéristiques de ce site.

Un plan permettant de caractériser la glace à proximité du site d'atterrissage des premiers starships robotisés doit donc être établi. Cette reconnaissance du terrain sur le terrain est essentielle pour valider les hypothèses basées sur des données recueillies depuis l'orbite couplées à une modélisation géologique. L'une des raisons principales pour caractériser la glace dans le sous-sol immédiat est d'éclairer le développement possible du système ISRU. Connaître la forme et la pureté des dépôts de glace (par exemple, glace compacte ou glace interstitielle) ainsi que sa distribution (profondeur jusqu'à la glace, concentrations/hétérogénéités latérales et verticales), est important pour prévoir les opérations d'extraction et de traitement.

Comprendre la distribution et la quantité de glace à proximité du lieu d'atterrissage peut être particulièrement important, car les observations orbitales manquent de précision. On fait souvent des moyennes sur plusieurs kilomètres carrés, et les variations locales peuvent être importantes. Ces missions de reconnaissance robotiques montreront non seulement si le site est acceptable pour y faire atterrir des starships en sécurité mais fourniront également des données pour déterminer si la ressource en glace existe bien à proximité et si elle est effectivement exploitable.

Caractérisation des ressources de glace

La caractérisation des ressources en glace proche de la surface sera réalisée en analysant les données collectées par les rovers et autres véhicules déposés sur le sol de Mars par les premières missions de starship robotisés. Cette caractérisation in situ fournira les informations nécessaires pour évaluer la qualité de la ressource en glace sur le site d'atterrissage choisi et éclairera la décision finale pour le lieu d'atterrissage des missions habitées.

Plusieurs mesures in situ sont nécessaires pour caractériser la ressource de glace. En plus de la composition, de la distribution et de la forme du dépôt, le mort-terrain au-dessus du dépôt doit être connu. La profondeur et les propriétés des matériaux du mort-terrain influenceront la conception et le fonctionnement du dispositif ISRU nécessaire pour accéder jusqu'à la glace. La géologie locale et l'adaptation du site pour les véhicules sont également importantes pour la planification des systèmes de traitement et de transport de la ressource à grande échelle. Pour atteindre ces objectifs, nous proposons une batterie d'instruments qui a déjà été sélectionnée pour la Lune par la NASA : VIPER (Volatile Investigating Polar Exploration Rover).

Il est prévu d'envoyer sur la Lune au milieu des années 2020 une mission VIPER pour y caractériser la distribution latérale et verticale des composés volatils afin de disposer des informations nécessaires pour les architectures ISRU. Bien que les observations orbitales de composés volatils fournissent déjà des informations précieuses, la mission VIPER pourra fournir des mesures à une résolution centimétrique sur des distances kilométriques, précisions qui sont nécessaires pour générer les « modèles de minéraux volatils » adéquats pour évaluer le potentiel des ressources. La situation est similaire pour Mars puisque les données orbitales couplées à la modélisation numérique suggèrent une glace proche de la surface. Mais des données in situ avec un plus grand degré de confiance et à des échelles spatiales plus fines sont importantes pour vérifier le potentiel d'ISRU et sont nécessaires pour optimiser les solutions d'ingénierie pour extraire la glace.

La charge utile VIPER recommandée pour le vol vers Mars se compose de plusieurs instruments intégrés à une plate-forme de mobilité (mouvement latéral) et à une foreuse (accès vertical) pour caractériser la glace proche de la surface (voir ci-dessous la « Fig. 2 »). La charge utile comprend un spectromètre à neutrons, un spectromètre à proche infrarouge, un spectromètre de masse et un sous-système de forage. Chaque élément de la charge utile est présenté ci-dessous.

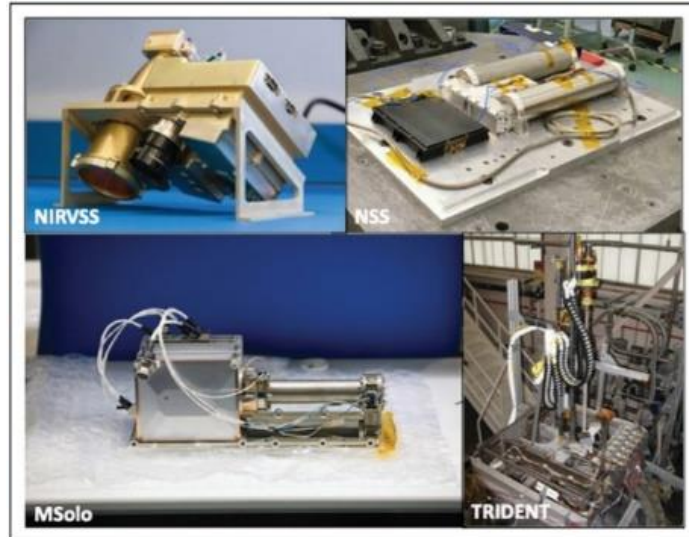


Fig. 2. NASA's VIPER payload: NIRVSS (top left, photo credit NASA), NSS (top right, photo credit NASA), MSolo (bottom left, photo credit NASA/Glenn Benson), and TRIDENT (bottom right, photo credit Honeybee Robotics/Kris Zacny). NIRVSS, Near-InfraRed Volatiles Spectrometer System; NSS, Neutron Spectrometer System; TRIDENT, The Regolith and Ice Drill for Exploring New Terrain; MSolo, Mass Spectrometer Observing Lunar Operations.

Système de spectromètre à neutrons (NSS). La spectroscopie à neutrons a été utilisée sur de multiples cibles du système solaire pour mesurer la composition globale des corps visés et l'abondance des composés volatils hydrogénés. Le NSS fournit (1) une estimation de l'abondance d'hydrogène, via le flux de neutrons épithermiques et (2) des informations chimiques sur le régolithe, via le flux de neutrons thermique à épithermique. Le NSS est donc un outil clé pour cartographier la glace enfouie.

Comme indiqué, le NSS peut être activé pendant les opérations de recherche aussi bien que de forage. L'instrument fonctionne en mesurant les changements dans le flux de fuite de neutrons à basse énergie hors du régolithe. Ces neutrons sont produits par les rayons cosmiques galactiques (GCR). Ils sont si énergétiques qu'ils brisent les molécules et peuvent même briser les noyaux des atomes des matériaux de surface. Les neutrons libérés interagissent avec d'autres noyaux et perdent ainsi de l'énergie, se thermalisant au cours du processus.

L'hydrogène est l'élément le plus efficace pour thermaliser les neutrons en raison de sa similitude en masse avec les protons. L'eau aura nécessairement une signature d'hydrogène, bien qu'un signal d'hydrogène en lui-même n'identifie pas exclusivement la présence d'eau.

Système de spectromètre de volatils dans le proche infrarouge (NIRVSS, Near-InfraRed Volatiles Spectrometer System). Ce système mesure la composition des volatils, la minéralogie, les propriétés thermo-physiques et la géomorphologie à petite échelle. L'instrument fonctionne à la fois en visualisant la surface sous un rover pendant qu'on le conduit et également les échantillons de forage. En utilisant différentes longueurs d'onde pour éclairer la surface, le NIRVSS étudie cette surface et le site d'extraction, fournissant le contexte minéral de la surface et du régolithe.

Spectromètre de masse observant les opérations lunaires. L'instrument MSolo (Mass Spectrometer Observing Lunar Operations) est un instrument commercial modifié, basé sur le spectromètre de masse quadripolaire haute performance Transpector MPH de la Sté INFICON. L'instrument analyse les matières volatiles libérées du régolithe lors des déplacements ainsi que lors de l'extraction de régolithe par forage. MSolo peut détecter et différencier les volatils de faible poids moléculaire, entre 1 et 100 unités de masse atomique (« u »). Cette capacité permet d'estimer l'abondance de l'eau (H₂O) et d'identifier les densités relatives de diverses espèces volatiles (y compris H₂, He, CO, CO₂, CH₄, NH₃, H₂S, SO₂).

Le foret à glace et à régolithe pour explorer de nouveaux terrains. Le Regolith and Ice Drill for Exploring New Terrain (TRIDENT) est un foret rotatif à percussion, de 1 m de long, développé par la Sté Honeybee Robotics et conçu pour remonter en surface du régolithe sec ou enrichi en volatils, à fin d'analyse par NIRVSS et MSolo. TRIDENT comporte une face pleine avec des fraises en carbure à l'extrémité d'une tarière de 1 m pour briser le régolithe et transporter les brisures à la surface. La tarière comprend deux sections : celle des 10 cm inférieurs (également appelée « mèche d'échantillonnage ») qui a des cannelures profondes à angle faible, idéales pour rétention du matériau ; la section supérieure de 90 cm a des cannelures peu profondes à angle raide qui conviennent à un retrait efficace de matière.

Cette conception permet une approche d'« échantillonnage par morsure » qui préserve la stratigraphie du sous-sol. Pour réduire la puissance de forage, TRIDENT fournit du régolithe en dix « morsures » de 10 cm chacune jusqu'à 1m de profondeur (ou plus profondément selon la longueur du train de tiges).

Pour détecter une glace plus profonde, dans les quelques dix mètres supérieurs de la surface martienne, on peut également envisager d'embarquer une charge utile géophysique sur le starship. La glace peu profonde est préférable pour sa facilité d'accès, tandis que la glace plus profonde peut être plus appréciée en raison de sa pureté plus élevée. Dans tous les cas, il est également important de comprendre les caractéristiques de la glace en fonction de la profondeur et bien sûr son épaisseur totale, pour pouvoir en planifier l'utilisation. De multiples techniques géophysiques sont utilisées sur la Terre pour détecter la glace souterraine, y compris le radar pénétrant le sol, le sondage électrique de résistivité, la réfraction sismique et les relevés électromagnétiques. On peut envisager que les instruments soient déployés en surface ou aéroportés, en fonction des possibilités de mobilité dans la zone du site d'atterrissage.

Les systèmes de mobilité sont essentiels pour permettre la distribution de la glace. Il existe pour le Starship, deux types différents de sites d'atterrissages potentiels riches en glace : (1) la glace souterraine dans les plaines de l'hémisphère nord et (2) les tabliers de débris lobés (LDA), glaciers rocheux enfouis sous une couche superficielle de roches et de débris. Chaque type de site nécessite probablement un style différent de plateforme de mobilité.

La glace des plaines du nord pourrait facilement être parcourue par un rover « ordinaire » étant donné le terrain relativement plat et la capacité de naviguer autour de tous les obstacles locaux.

La collecte de données sur un LDA est probablement plus complexe étant donné la topographie compliquée souvent associée à ses caractéristiques géologiques. À moins qu'une zone particulièrement lisse avec des propriétés géotechniques appropriées ne soit trouvée, un rover ordinaire ne pourra probablement pas traverser une LDA compte tenu de l'instabilité attendue de la surface ainsi que de la taille et du nombre de pierres et de rochers (moraine). Dans ce cas, des ressources aéroportées, des véhicules dotés de capacités de mobilité améliorées et/ou des impacteurs instrumentés pourraient être nécessaires.

L'état actuel d'un LDA (s'il a continué à s'écouler ou non) affectera également l'emplacement de la concentration maximale de glace (par exemple, près de la tête ou de la base du glacier). Une option consiste à accéder à la glace horizontalement le long des marges du glacier (au lieu de le faire à partir du sommet du LDA) si l'accumulation de roches n'est pas prohibitive près du pied ou des marges du glacier. Avant de choisir un LDA, des travaux d'étude supplémentaires de son site seront nécessaires pour déterminer l'accès et la possibilité de mobilité, et aussi pour identifier les endroits avec la plus forte probabilité de contenir de la glace accessible.

Idéalement, plusieurs plates-formes mobiles devraient être déployées pour couvrir plus de terrain en moins de temps, facilitant une étude plus complète de la distribution de la glace à proximité du site d'atterrissage du starship. Compte tenu de la masse importante de charge utile pouvant être embarquée sur un starship, plusieurs engins mobiles équipés d'instruments pourraient être envoyés et déployés. A noter cependant que cette architecture va à l'encontre de la position de principe de la NASA, consistant à n'envoyer généralement qu'un seul engin mobile à la fois (Curiosity, Perseverance).

Les engins peuvent être rendus robustes et capables de relever des défis importants posés par un terrain difficile car leur masse n'a pas besoin d'être limitée drastiquement compte tenu de la grande capacité d'emport de charge utile du Starship. Un accès facile depuis le starship jusqu'à la surface martienne est en outre possible depuis les modules de charge utile à leur base. À l'atterrissage, les véhicules pourront être déployés directement sur la surface sans dépliement ou autre opération complexe utilisé pour les missions précédentes.

Des véhicules supplémentaires pourraient également être embarqués à l'intérieur et déployés à partir de la zone de chargement principale (à l'avant du vaisseau). Ils devront être suffisamment robustes pour traverser le terrain martien près du site d'atterrissage, mais il ne sera pas nécessaire de les optimiser ou de les surdimensionner pour un coût élevé car une plus grande tolérance au risque est permise en déployant de nombreux engins à la fois. Si un ou plusieurs véhicules sont perdus ou fonctionnent mal, le reste de la flotte pourra effectuer la cartographie demandée. En ce qui concerne la topographie relativement douce des plaines du Nord, des véhicules similaires à ceux utilisés dans de nombreux environnements terrestres pourraient servir de plateformes de mobilité.

Pour comprendre le potentiel de ressources de la glace martienne, l'ensemble des données de prospection réparties dans l'espace doivent être synthétisées afin de déterminer les emplacements optimaux pour l'extraction et l'utilisation. Les évaluations de ressources sont une pratique courante dans les opérations minières terrestres et fournissent un cadre pour prendre des décisions dans des conditions d'incertitude, en remplissant d'abord des données sur des emplacements qui n'ont pas été échantillonnés, puis en recueillant des informations sur les ressources en termes d'occurrence potentielle, de distribution, de type, de qualité, de quantité, de valeur et de certitude des résultats d'évaluation.

La cartographie de prospectivité minérale (MPM) est une technique mathématique géospatiale permettant de prédire l'emplacement et la probabilité de la présence ou de l'absence d'une accumulation de minéraux (ou de ressources). Le résultat de la modélisation du potentiel minéral est une collection de cartes de MPM mettant en évidence les zones non permissives, permissives, favorables et prospectives. La capacité d'analyser géostatistiquement les ensembles de données de prospection glaciaire, de déterminer les relations de corrélation croisée entre les ensembles de données de télédétection in situ et de créer des cartes prédictives concernant la glace d'eau pour l'ISRU (y compris les zones où les données de terrain ne sont pas disponibles) seront des éléments essentiels du processus de prospection.

Considérations relatives à la criticité du système ISRU pour la glace d'eau

La possibilité d'utiliser la glace d'eau pour l'ISRU a été déterminée comme un facteur essentiel de la pérennité d'une présence humaine sur Mars. Avec cet objectif à l'esprit, la planification doit faire la distinction entre les systèmes critiques permettant cette présence et les capacités supplémentaires, l'accent étant mis sur les systèmes critiques lors des premières missions. Par exemple, l'infrastructure doit être conçue pour être extensible, afin de pouvoir prendre en charge des installations supplémentaires au fil du temps.

Les outils et équipements utilisés dans la Base doivent être polyvalents dans la mesure du possible afin de maximiser la flexibilité opérationnelle et d'optimiser l'allocation des masses qui seront transportées depuis la Terre. De multiples capacités en équipements assureront également la redondance et la résilience. Par exemple, l'extraction d'eau doit utiliser plusieurs systèmes pour s'assurer que si une méthode échoue, l'équipage ne sera pas mis en danger. À mesure que la taille de la Base augmentera, il faudra rester attentifs à la croissance de la complexité. Des approches multiples pour les activités et les installations initiales fourniront une capacité supplémentaire et un potentiel de croissance plus rapide pour l'avenir. Le besoin de pièces de rechange doit également être pris en compte, d'autant plus que les connaissances sur la durabilité de ces systèmes dans les environnements martiens seront probablement limitées. L'utilisation de composants communs entre les systèmes aidera à disposer de suffisamment de pièces de rechange tout en minimisant la masse à importer depuis la Terre.

Processus pour l'ISRU de glace d'eau

L'ISRU de la glace d'eau sur Mars est basée sur les processus d'extraction minière terrestre adaptés au cas martien. La planification des systèmes d'eau est essentielle parce qu'un système robuste d'approvisionnement en eau et de traitement des eaux usées est fondamental pour établir et développer un environnement urbain et, en tant que tel, il sera indispensable pour le développement d'une base habitée sur Mars. Aussi, la conception initiale du système doit être faite en ayant à l'esprit une conception à long terme. Nous segmentons ci-dessous le processus ISRU en cinq étapes et décrivons les activités nécessaires pour exécuter chaque étape :

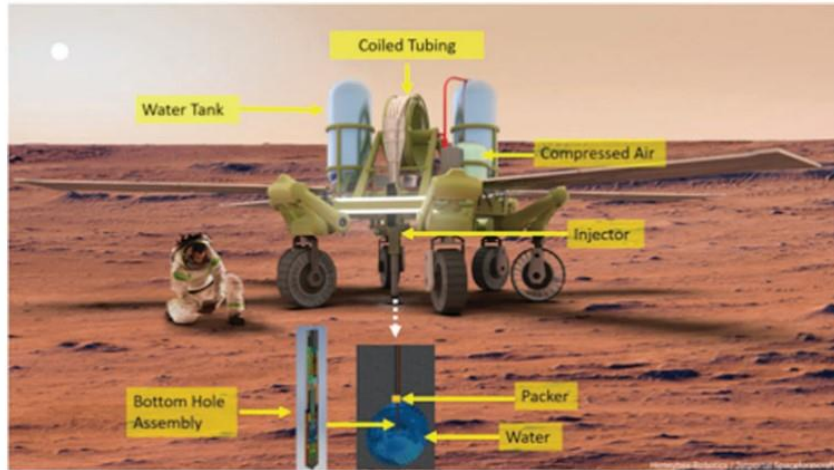
(1) *Caractérisation du réservoir de glace (exploration/prospection de la ressource)*. La première étape pour permettre l'ISRU est de caractériser et de vérifier la présence de la ressource. La distribution (verticale et horizontale) de la réserve potentielle doit être cartographiée, et la forme et la concentration de glace dans le sous-sol doivent être déterminées. La glace de surface sur Mars est instable aux latitudes moyennes et basses dans le climat actuel et donc toute glace sera couverte par une couche de mort-terrain de roche sèche et/ou de régolithe. La profondeur de mort-terrain doit être déterminée, ainsi que la résistance du matériau et les propriétés (par exemple, roche, sol meuble) de la couche pour s'assurer que les techniques envisagées pour le forage et/ou l'excavation pour accéder à la glace enfouie, sont appropriées.

Comprendre le contexte géologique local est également important pour caractériser la glace souterraine elle-même ainsi que les propriétés du mort-terrain. La compréhension de la géologie locale et de l'histoire du site donnera des informations sur l'origine de la glace présente dans le sous-sol (vapeur d'eau déposée par l'atmosphère, reste massif d'un ancien glacier, ou anciennes chutes de neige). Selon le site, les morts-terrains peuvent être des sables et des fines apportés par le vent, du régolithe et/ou de la roche résultant de la sublimation de la glace au cours des temps géologiques, des dépôts glaciaires de roches et de rochers plus gros ou de l'érosion du front du glacier.

(2) *Acquisition de la glace d'eau*. Il existe plusieurs techniques pour l'acquisition de glace souterraine sur Mars. La technologie du « puits Rodriguez » (Rodwell) est une méthode d'extraction appliquée sur Terre en milieu polaire (Groenland et Antarctique), prometteuse pour une application martienne. Le concept est simple et consiste à faire fondre la glace en profondeur pour créer un réservoir d'eau liquide pouvant être pompée à la surface. Le développement de la taille et de la forme de la cavité souterraine est fonction des quantités fondues et de retrait de l'eau par pompage. Le Rodwell maintient l'eau liquide dans la poche souterraine par la chaleur pendant toute la durée de vie opérationnelle du puits, et cette poche se dilate au fur et à mesure que la glace fond à partir des parois de la cavité fournissant ainsi une source d'eau constamment renouvelée.

Les systèmes Rodwell sont robustes et toujours utilisés. Par exemple le Rodwell installé en 1995 au Pôle Sud dans la station américaine (Amundsen-Scott South Pole Station), a fourni avec succès des dizaines de millions de litres d'eau douce. La durée de vie d'un puits est d'environ 7 ans, ce qui serait idéal pour Mars puisque cette durée couvrirait plusieurs cycles synodiques et pourrait approvisionner une base habitée initiale.

Un système Rodwell nommé « RedWater » est en cours de conception par la Sté Honeybee Robotics, spécifiquement pour une utilisation dans l'environnement martien. Ce système devrait être capable d'extraire de l'eau jusqu'à 25 m de profondeur et sous 20 m de mort-terrain. RedWater met en œuvre deux technologies terrestres éprouvées : le « coiled tubing » (CT) pour le forage et le principe Rodwell (vu ci-dessus) pour l'extraction de l'eau. Les composants RedWater sont illustrés dans la figure ci-dessous. L'extrémité du tube CT comporte un ensemble (« Bottom Hole Assembly », « BHA »), constitué autour d'un moteur et d'un foret. Pour éliminer les débris et éclats de roche, de l'air martien comprimé serait pompé dans le tube.



Une fois le trou fait, le CT serait laissé à l'intérieur et utilisé comme conduit pour l'extraction de l'eau. Le BHA comprend un sous-système de forage à percussion rotatif similaire à celui utilisé dans le Honeybee Robotics Deep Drill, et des radiateurs. Après avoir atteint une couche de glace, la perceuse continuerait pendant encore environ 3 m puis s'arrêterait, mais la mèche continuerait de tourner. La foreuse déploierait une garniture flexible pour sceller le trou et ensuite, les appareils de chauffage seraient allumés pour faire fondre la glace environnante. Après qu'il ait fait fondre le volume de glace souhaité, le trou de forage serait pressurisé et une vanne serait ouverte pour permettre à l'eau de remonter vers le réservoir de surface, comme dans un geyser terrestre.

Un prototype de système RedWater a été conçu et testé dans un bloc de glace à -25°C (fig. ci-dessous). Une poche liquide de 15 kg a été créée en environ 2 h en utilisant un système de chauffage d'environ 1 kW (ce qui implique une efficacité thermique d'environ 50%). En extrapolant à une production de masse, 1 tonne d'eau pourrait être produite en 10 jours.



Poche d'eau créée dans une glace à -25°C . La pointe du foret continue à tourner pour éviter le regel de l'eau.

Au-delà de l'utilisation d'un Rodwell, on peut envisager d'autres méthodes, par exemple l'extraction à ciel ouvert avec ou sans utilisation d'explosifs. Pour l'exploitation à ciel ouvert, comme dans une mine, des excavateurs robots enlèveraient mécaniquement les morts-terrains secs, puis un marteau-piqueur, une perceuse ou une scie briseraient la glace souterraine. Une autre option consisterait à utiliser des explosifs qui seraient déclenchés de manière contrôlée pour éliminer le dépôt de mort-terrain indésirable et simultanément exposer et briser la glace souterraine souhaitée.

Quelle que soit la technique d'extraction finalement choisie, une technique alternative devrait être disponible compte tenu de la criticité de la collecte de glace. Lors de la conception de l'architecture globale de la base martienne initiale, les équipements associés aux différentes techniques d'extraction peuvent avoir de multiples fonctions. Par exemple, une trancheuse pour creuser la glace peut également être utilisée pour creuser des canalisations pour transporter les liquides et les gaz partout dans la Base. Ces possibilités d'utilisation multiples de l'équipement doivent être pris en compte lors de la conception des plans pour l'extraction de la glace.

(3) *Système de distribution de l'eau.* La glace extraite sur le site minier devra être transportée jusqu'à la base habitée pour un traitement supplémentaire et pour son utilisation. Le transport peut être effectué par plusieurs moyens, pipeline avec système de pompage et tuyauterie, ou par camion. Des études comparatives devront être faites pour déterminer les moyens de transport les plus efficaces et les plus efficaces. Une considération clé sera le volume d'eau à transporter. Par exemple, un système de conduits peut ne pas être nécessaire initialement si les volumes d'eau sont relativement faibles.

Dans cette dernière hypothèse les camions peuvent suffire. Cependant, pour établir une base permanente, un système de canalisation vers la ressource serait optimal puisque la libre circulation de l'eau stimule la croissance de toute collectivité humaine. Il sera important de tenir compte de l'importance de la gravité dans le flux. Il est très avantageux que le consommateur soit situé à une altitude inférieure à l'approvisionnement. Si ce n'est pas possible, la demande d'énergie nécessaire pour pomper l'eau du lieu de stockage jusqu'au consommateur doit être évaluée. La fluctuation de la température ambiante est également un élément de conception important. Il existe de nombreuses technologies terrestres qui peuvent contribuer à préparer une installation à basse température car sur Terre il existe de nombreuses régions d'approvisionnement en eau dans des endroits extrêmement froids comme le Canada, la Russie et la Scandinavie.

Le type de système de transport dépendra également de la distance entre le site minier et la base habitée ou les starships. Cette distance ne sera pas connue avant le choix final du site et l'établissement du plan de la Base. Lors de la définition du système de transport, le nombre de transferts devra être minimisé, tout transfert introduisant des inefficacités dans le système.

Les emplacements des installations de traitement et de stockage sont également des éléments importants à considérer. Par exemple, le système de transfert de l'eau du site minier à la Base peut, en partie, dépendre du fait que la purification de l'eau et/ou le traitement supplémentaire soient effectués sur le site minier ou dans la Base. La décision dépendra de l'architecture générale de l'implantation humaine mais influencera la quantité et le type d'infrastructure disponible aux deux endroits.

La méthode de stockage de l'eau est également importante. On devra optimiser la conception du processus de transfert selon que l'eau sera stockée sous forme de glace et fondue au besoin ou que de grands réservoirs de liquide seront maintenus pour une utilisation à la demande. La décision peut être motivée par le choix de la technique d'extraction. Par exemple, le fonctionnement continu d'un système Rodwell nécessite une énergie importante pour maintenir le bassin souterrain d'eau liquide. Une possibilité est donc d'extraire toute l'eau nécessaire d'un (ou de plusieurs) Rodwell pour maintenir une quantité minimum en liquide disponible immédiatement pendant une durée significative et de stocker le reste de cette eau sous forme de glace pour une utilisation future. Quoi qu'il en soit, la croissance et l'entretien doivent être pris en compte lors de la conception de chaque installation du système de distribution de l'eau.

(4) *Purification eau/glace.* L'eau extraite de sources in situ devra être testée pour déceler les contaminants ou une présence biologique potentielle, et purifiée en conséquence. Le niveau d'impuretés tolérables doit être déterminé pour les différentes utilisations possibles. Par exemple, les exigences en matière de pureté pour les ergols seront différentes des exigences en matière d'eau potable. Cependant, la quantité d'eau nécessaire pour permettre la vie sur Mars sera relativement faible par rapport à l'eau

nécessaire pour faire le plein des starships. Comme c'est la routine sur l'ISS, 90 % de l'eau peut être recyclée ; ce sera aussi le cas sur Mars même si le pourcentage peut varier quelque peu.

La première étape du processus de purification de l'eau est l'analyse en laboratoire pour caractériser les impuretés et guider les processus de traitement. La fiabilité du système doit être élevée pour ces tests car la contamination chimique ou biologique peut affecter de manière significative la santé des hommes. Dans la conception de la technologie d'analyse de l'eau, limiter les consommables est important pour minimiser les types et les quantités de matériaux spécifiques qui devront être importés de la Terre. Une connaissance a priori des caractéristiques de la glace utilisée aidera à éclairer la conception d'un système d'analyse de l'eau approprié.

Il existe plusieurs méthodologies qui peuvent être utilisées pour la purification de l'eau et/ou de la glace. Les technologies de traitement physique utilisent la séparation de phase des constituants du liquide par différence de densités (flottation, décantation, centrifugation), changements de phase (distillation, évaporation, congélation), barrière physique sélective (filtration), osmose inverse ou chimie de surface différentielle (séparation capillaire et chromatographique, échange d'ions, sorption). Pour ces méthodologies, des consommables chimiques ne sont généralement pas utilisés, mais la maintenance et le remplacement des composants matériels sont souvent nécessaires.

Des options de traitement chimique peuvent éliminer les contaminants indésirables et désinfecter un approvisionnement en eau. Ces procédés sont généralement rapides et fiables mais ils consomment des réactifs qui doivent être réapprovisionnés et peuvent générer des sous-produits qui doivent être pris en compte pour la gestion des déchets. Les missions martiennes devraient donner la priorité aux technologies de traitement chimique pour lesquels les réactifs peuvent être produits in situ et les sous-produits sont bénins. De nombreuses méthodes de purification chimique existent, chacune avec des avantages et des inconvénients ainsi qu'avec une applicabilité variable à une mission spatiale de longue durée.

Des options de traitement biologique peuvent également être envisagées. Bien que la cinétique des processus biologiques soit généralement inférieure (heures à jours) à celle des processus physiques ou chimiques (secondes à minutes), les processus biologiques sont capables d'auto-régénération et peuvent fournir un système de purification durable dans un bioréacteur. Les bioréacteurs sont devenus une pratique courante sur Terre et peuvent consister en systèmes aérobies, anaérobies ou phototrophes.

Des études comparatives doivent être menées pour déterminer la combinaison optimale de systèmes de purification d'eau, physiques, chimiques et/ou biologiques.

(5) *Distribution, stockage et utilisation de l'eau.* Une fois que l'eau aura été extraite du sous-sol, elle devra être distribuée aux utilisateurs finaux ou stockée jusqu'à ce qu'on en ait besoin. Sur Mars, l'eau peut être stockée à l'état gelé (glace) ou liquide (eau). Le moyen le plus efficace pour distribuer l'eau dépendra grandement de l'état dans lequel elle sera stockée. Des études comparatives devraient être menées pour déterminer les moyens les plus efficaces. Certaines considérations sont présentées ici :

Si un système Rodwell est utilisé en continu pour pomper l'eau liquide du sous-sol martien, alors l'eau sera extraite et pourra être stockée sous forme liquide. Pour des raisons de sécurité, la Base devra toujours stocker de l'eau liquide pour utilisation par ses résidents. Selon les taux de production, une partie de l'eau devrait probablement être stockée pendant de longues périodes sous forme de glace. Cette glace resterait gelée dans l'environnement martien ambiant mais devrait être protégée contre la sublimation.

L'option de stockage sous forme de glace peut s'appliquer à la production d'ergols pour les retours de starships vers la Terre, qui n'ont lieu que tous les 2 ans. Des études comparatives seront nécessaires concernant les options de production continue d'ergols par rapport à une production d'ergols en une seule fois peu avant le besoin. Le traitement de cette façon-ci réduirait les besoins de refroidissement

cryogénique pour un stockage à long terme, mais serait probablement difficile à mettre en œuvre en raison des besoins en énergie important pour générer les ergols en une seule fois. La production d'ergols nécessite également du CO₂ et sa collecte et son traitement devront être intégrés à la production d'eau associée.

Une fois l'eau extraite, son traitement ultérieur nécessitera une combinaison d'électrolyse et de processus de méthanation (réaction de Sabatier). L'électrolyse convertit quatre molécules d'eau en quatre molécules de H₂ et deux molécules d'O₂ ($4\text{H}_2\text{O} \Rightarrow 4\text{H}_2 + 2\text{O}_2$). La méthanation utilise un catalyseur pour convertir le dioxyde de carbone de l'atmosphère avec apport d'hydrogène provenant de l'électrolyse de l'eau pour produire du méthane et de l'eau ($\text{CO}_2 + \text{H}_2 + \text{catalyseur} \Rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$).

L'oxygène sera généré par le processus d'électrolyse de l'eau. L'oxygène et le méthane seront liquéfiés et stockés sous forme cryogénique pour des considérations pratiques de volume total des ergols en phase gazeuse. Ces produits devront ensuite être conservés jusqu'à leur utilisation.

De nombreuses activités décrites pour l'ISRU de glace d'eau peuvent être menées à la fois avant et après l'arrivée de l'homme sur Mars. Les vols initiaux robotisés devront être utilisés pour éliminer le plus tôt possible les éléments à risque élevé et à cycle marqué. Par exemple, les camions pourront se déplacer de manière autonome au travers de surfaces étendues pour transporter des machines jusqu'au site minier. Cependant, il se peut que l'on ne veuille pas ou que l'on n'ait pas besoin de déployer entièrement les systèmes complets d'excavation et d'ISRU à moins qu'une automatisation accrue ne soit possible. En règle générale, ces déploiements complexes deviendront plus faciles avec la présence et l'intervention de l'homme.

Cependant, certains sous-composants du système ISRU pourront être testés avant l'arrivée de l'homme. Par exemple, l'usine d'électrolyse et de méthanation de l'ISRU pourrait fonctionner avec de l'eau douce apportée de la Terre en conjonction avec du CO₂ acquis de l'atmosphère martienne. Une telle activité serait découplée du système d'excavation de glace, plus complexe, et pourrait fonctionner pendant 1 ou 2 ans avant l'arrivée de l'homme. Pendant cette période elle démontrerait le fonctionnement à long terme et à cycle élevé du compresseur de CO₂, du système de méthanation et du catalyseur, ainsi que la pureté des produits obtenus. Des tests sur site de l'isolation des réservoirs d'ergols pourraient également être menés pour comparer différentes méthodes d'isolation. Les performances des composants communs à plusieurs systèmes (par exemple, les variateurs, les moteurs) nécessaires pour fonctionner pendant de longues périodes pourraient être testées pour mesurer leur fiabilité. Il est relativement facile pour un homme d'effectuer des activités de maintenance telles que le remplacement des effecteurs terminaux pour les forêts et autres composants matériels, alors qu'une telle maintenance peut être difficile à automatiser.

Par conséquent, les tests de performance de matériel de longue durée devront être effectués avant l'arrivée des hommes tandis que les tâches plus complexes devront tirer avantage de leurs compétences en résolution de problèmes après qu'ils soient arrivés. Cependant, en ce qui concerne l'activation de l'ISRU pour le fonctionnement d'une base habitée, l'action la plus prioritaire pour les premières missions en starships robotisées sera de caractériser la ressource de glace afin de finaliser la conception des systèmes d'extraction, de purification et de traitement de l'eau et de commencer les tests de certains systèmes génériques à haut cycle.

C. OBJECTIFS SUPPLÉMENTAIRES A HAUTE PRIORITEE DU STARSHIP

En plus des considérations d'ISRU, nous voulons mentionner ici les autres objectifs hautement prioritaires supplémentaires pour les deux premières missions en starships robotisés, afin d'optimiser le développement de la base habitée. Ces objectifs comprennent le déploiement d'éléments d'infrastructure énergétiques initiaux, la caractérisation de l'environnement local sur le site d'atterrissage, la mise en

œuvre d'une première protection contre les radiations, des expériences de culture alimentaire, des démonstrations d'excavation et de forage robotisés de régolithe, le pré-positionnement des fournitures et l'évaluation des risques pour les hommes pendant les opérations en surface.

Déploiement de l'infrastructure initiale de génération d'énergie

Le déploiement et l'exploitation réussis d'une infrastructure énergétique sont de la plus haute priorité pour les missions robotisées et habitées en surface martienne. Étant donné que la disponibilité de l'énergie est essentielle aux opérations de surface, un déploiement initial et un test des systèmes de génération d'énergie seront une priorité pour les premiers starships qui atterriront sur Mars. Pour les missions au sol, avec et sans équipage, l'énergie sera initialement fournie par des batteries, puis par des panneaux solaires après qu'ils aient été déployés et vérifiés. Une source alternative est également requise qui pourrait être obtenue via des batteries, des produits chimiques et/ou des ergols.

L'énergie solaire est probablement une option précoce, au-delà des batteries, mais avec le risque régulier de tempêtes de poussière globales, l'énergie nucléaire sera la solution à long terme. Les réacteurs nucléaires devront donc également être utilisés pour les premiers équipages, s'ils sont disponibles. Bien que la demande initiale puisse être plus faible, la capacité de charge utile du Starship permettra le déploiement de très grandes installations nucléaires. À titre d'exemple, le réacteur Hyperion (concept) pèse 20 tonnes et produit 25 MW de puissance.

Les utilisations importantes d'énergie comprennent la génération et le stockage des ergols, l'entretien des starships, le stockage de l'eau et de la nourriture, et le support des activités extravéhiculaires loin de la Base. L'énergie sera probablement allouée par quota avec un certain nombre d'équipements en réseau qui pourront accéder à/exploiter l'énergie requise où et quand cela sera nécessaire. Des systèmes d'alimentation alternatifs en énergie seront également nécessaires pour garantir des niveaux de puissance permanents. Si nécessaire, les activités non essentielles telles que la production d'ergols et les activités de recherche de ressources pourraient être réduites en cas d'urgence.

Une démonstration technologique clé qui pourrait être menée avec les premières missions en starships robotisées, est le déploiement et le fonctionnement autonomes d'un système d'énergie solaire. Les méthodologies de déploiement ainsi que les panneaux solaires, individuellement ou constituant collectivement une centrale, devront être testés. Les panneaux solaires des missions spatiales sont généralement optimisés pour des performances élevées mais les performances moins bonnes de panneaux solaires plus frustes peuvent être compensées par le déploiement d'un réseau plus étendu. Ou encore on peut monter les panneaux solaires sur des dispositifs qui permettent de suivre la marche du Soleil pour augmenter leur production d'électricité au fil du temps.

Cependant l'importance de la surface de panneaux solaires requise sur Mars peut interdire l'utilisation d'un dispositif de suivi de la lumière, et les premières missions pourront évaluer les avantages et les inconvénients du déploiement des panneaux au sol ou au-dessus du sol, avec ou sans capacités de suivi. Par exemple, des techniques de déploiement plus simples telles que la mise sous pression de nervures pour dérouler de grands rouleaux de panneaux solaires devraient être testées. De plus, la maintenance des dispositifs déployés (y compris le dépoussiérage) doit être testée pour déterminer les solutions optimales à long terme.

Caractérisation environnementale

Les premiers starships robotisés offrent une opportunité sans précédent de collecter des données environnementales sur le site d'atterrissage, données qui seront précieuses pour la conception et la construction des futurs équipements et infrastructures à envoyer sur Mars. Une station météorologique de base pour mesurer les températures atmosphériques et de surface, la vitesse et la direction du vent, la teneur en poussière de l'atmosphère, la pression atmosphérique et les niveaux de rayonnement est nécessaire pour minimiser l'incertitude concernant les conditions environnementales attendues pour les

futures missions habitées. Les propriétés de la surface telles que les possibilités de circuler, la géomorphologie et les propriétés géotechniques doivent être évaluées pour optimiser le développement futur des infrastructures telles que les routes, les aires d'atterrissage et les habitats.

Test des situations à haut risque

Le vol de deux starships robotisés jusqu'à la surface martienne offre également la possibilité de tester plusieurs situations à haut risque avant l'arrivée de l'homme. Les opérations qui peuvent être particulièrement sensibles aux inconnues de l'environnement martien et qui nécessitent des tests de longue durée ont la plus haute priorité pour les premières missions.

Protection contre les radiations

La protection contre les radiations est une exigence prioritaire pour assurer la sécurité des personnes en surface de Mars. Les astronautes auront besoin d'une protection adéquate contre les radiations lorsqu'ils travailleront et vivront dans leurs starships sur Mars et auront également besoin d'une atténuation des radiations lorsqu'ils travailleront à l'extérieur du starship. Par exemple, il faudra des zones protégées extérieures, pour mener les activités de maintenance, les travaux de laboratoire et pour le transbordement entre différents vaisseaux et/ou installations.

Des mesures des niveaux de radiations en surface martienne sont disponibles ainsi que de nombreux modèles pour prédire les niveaux de radiations attendus. Cependant, les mesures de radiations existantes en surface se trouvent à des endroits précis qui peuvent ne pas coïncider suffisamment précisément avec les sites d'atterrissage prévus. Leur applicabilité réelle est donc inconnue. Les modèles de radiations incluent également de multiples hypothèses et incertitudes et doivent être validés avec des mesures en surface sur le site d'atterrissage. Par conséquent, une station de contrôle des radiations sur la durée, installée sur le site d'atterrissage, ainsi que différents matériaux et dispositifs pour les tests de système de protection doivent être envisagés, y compris l'utilisation potentielle de matériaux locaux.

Production alimentaire

Les expériences de culture agricole sont une activité accessoire à mener à bord des premiers starships pour Mars. La capacité des hommes à cultiver leur propre nourriture sera essentielle pour que leur implantation devienne autonome. La production et la transformation des aliments dépendent fortement des conditions environnementales (par exemple, gravité réduite, température, radiations, chimie du sol), qui varient selon les sites. L'expérimentation de la croissance des plantes est nécessaire pour évaluer les effets de diverses conditions telles que les niveaux élevés de dioxyde de carbone, la faible luminosité, les faibles niveaux d'eau et de nutriments, l'efficacité de la pollinisation, l'effet des basses pressions et des faibles champs magnétiques sur la croissance des plantes et la productivité des cultures.

On ne pense pas que la plupart des conditions martiennes puissent limiter la productivité des cultures et qu'elles ne puissent pas être compensées dans un environnement de serre. La culture hydroponique sera évaluée sur Mars, en s'appuyant sur la recherche en production alimentaire effectuée dans l'ISS avec le « Vegetable Production System » (VEGGIE). En outre, les plantes et cultures fraîches devraient avoir un impact positif sur la santé psychologique de l'équipage. La production alimentaire pourra être testée dans une mesure limitée lors de missions robotiques, tandis qu'avec assistance humaine, elle devrait pouvoir être menée avec moins de complexité opérationnelle.

Constructions robotisées

Des expériences supplémentaires à envisager avec les premières missions robotisées sont centrées sur les processus d'excavation, de forage et de construction. L'excavation et le forage sont des activités clés pour permettre la survie à long terme de l'homme sur Mars. Ces activités sont essentielles pour l'ISRU ainsi que pour les applications de génie civil telles que la construction de routes, de tranchées, de terrassement ou de plates-formes d'atterrissage.

Une grande partie de ce travail pourra être effectuée avec des robots, et les premières missions avec starships pourront être utilisées pour tester et démontrer des techniques autonomes. Ces activités de construction initiales donneront des indications précises pour prévoir les divers équipements à envoyer ultérieurement sur Mars et elles mettront en place autant d'infrastructures que possible avant les premiers atterrissages de vols habités.

Pré-positionnement des fournitures avant les atterrissages de vols habités

La capacité de chargement substantielle (100 tonnes métriques) du Starship offre de nombreuses possibilités de livrer et de prépositionner des fournitures clés sur Mars avant l'arrivée de l'homme. Les starships eux-mêmes serviront d'infrastructure initiale à la base martienne. Le vaste volume intérieur du Starship (à la fois pressurisé et non pressurisé) offre un espace important pour servir d'abri en termes de quartiers d'habitation, de laboratoire et d'espace de travail pour les hommes, et aussi d'espace de stockage pour l'équipement et les fournitures.

Les premiers hommes sur Mars devraient pouvoir vivre dans les starships qui les auront transportés depuis la Terre. Cependant, en cas de problèmes imprévus, l'équipage humain disposera également des premiers starships robotisés, arrivés avant eux sur Mars, comme solutions de secours pour l'habitation, le stockage, ainsi que de pièces de rechange et de fournitures.

Les premiers vaisseaux sans équipage pourront également pré-positionner des stocks de nourriture et d'eau sur Mars avant l'arrivée de l'homme. Cette approche fournirait une redondance et garantirait un approvisionnement adéquat car les vaisseaux avec équipage apporteront également de la nourriture et de l'eau. La nourriture est essentielle à la subsistance humaine et l'eau sera importante non seulement pour l'usage et la consommation humaines mais aussi pour permettre l'ISRU. Dans le cas où l'eau ne pourrait pas être exploitée sur Mars dans le temps ou les quantités nécessaires pour permettre les activités d'ISRU, des solutions alternatives, y compris la livraison d'eau de la Terre via starship, devraient pouvoir être utilisés (*ndt : je ne vois pas comment cela serait possible entre deux fenêtres de lancement !*).

Les systèmes de communication des premiers starships robotisés seront prépositionnés et testés avant l'arrivée de l'homme. Ces systèmes seront établis et testés pour la communication avec la Terre et celle entre les installations parvenues sur Mars. Une communication « qui marche » est indispensable pour s'assurer que les hommes auront la capacité de communiquer avec la Terre, même en cas de problèmes imprévus avec le système de communication des starships habités.

Les premiers starships robotisés prépositionneront également des équipements supplémentaires, comme des rovers, pour permettre la mobilité des équipements et des hommes. Les rovers devraient idéalement être équipés d'une capacité modulaire pour effectuer plusieurs tâches et maintenir leur efficacité énergétique. Les rovers pourraient être utilisés pour des tâches aussi variées que le déploiement de panneaux solaires, l'excavation de régolithe pour la construction et pour l'ISRU, le déplacement de cargaisons et de matériaux vers différentes zones de la Base et le transport d'équipements vers d'autres sites en dehors. Selon les emplacements du site d'atterrissage et la taille de la base habitée, des rovers pourront être nécessaires pour transporter des personnes et/ou des marchandises entre les starships et des endroits plus éloignés (tels que des sites scientifiques ou des sites ISRU pour l'excavation de glace).

Préparation du site d'atterrissage

Les premiers starships atterriront sur un terrain martien vierge, sans site d'atterrissage préparé. Cependant les capacités opérationnelles pourront être améliorées pour les vols ultérieurs grâce au développement d'infrastructures spécifiques : des plateformes d'atterrissage qui pourront mieux résister à la chaleur et à la pression des gaz éjectés du moteur, mais aussi des remblais entourant les plateformes qui atténueront la diffusion du régolithe ou des pierres dans la zone environnante.

Ces mesures de protection sont importantes pour permettre la construction d'une base habitée avec des infrastructures à proximité des plateformes d'atterrissage/lancement. La construction de ces plateformes

empêchera également les jets d'échappement de l'atterrisseur de creuser des trous en dessous de lui, ce qui pourrait faire fondre la glace souterraine et/ou faire basculer le vaisseau et lui causer des dommages. Plusieurs techniques de stabilisation de surface ont été proposées pour la construction et l'évaluation des plateformes d'atterrissage telles que l'utilisation de matériaux in situ, l'impression 3D et le gel des zones d'atterrissage (formation de « duricrete »). Plusieurs options pourraient être évaluées en produisant plusieurs « échantillons d'atterrissage » à l'aide d'équipements déposés par le premier starship et en les testant lors de l'atterrissage du starship robotisé suivant.

Habitabilité humaine et exobiologie

Pour améliorer la santé et la sécurité des hommes, les premiers starships robotisés pourraient également emporter une ou plusieurs charges utiles pour évaluer le potentiel de danger pour les opérations en surface, y compris la caractérisation des matériaux que les hommes sont susceptibles de rencontrer, pour prévenir les risques biologiques, chimiques et mécaniques potentiels. Cela comprendrait la caractérisation de la glace d'eau et de la poussière ainsi que l'affinement de notre compréhension des perchlorates dans le sol. Des instruments qui pourraient caractériser ces aspects de l'environnement martien et évaluer le potentiel biologique dans la zone d'intérêt aideraient à éclairer les mesures d'atténuation et l'évaluation des risques pour les premiers équipages allant sur Mars.

En ce qui concerne le potentiel de vie martienne, des travaux récents ont examiné la question de l'habitabilité martienne qui suggère que Mars aurait pu abriter la vie au cours des 5 derniers millions d'années. L'eau proche de la surface avait probablement des niveaux d'activité suffisamment élevés pour permettre la vie à des obliquités plus fortes et la glace dans le sol est un moyen particulièrement efficace pour préserver des biomarqueurs organiques pendant de longues périodes. De multiples sources d'énergie pour alimenter la vie martienne existent sous la forme de dioxyde de carbone et d'azote dans l'atmosphère, de nitrates dans le sol et/ou de perchlorates combinés avec de la roche basaltique. Cette combinaison de paramètres (eau, énergie, nutriments) conduit à une possibilité raisonnable de vie éteinte et/ou existante sur Mars, qui ne peut être exclue à l'heure actuelle.

L'instrumentation pour les évaluations des risques biologiques pourrait donc également fournir des données scientifiques supplémentaires dans le domaine de l'exobiologie pour aider à déterminer si la vie est jamais apparue sur la planète rouge, une des questions scientifiques fondamentales motivant l'exploration de Mars. Ces recherches pourraient, lors des missions robotisées, fournir des mesures de base du potentiel biologique de la vie martienne indigène dans l'environnement proche de la surface, en vue d'une recherche beaucoup plus approfondie de la vie, mesures qui seront rendues possibles par la présence d'astronautes pour mener des expériences plus sophistiquées en surface et accéder au sous-sol.

CONCLUSIONS ET VISION DU FUTUR

Le Starship de SpaceX change fondamentalement les paradigmes de l'exploration spatiale et doit permettre aux hommes de se développer en espèce multiplanétaire. Les premières étapes du développement d'une civilisation autonome sur Mars en utilisant les missions de SpaceX prévues sur la planète rouge ont été esquissées. Les premiers starships envoyés sur Mars seront sans équipage et offriront des facilités sans précédent pour livrer chacun environ 100 tonnes de fret et effectuer les travaux précurseurs pour permettre une ISRU martienne capable d'assurer une présence humaine pérenne et autonome.

Les activités les plus prioritaires pour les starships robotisés seront la mise en place avant l'arrivée de l'homme, de fournitures et d'infrastructures, les tests technologiques clés et la prospection pour cartographier et caractériser la glace d'eau.

Les missions de starships sur la Lune peuvent être un tremplin important pour ensuite aller sur Mars, à la fois techniquement et programmatiquement. La Lune peut être un banc d'essai et une plate-forme de démonstration pour les technologies ISRU ainsi que pour les opérations du Starship. Quelle que soit la

destination, cet article souligne l'importance d'un schéma directeur précoce pour permettre le développement d'une présence humaine durable sur un autre monde.

L'ISRU est un élément clé pour permettre aux hommes de réduire leur dépendance à l'égard de la Terre et de développer une présence autonome en-dehors de notre planète. Le développement et l'expansion d'une première base martienne permettront à davantage d'hommes de vivre sur la Planète-rouge, accomplissant ainsi la tâche historique et sans précédent de faire de l'humanité une espèce multiplanétaire.

Titre en Anglais :

Mission Architecture Using the SpaceX Starship Vehicle to Enable a Sustained Human Presence on Mars. Published Online (open access) :13 Sep 2022

Lien : <https://doi.org/10.1089/space.2020.0058>

Auteure: Jennifer L. Heldmann (1), *NASA Ames Research Center*, Division of Space Sciences and Astrobiology, Planetary Systems Branch, , California;

Co-auteure: Margarita Martinova, (2) (*ex SpaceX*), independent Consultant, Santa Monica, California;

Autres co-auteurs:

NASA Ames Research Center, Division of Space Sciences and Astrobiology, Planetary Systems Branch, California: Darlene S.S. Lim (3), Tony Anthony Colaprete & Richard C. Elphic(8) & (9);

Bechtel Corporation, Reston, Virginia: David Wilson & Peter Carrato & Keith Kennedy & Ann Esbeck (4) & (5) & (6) & (7);

NASA Kennedy Space Center, Kennedy Space Center, Florida: Janine Captain (10);

Honeybee Robotics, Pasadena, California: Kris Zacny, Leo Stolov, Boleslaw Mellerowicz, Joseph Palmowski (11) & (12) & (13) & (14);

Purdue University, Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Science, Indiana: Ali M. Bramson (15);

Planetary Science Institute, Tucson, Arizona: Nathaniel Putzig, Gareth Morgan, Hanna Sizemore (16) & (17) & (18);

United States Geological Survey (USGS), Geology, Minerals, Energy, and Geophysics Science Center, Spokane, Washington: Josh Coyan (19).