



novembre 2008

Association Planète Mars
www.planete-mars.com
28, rue de la Gaîté 75014-Paris

UNE COLONIE MARTIENNE

essai d'analyse technique



la base scientifique permanente, berceau des technologies d'une installation future sur Mars (doc. Manchu/APM)

Richard Heidmann
président de l' Association Planète Mars

Remerciements

Merci à MM. Jean Dunglas (Académie d'Agriculture) et Serge Le Quillec (Centre technique et industriel des Fruits et Légumes), qui m'ont fourni des informations précieuses, ainsi qu'à Jean-Marc Salotti (Institut de Cognitique de Bordeaux 2, membre de l'association Planète Mars) pour ses réflexions sur l'écologie d'une colonie spatiale.

Merci également à Pierre Brulhet et Olivier Walter, architectes membres de l'association, pour leurs conseils sur l'aménagement de la colonie et pour leurs nombreux travaux sur les habitats martiens.

Enfin, merci à l'association Prospective 2100, à son Président, Thierry Gaudin, et à son Secrétaire Général, Lucien Deschamps, de m'avoir confié cette analyse, menée dans le cadre d'un groupe de travail sur l'avenir de l'Homme dans l'espace.

SOMMAIRE

Remerciements	p.2
1. INTRODUCTION - PRÉSENTATION DU CONTEXTE	p.5
2. MARS, SITE PRIVILÉGIÉ POUR UNE COLONIE SPATIALE	p.9
2.1 Caractéristiques astronautiques	p.9
2.2. Caractéristiques environnementales	p.11
2.3. Ressources	p.14
2.4 Potentiel scientifique	p.18
2.5. Attractivité	p.18
3. CONTRAINTES D'AMÉNAGEMENT - CARACTÉRISTIQUES D'ENSEMBLE	p.19
3.1. Contraintes d'aménagement	p.19
3.2. Caractéristiques et types d'implantation des enceintes	p.22
3.3. Agencement général de la colonie	p.24
4. QUELQUES DONNÉES SUR LES BESOINS	p.26
4.1. Trafic astronautique	p.26
4.2. Besoins en énergie	p.27
4.3. Espaces pressurisés	p.29
4.4. Besoins nutritionnels	p.29
4.5. Consommation de fluides	p.30
4.6. Récapitulation des principaux besoins	p.32
5. COMMENT ASSURER LES FONCTIONS DE LA COLONIE ?	p.33
5.1. Moyens et infrastructures de transport – Moyens de communication	p.33
5.2. Génération et distribution d'énergie	p.35
5.3. Espaces pressurisés	p.38
5.4. Production alimentaire	p.39
5.5. Production de fluides	p.41
5.6. Production de matériaux	p.44
5.7. Production de semi-produits	p.46
5.8. Récapitulation des principaux moyens	p.47
CONCLUSIONS – QUELQUES ASPECTS DÉTERMINANTS NON TRAITÉS	p.49
Bibliographie, Webographie	p.51

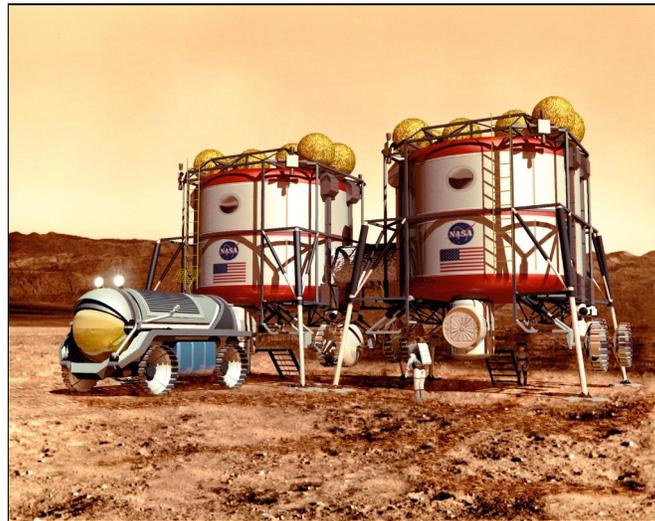
1. INTRODUCTION - PRÉSENTATION DU CONTEXTE

Lorsqu'on essaie d'imaginer de futurs établissements humains dans l'espace, Mars s'impose comme une destination privilégiée ; son environnement est en effet le moins inhospitalier de tous ceux qu'on peut rencontrer dans le système solaire et la planète abonde en ressources essentielles, facilement exploitables. Certes, contrairement à la Lune ou à une station orbitale, Mars est très éloignée. Mais s'agissant de colonies, où les habitants sont destinés à résider longtemps, voire à vie, ce critère est-il vraiment pertinent ?

L'objet de cette étude est d'analyser à quoi pourrait ressembler une colonie martienne, et en quoi les conditions particulières offertes par la planète devraient influencer sur sa conception et sur son mode de réalisation.

Naturellement, si l'Homme est destiné à s'installer sur la Planète rouge, le processus historique conduisant à l'émergence d'une (ou de plusieurs) colonies sera lent et progressif, chaque étape conduisant à mieux connaître et mieux maîtriser les conditions d'un établissement plus développé. Sans porter ici d'avis sur la vraisemblance du scénario, ni sur les échéances qu'on pourrait attribuer à ses phases successives, on peut en imaginer les étapes suivantes.

Dans un premier temps, notre présence se limitera à des expéditions scientifiques semi permanentes (18 mois tous les 26 mois), menées par des équipages typiquement de six explorateurs séjournant dans des **modules d'habitation temporaires**. Cette phase d'exploration scientifique, qui pourrait s'étendre sur quelques décennies, est celle dont il est question dans les projets actuels. Il ne s'agit pas d'anticipation.



les premiers habitats des missions d'exploration (NASA)

L'intérêt scientifique et astronautique de la planète se confirmant au fur et à mesure de sa découverte, l'implantation d'une ou deux **bases scientifiques permanentes**, semblables à nos bases antarctiques, devrait par la suite être décidée. Des équipes de chercheurs et de techniciens, représentant un effectif de 20 à 40 individus, séjourneraient pour des durées de une à quelques révolutions synodiques (deux à six ans, typiquement). Il s'agirait toujours d'expatriations temporaires, en fait de « tours de service » comme peuvent en connaître des expatriés dans des filiales de sociétés à l'étranger. Cette phase permettrait, outre un approfondissement considérable de l'investigation scientifique de la planète, de développer les technologies spécifiques de mise en exploitation et de recyclage des ressources locales, en commençant naturellement par les plus fondamentales : oxygène, azote, eau, énergie solaire, cultures vivrières, mais aussi en s'attaquant à l'élaboration de matériaux de construction : briques d'argile, pièces moulées et films plastiques, travail du fer...



base scientifique permanente (doc. NASA/Pat Rawlings)

La durée de cette phase dépendra essentiellement de l'intensité des efforts qui lui seront consacrés, elle-même fonction de la volonté qu'auraient les puissances spatiales de faire avancer le projet d'établir durablement l'humanité sur un autre monde. En supposant que cette volonté s'exprime concrètement, l'espacement des voyages (26 mois) et le développement des méthodes d'exploitation des ressources locales conduiront en tout état de cause à une durée de plusieurs décennies.

Si les résultats obtenus étaient positifs, alors la faisabilité de l'établissement d'une colonie humaine, du moins sur le plan technico-économique, serait acquise, étant démontré que sa construction et son soutien logistique seraient pour la plus grande part basés sur les ressources locales. Naturellement, la persistance du développement économique mondial au niveau moyen de 3 % par an, l'émergence d'activités spatiales « lourdes » et l'avènement opérationnel de moyens de transport beaucoup plus économiques (pour les lanceurs) et rapides (pour les vaisseaux de transfert) seraient des facteurs déterminants pour aboutir à cette étape. Dans notre scénario, situons ce tournant d'ici environ un siècle.

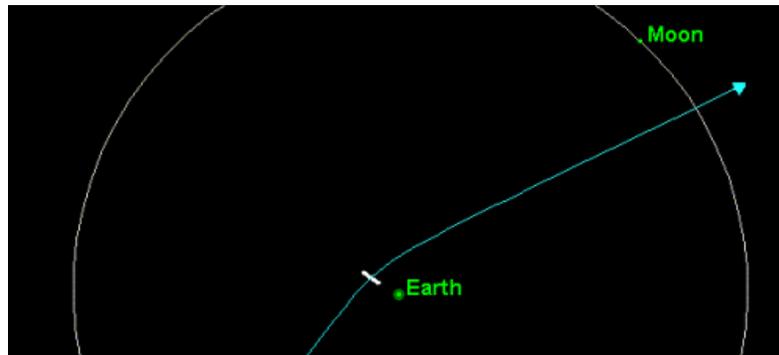


un projet pour un monde uni ?

A ce stade, à condition de supposer de plus que l'entente des nations permette de forger une éthique partagée (comme on le voit actuellement à propos du changement climatique ?), on peut imaginer que soit prise la décision de construire sur Mars une **colonie expérimentale** de taille significative. Les motivations pour un projet aussi grandiose pourraient être de diverses natures :

-*la sauvegarde de l'espèce en cas de catastrophe planétaire* (chute d'astéroïde, épisode d'hyper volcanisme, épidémie incontrôlable) est souvent évoquée ; la prise de conscience de notre fragilité provoquée par la crise climatique devrait nous rendre de plus en plus attentifs à la préserva-

tion de l'avenir de nos descendants ; au cours de ce siècle, d'ailleurs, l'astéroïde Apophis (300 m de diamètre) va nous donner un double et sévère avertissement : le vendredi 13 (!) avril 2029, il nous frôlera plus près que les satellites géostationnaires, avant de revenir le dimanche de Pâques 2036 (un impact, bien que très peu probable, ne peut être exclu...)



vendredi 13 avril 2029 : la menace d'Apophis ; en blanc, l'incertitude (2007) sur son altitude de croisement ; à l'intérieur de cette zone, le passage dans une tranche de 600 m conduirait à un impact catastrophique le jour de Pâques 2036... (DR)

-l'*épuiement des ressources terrestres* pourrait conduire au développement d'une industrie lourde spatiale, même si l'économie d'une telle perspective n'est pas facile à concrétiser ; cela faciliterait la création de colonies extraterrestres ;

-un tel projet répondrait aussi à *la volonté des nations* de stimuler leur innovation, de développer leur influence politique et culturelle ;

-enfin, plus fondamentalement, cette entreprise répondra à la propension naturelle de l'être humain à toujours *vouloir repousser ses frontières*.

Une telle colonie expérimentale devrait accueillir quelques centaines de colons, dont certains pourraient, pour la première fois, avoir décidé de s'expatrier définitivement. Son implantation ne serait possible que moyennant un investissement considérable de la part de la Terre et, même si son autosuffisance serait totale en ce qui concerne les matériaux de base, elle resterait largement dépendante pour les produits élaborés.

Les objectifs de cette expérimentation s'étendraient cette fois, bien au-delà de la sphère technique (et physiologique), dans trois directions principales :

- démonstration de la viabilité humaine et sociale du concept de colonie extraterrestre ;
- démonstration de la capacité d'une telle communauté à développer une économie d'exportation capable d'équilibrer financièrement à terme ses besoins en importations ;
- démonstration enfin de la capacité à maintenir un système écologique stable sur le long terme, et dans quelles conditions (réinjections, « remises à zéro » biologiques ?).

Il s'agit d'inconnues majeures. Il est difficile de se référer aux exemples historiques de colonisations et de communautés autarciques pour prévoir comment se structurerait et évoluerait cette société. En matière de biens et services exportables, par exemple, beaucoup d'idées ont été émises, mais elles reposent sur des hypothèses hasardeuses. Enfin, de l'avis des spécialistes, il est pratiquement impossible de modéliser le comportement d'un écosystème tel que celui qu'il s'agirait de créer.

Par la suite, ou bien l'expérience échouera, et on restera alors à des implantations humaines strictement limitées à l'exécution de tâches scientifiques et logistiques plus ou moins développées, ou bien elle se révélera progressivement un succès, ouvrant la voie à une nouvelle aire d'activité pour l'Homme. Nous nous plaçons ici dans cette deuxième hypothèse : les trois inconnues signalées ci-dessus ont pu être levées et, à cette occasion, la colonie expérimentale, à la suite d'un processus de développement devenu naturel, s'est mise à croître et à voir ses activités s'amplifier et se diversifier.

On aboutit à ce stade à une **colonie de première génération, devenue capable de se dispenser des subventions terrestres**, même si on suppose que les nations continuent de tout mettre en œuvre pour faciliter l'émergence et la consolidation de la nouvelle communauté (reconnaissance des droits de propriété foncière et intellectuelle, pratiques commerciales et prêts privilégiés, conditions de transport

à prix marginal, facilités pour les mouvements de personnes, etc.). Comme on se situe dans une phase évolutive, il est difficile d'estimer quelle devrait être la taille d'une telle colonie. Ce paramètre est essentiellement fonction de la variété des activités nécessaires à sa persistance. Une partie de ces activités est liée à son développement, à son fonctionnement et à sa maintenance ; une autre, la plus difficile à apprécier, est dédiée à la production des biens et services permettant à l'économie martienne d'atteindre l'équilibre dans ses échanges avec la civilisation terrienne.

C'est à ce stade de l'Histoire que nous situons notre étude. Ce choix permet en effet d'évaluer les caractéristiques et la faisabilité technique d'un véritable établissement humain extraterrestre, tout en se projetant le moins loin possible dans le futur, une façon de ne pas invoquer abusivement d'hypothétiques avancées techniques. L'étude n'ambitionnant pas d'analyser en quoi les activités d'exportation (productives) de la colonie pourraient consister précisément, nous ne sommes pas en mesure de justifier une taille minimum vitale. Nous avons fait l'hypothèse, raisonnable mais arbitraire, d'une population de **2 000 individus**. Cela peut sembler peu, mais nous verrons que si, sur Terre, une agglomération de 2000 habitants n'est qu'une toute petite ville, établir une telle communauté sur un autre monde représente une entreprise de très grande envergure. Ce nombre est par ailleurs vraisemblablement suffisant pour permettre de remplir l'ensemble des fonctions de la colonie. C'est donc sur la base de ce scénario que nous imaginerons l'architecture générale de la colonie, ses modes de réalisation et son fonctionnement.

Pour simplifier, nous supposons de plus qu'arrivée à cette taille, la colonie atteint un volume optimal lui permettant d'atteindre les objectifs économiques nécessaires à sa survie, autrement dit qu'elle n'est plus dans une phase de croissance continue et rapide. Compte tenu des activités « commerciales » qu'on peut imaginer à cette époque (recherche scientifique et technologique à caractère très spécifique, tourisme, soutien logistique à des missions astéroïdales encore expérimentales, exportations limitées à quelques métaux parmi les plus rares), cette hypothèse apparaît raisonnable. Elle permet d'étudier la colonie en « rythme de croisière ».

Les passionnés d'anticipation pourront se projeter plus loin dans le futur, à la guise de leur vision plus ou moins optimiste de notre destin en tant qu'espèce. Si l'on imagine que l'activité humaine dans le système Terre - Lune - Mars - Astéroïdes se développe au cours des prochains siècles, les conditions exceptionnellement favorables de la Planète rouge devraient voir sa ou ses colonies prendre de l'extension. Atteindra-t-on un jour le stade d'une **véritable civilisation**, déployée sur de multiples sites et pouvant atteindre des populations beaucoup plus importantes (centaines de milliers, voire millions de citoyens) ? Alors, le stade ultime de la saga des Martiens pourrait être la **terraformation**. Si ce projet grandiose d'ingénierie planétaire a fait l'objet d'études scientifiques sérieuses (Carl Sagan, Chris McKay), aucune analyse socioéconomique n'apparaît l'étayer...

L'opération se déroulerait en trois phases, avec des échelles de temps croissantes : réchauffement initial de l'atmosphère (par gaz à effet de serre artificiels) permettant la restauration d'une atmosphère de gaz carbonique de 150 mbar (échelle de durée : quelques décennies) ; production d'oxygène par photosynthèse à l'aide de microorganismes génétiquement modifiées (échelle de durée pour des premiers effets sensibles : dizaines de millénaires) ; mobilisation de la glace d'eau présente dans le sol (échelle de durée : centaines de milliers d'années). Vu l'ampleur des moyens à mobiliser et les durées impliquées, il ne pourrait s'agir que d'un projet porté par une civilisation nombreuse et prospère. On entre là dans le domaine de la Science-fiction...

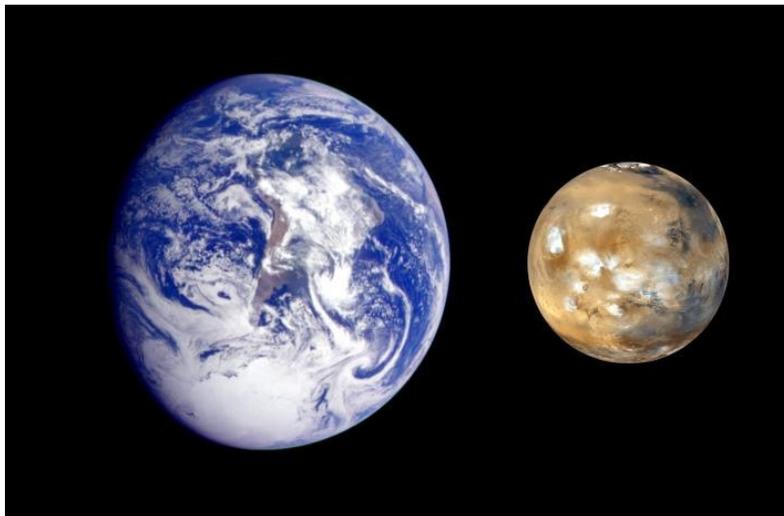
2. MARS, SITE PRIVILÉGIÉ POUR UNE COLONIE SPATIALE

Le groupe de travail Prospective 2100 sur l'avenir de l'Homme dans l'espace a retenu trois sites d'implantation pour concrétiser ses réflexions :

- une cité artificielle orbitant dans le domaine circumterrestre (travaux de G. O'Neil) ;
 - une colonie sur une surface planétaire (Mars) ;
 - enfin, la véritable colonie volante qu'il faudrait envisager de constituer pour mener à bien un voyage vers une étoile proche...
- (d'autres sites sont possibles : astéroïdes, satellites de Mars et, bien entendu, la Lune).

L'étude de ces trois cas n'aborde pas la question des finalités, et en particulier celle des activités qui seraient menées par les colons. Il est évident que le choix du lieu de colonisation dépendra non seulement des conditions d'habitabilité mais aussi, de façon essentielle, de la nature de ces activités. Mais il a été jugé que traiter l'ensemble du sujet nécessiterait de faire des hypothèses trop hasardeuses et éminemment discutables ; on a préféré se limiter aux aspects plus objectivables de la conception, des modalités de réalisation et des conditions de fonctionnement de la colonie. Naturellement les caractéristiques de son lieu d'implantation (« climat », pesanteur, accessibilité, ressources) jouent un rôle prépondérant sur l'ensemble de ces aspects. Nous allons en dresser un tableau en ce qui concerne Mars.

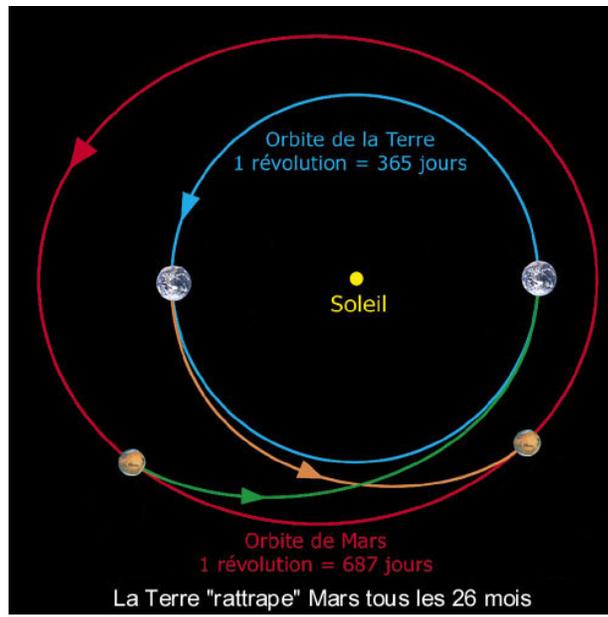
2.1 Caractéristiques astronautiques



la Terre et Mars : portrait de famille (doc. NASA/MSSS)

Le **diamètre de la planète** est environ la moitié de celui de la Terre, si bien que sa surface est quatre fois moindre, soit grosso modo la surface totale des continents terrestres. Cela donne une idée de l'immensité des territoires offerts à l'exploration scientifique, à l'exploitation des ressources et à l'établissement d'une colonie.

La **gravité** en surface est 0,38 fois celle de la Terre, conduisant à une vitesse d'orbitation circulaire (à 300 km) proche de 4 km/s (contre 8 pour la Terre et 1,5 pour la Lune). Cette fois, la Lune présente un avantage certain, mais un ΔV de 4 km/s représente peu de choses, même pour un moteur de technologie « conservative » oxygène - méthane, étant entendu que le propergol sera produit in situ.



les orbites de la Terre et de Mars (doc. APM/Espace Magazine)

Mars est plus éloignée du Soleil que la Terre, **circulant sur une orbite elliptique de périhélie 1,4 ua¹ et d'aphélie 1,7 ua**, qui la fait se rapprocher de la Terre, à des distances variant de 56 à 100 millions de km suivant la position de la planète sur son orbite au moment du rapprochement. Les oppositions (configuration où la Terre se trouve entre le Soleil et Mars) se reproduisent tous les 26 mois environ, et les oppositions périhéliques (lorsque Mars se trouve près de son périhélie) tous les 15 ans. Les fenêtres de lancement favorables (trajectoires de transfert à énergie minimale) se présentent donc tous les 26 mois ; et dans la pratique, même en imaginant disposer de moteurs futuristes de très fortes impulsions spécifique et de faibles masses, il reste impossible de s'affranchir du caractère cyclique de l'ouverture de ces fenêtres ; on pourra seulement les élargir. Notons également que d'une opposition à l'autre, la distance de rapprochement changeant, la quantité d'énergie à fournir aux vaisseaux en transfert est variable.

La présence d'une **atmosphère** (cf. §2.2) confère à Mars un avantage considérable au plan astronautique. En effet, bien que sa pression au sol soit faible, celle-ci offre un milieu d'une densité largement suffisante pour permettre des manœuvres de freinage aérodynamique (d'autant plus que la gravité réduite de la planète conduit à une épaisseur atmosphérique plus importante que sur Terre). Les manœuvres possibles sont l'aérocapture, la circularisation par aérofreinage, la cassure de la vitesse orbitale en vue de l'atterrissage, enfin la descente sous parachute, dans les couches les plus basses. Les gains en propergol sont déterminants pour le bilan global d'un système de transport spatial martien, même si le procédé n'est pas totalement « gratuit », puisqu'il faut disposer de boucliers aérodynamiques (et de parachutes). La présence d'une atmosphère fait qu'il est énergétiquement moins coûteux en propergol de voyager, à partir d'une orbite terrestre basse, à la surface de Mars qu'à destination de la surface de la Lune !

Sur le plan astronautique, Mars présente enfin deux autres spécificités intéressantes.

La première est la présence de **ses satellites, Phobos et Deimos** (dimensions d'une vingtaine de km, gravité de 1/1 000 g pour Phobos, le plus grand). Compte tenu de leur pesanteur négligeable et de la possibilité d'utiliser l'atmosphère martienne pour la capture orbitale d'un vaisseau en provenance de la Terre, ces mondes sont les plus accessibles du système solaire en matière de ΔV total d'un voyage aller et retour depuis l'orbite terrestre. Bien que leur composition - de surface et interne - reste mal connue, ils devraient de ce fait constituer des sources de minéraux sans équivalent et aussi, en fonction

¹ ua : unité astronomique : distance moyenne de la Terre au Soleil : 149,6 millions de km (8min18s de lumière)

de leur teneur en eau (glace ou minéraux hydratés), des sources d'hydrogène transférable au moindre coût énergétique dans le domaine circumterrestre.



le satellite de Mars Phobos (doc. NASA/JPL)

La deuxième est sa **relative proximité à la ceinture d'astéroïdes**, dans laquelle certains futurologues voient un trésor inépuisable en matière de ressources minérales à destination d'une industrie spatiale lourde, voire à destination de la Terre dans le cas des métaux les plus rares et les plus susceptibles de se raréfier ; on cite le cas du rhodium, très demandé pour la fabrication de catalyseurs industriels et excessivement rare. Des installations sur les astéroïdes pourraient être ravitaillées préférentiellement à partir de Mars en ergols, eau, nourriture, semi-produits de construction, et les rotations de main-d'œuvre pourraient également s'effectuer à partir d'une colonie martienne.

On le voit, malgré son éloignement du domaine terrestre, Mars présente de nombreux atouts en matière de voyages interplanétaires.

Il faut noter que l'éloignement ne se traduit pas par un handicap énergétique (on a vu au contraire que Mars était de ce point de vue moins coûteux à atteindre que la Lune), mais principalement par des durées de trajet importantes, typiquement 6 mois avec les technologies actuelles. Les conséquences de ces durées sur les plans médical, psychologique et sécurité des vols doivent être prises en compte dans la conception des vaisseaux.

Cela étant, le développement de générateurs électronucléaires très allégés (quelques kg par kW, contre 25 actuellement) pourrait permettre d'ici quelques décennies de réduire le trajet à 3 mois, grâce à la propulsion électrique de forte puissance.

2.2. Caractéristiques environnementales

Choisir un lieu d'implantation favorable en matière de mobilité astronautique des colons et des matériaux est fondamental. Mais encore faut-il examiner les conditions d'environnement que les individus (et les équipements !) auront à y affronter, sachant que, dans l'espace :

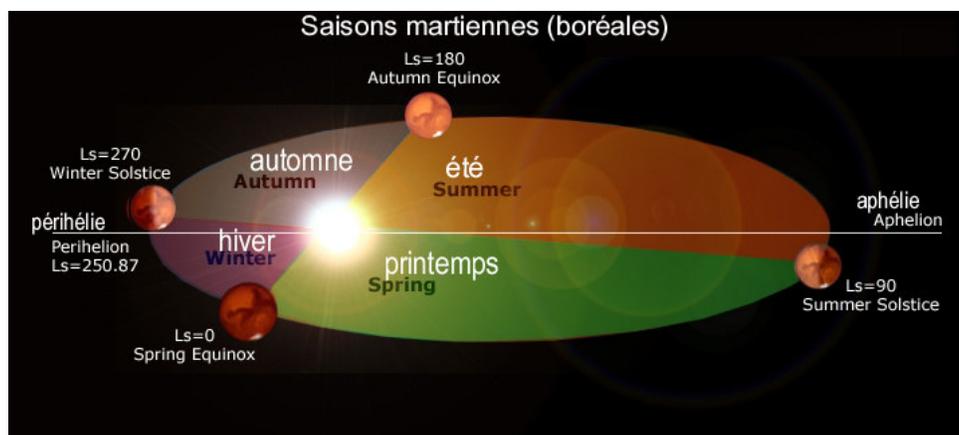
- l'environnement est hostile, quel que soit l'endroit ;
- mais que les colons ne le subiront pas vraiment, puisqu'ils seront contraints de vivre en environnement protégé (bâtiment étanche, véhicule pressurisé ou combinaison spatiale).

La surface de Mars, dont on a souligné l'étendue, offre de plus une **grande variété de paysages**, le plus souvent très spectaculaires, témoins de la richesse de l'histoire géologique mouvementée de la planète. Au-delà de leur intérêt pour l'exploration scientifique, ces sites d'une sauvage beauté présentent un indéniable attrait « touristique » qui devrait renforcer l'attachement des colons à leur planète. De plus, la présence d'une atmosphère donne vie à ces paysages désolés : de rares cirrus évoluent en

altitude, des tourbillons de poussière vagabondent sur les ergs, les teintes du ciel chatoient du rose saumon au mauve, se conjuguant aux couleurs chaudes des paysages. La valeur psychologique de cet environnement « vivant » ne saurait être sous-estimé ; même si on prévoit de reproduire au sein de la colonie des lieux d'apparence terrestre (jardins, plans d'eau...), savoir qu'on vit sur une planète riche d'un tel potentiel d'émotion est certainement plus motivant que de se savoir enfermé dans une enceinte perdue dans le vide.

L'éloignement de Mars par rapport au Soleil conduit à un **éclairage** en moyenne deux fois moindre qu'au niveau de la Terre (avec une variation marquée au cours de l'année martienne, du fait de l'ellipticité non négligeable de la planète). Ce facteur n'est évidemment pas favorable à l'utilisation massive de panneaux solaires comme source d'énergie. Par ailleurs, compte tenu de l'absence d'ozone dans l'atmosphère, le rayonnement ultraviolet en surface est 600 fois supérieur à celui que nous connaissons ; il sera cependant facile d'en protéger les humains et les plantations par le choix des matériaux (visières des scaphandres ou des dômes transparents).

L'inclinaison de l'axe des pôles est pratiquement identique à celle de notre globe, ce qui induit un phénomène de **saisons**, dont la durée est cependant à peu près double de celles que nous connaissons, puisque l'année martienne dure 1,88 an. Notons cependant que cette obliquité est essentiellement fluctuante, sur des périodes de 100 000 ans ou moins, avec des excursions pouvant aller de 0 à 40, voire 60°, capables d'induire des changements climatiques considérables, dont témoignent les dépôts feuilletés des glaces polaires ; un facteur qu'une éventuelle civilisation martienne devra prendre en compte dans sa planification de grands travaux !



les saisons martiennes (DR)

La **durée du jour**, 24 heures et 37 minutes, est particulièrement favorable à l'adaptation rapide des arrivants. Elle limite aussi les excursions thermiques entre le jour et la nuit (qui restent quand même de l'ordre de 60°C, compte tenu de la minceur de la couverture atmosphérique). Enfin, elle simplifie le problème du stockage d'énergie jour - nuit dans le cas d'une source d'énergie solaire. Ceci est à comparer favorablement au cas de la Lune, où la durée du cycle diurne de 28 jours induit de formidables contraintes de ces points de vue.

La **pesanteur** en surface réduite à 0,38 fois la pesanteur terrestre devrait suffire à éviter les effets physiologiques de la microgravité. Curieusement, après un demi-siècle de vols spatiaux, on n'a toujours pas pris le soin de s'en assurer, ni d'ailleurs pour le niveau encore inférieur de la pesanteur lunaire...²

² La Mars Society, relayée par le MIT, a initié le programme Translife, qui vise à lancer un petit satellite dans lequel des souris seraient soumises à ce niveau de pesanteur dans une centrifugeuse, puis récupérées pour analyse (cf. le site : <http://www.marsgravity.org/>)

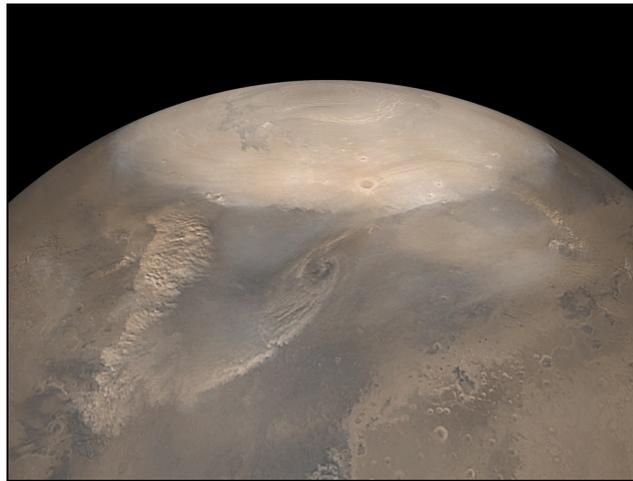
La gravité réduite va avoir une influence sur l'architecture. Elle facilitera les constructions, en particulier l'édification de dômes pressurisés devant être recouverts d'une couche protectrice anti-radiations (eau, régolite...).

La planète possède une **atmosphère**, essentiellement composée de gaz carbonique (à 95 %) mais contenant également de l'azote (2,7 %), et dont la pression est limitée à quelques mbar (6 à 10 mbar suivant la saison et l'altitude). Les températures sont généralement polaires, mais très variables, en fonction de l'heure, de la saison, de la latitude, de l'altitude. La température moyenne est évaluée à -55°C ; les températures extrêmes à -125°C et +20°C ; le cycle diurne s'étend normalement sur 60 °C. Comme pour la Terre, la température croît avec la profondeur dans le sous-sol, même si on ne connaît pas encore avec quel gradient.

Bien que ténue, cette atmosphère joue un rôle essentiel dans la perspective d'une colonisation :

- en tant que ressource particulièrement aisée à capter (cf. §2.3) ;
- en tant que manteau protecteur vis-à-vis des micrométéorites (les étoiles filantes se produisent sur Terre vers 80 km d'altitude, à une pression bien plus faible que celle qui règne sur Mars) ;
- par l'atténuation de la dose de rayonnements ionisants qu'elle procure (d'un facteur d'environ 2, d'après les modèles de simulation) ;
- enfin, en tant qu'auxiliaire précieux des manœuvres propulsives (cf. §2.1 précédent).

Même si les **vents** au sol restent usuellement inférieurs à 5 m/s, les gradients de température importants peuvent provoquer occasionnellement des « ouragans » (200 km/h). Si leurs effets mécaniques ne dépassent cependant pas ceux d'une légère brise, du fait de la faible densité de l'atmosphère, ils transportent à pleine vitesse de minuscules grains de poussière, qui auront donc un effet abrasif sur les superstructures.



tempête de poussière régionale développée au sud de la calotte polaire boréale (doc. MSSS)

A l'occasion, des **tempêtes de poussière** se produisent, soit régionalement, soit même (une fois par année martienne) globalement. Il en résulte un obscurcissement important du flux solaire (on a mesuré plus de 95 %), le dépôt de poussière sur les surfaces telles que panneaux solaires ou dômes de serre, enfin le risque de pollution de zones sensibles (joints, portées d'étanchéité, surfaces optiques...).

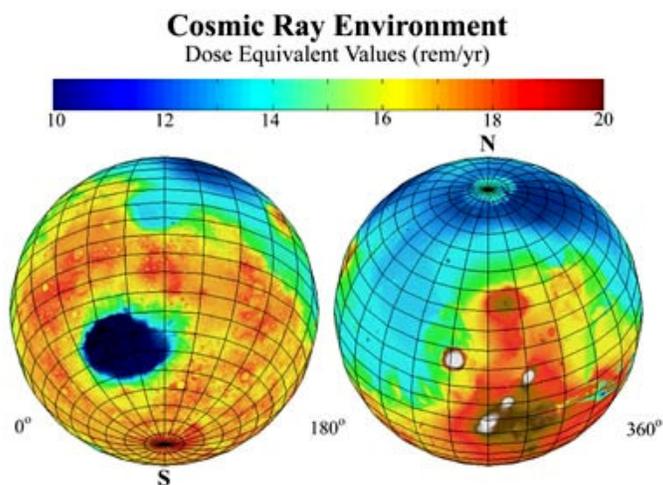
La contrainte environnementale la plus sévère pour l'installation de l'Homme sur Mars résulte des **rayonnements ionisants**, beaucoup plus intenses qu'à la surface de la Terre. Ceux-ci ont deux origines :

-*les flux de particules solaires* (essentiellement des protons) émis lors d'épisodes paroxysmiques appelés *Solar Particle Events* (SPE), qui se produisent aléatoirement, environ une fois par an, et qui durent quelques heures 12 ou 24 heures ; ils peuvent être létaux mais il est relativement facile de s'en protéger car, si leur flux est intense, l'énergie de leurs particules est moyennement élevée ; un

écran d'une trentaine de cm d'épaisseur d'un matériau riche en hydrogène (eau, polyéthylène) est suffisant ;

-*les rayons cosmiques*, qui constituent à l'inverse un flux continu provenant de toute la voûte céleste et qui peuvent atteindre des énergies colossales (20 GeV), sont très difficiles à arrêter (ils déclenchent des avalanches de particules secondaires à l'impact d'atomes d'écran, sauf dans le cas de l'hydrogène).

La dose endurée lors des trajets interplanétaires est à la limite de ce qui est toléré par les normes sanitaires internationales édictées en 1995 pour la Station Spatiale³. A la surface de Mars, par contre, on bénéficie de deux facteurs d'atténuation : d'une part, la moitié de la source est bloquée par l'horizon, d'autre part, on calcule que l'atmosphère, bien que ténue, divise grosso modo par deux le flux, si bien que la dose reçue annuellement descend à un niveau acceptable⁴, fonction de l'altitude (épaisseur d'atmosphère traversée). Si pour les missions d'exploration temporaires, la dose totale encourue reste acceptable, pour des séjours de longue durée, voire à vie, il sera hautement souhaitable de protéger la plupart des bâtiments.



doses annuelles sur Mars, calculées en fonction de l'altitude ; la dose tolérée est de 50 Rem (doc. J. Lewis)

2.3. Ressources

Dans tout projet de colonisation spatiale, la question de la disponibilité de ressources locales est évidemment déterminante ; établir la colonie en devant tout importer ou être capable de trouver sur place au moins les matériaux pondéreux n'ouvre pas les mêmes horizons ! La disponibilité in situ des ressources nécessaires à la vie de la colonie (eau, air, aliments, énergie...) est peut-être encore plus déterminante, puisqu'on touche là aux conditions de fonctionnement à long terme de la colonie.

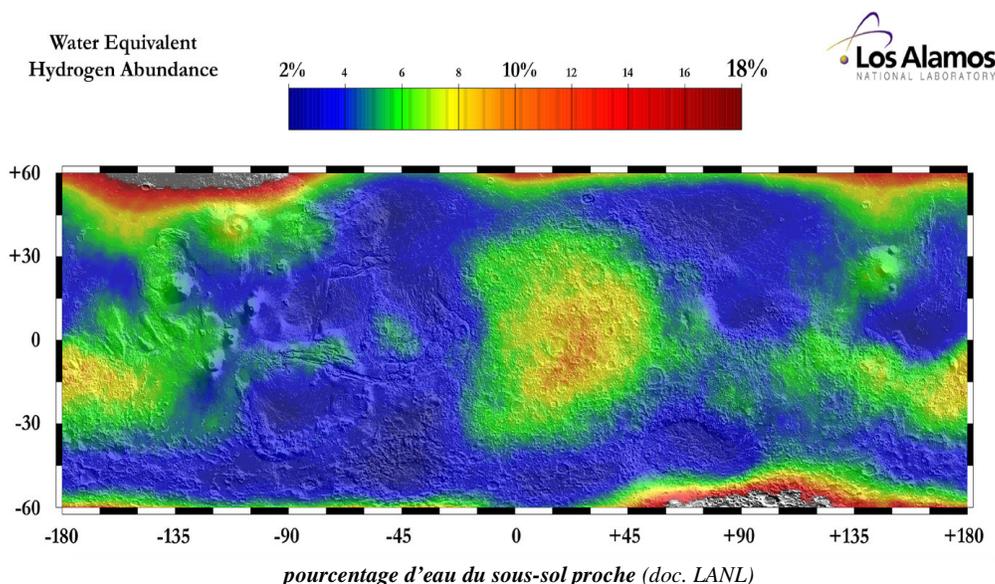
Eau

La surface de Mars est aride et son atmosphère, bien que possédant un taux de saturation suffisant pour permettre la condensation de nuages de glace, contient seulement quelques microns précipitables de vapeur). De fait, **l'eau** ne peut pratiquement jamais exister sur la planète sous forme liquide, compte tenu des conditions de pression et température qui y prévalent. Néanmoins, des traces nombreuses d'écoulements récents (moins de 1 million d'années, et probablement beaucoup moins) montrent que de l'eau liquide coule épisodiquement (sans doute à l'occasion de changements de climat cycliques provoqués par les variations importantes d'obliquité). Par ailleurs, on sait maintenant avec certitude que d'énormes quantités d'eau sont séquestrées :

³ Doses limites : 25 Rem sur un mois, 50 sur un an, 100 à 400 sur une vie (selon âge et sexe).

⁴ On manque à vrai dire encore de données expérimentales sur les rayons cosmiques, en ce qui concerne d'une part l'effet biologique des particules les plus lourdes et les plus énergétiques, d'autre part l'effet de l'atmosphère (et du sol) sur le flux (diminution de l'énergie et modification de la nature des particules).

- d'une part aux pôles (calotte de 1,5 à 2 km d'épaisseur) ;
- d'autre part dans le sol, dès le premier mètre, dans des proportions dépassant 50 % au-delà de 50° de latitude et allant encore jusqu'à 10 % dans certaines provinces équatoriales.



Mars, contrairement aux apparences, est donc un monde où l'eau abonde, partout, et est facilement exploitable. Une colonie n'aura aucun mal à s'approvisionner en eau, à un coût d'extraction minimale (minage du sol et fonte de la glace contenue). Il est néanmoins impossible aujourd'hui d'affirmer que cette eau est présente sous forme de glace mélangée au sol (pergélisol) ; il se pourrait qu'une partie de l'hydrogène détecté par le spectromètre à neutrons de Mars Odyssey provienne de molécules d'eau adsorbées, soit de minéraux hydratés. Mais la détection de glace vive sur le site de la sonde Phoenix (à 68° de latitude) et l'histoire géologique générale de la planète rendent vraisemblable la présence de glace.

Hydrogène

La disponibilité d'eau permet d'accéder ipso facto à une autre ressource essentielle, l'hydrogène. Celui-ci est avant tout précieux comme ergol de moteurs fusées, que ceux-ci fonctionnent en oxygène - hydrogène ou méthane ou méthanol (synthétisés sur place, cf. §5.5) ou même qu'il s'agisse de ravitailler une navette interplanétaire à propulsion nucléothermique, voire moteur magnétoplasmique resté en orbite.

Mais il sera aussi utilisé pour fabriquer des matières plastiques et, probablement, dans bien d'autres procédés de synthèse chimique.

Oxygène

Sur Mars, nul besoin de manipuler des tonnes de régolite ni de dépenser d'énormes quantités d'énergie pour obtenir pour casser des oxydes très liés pour obtenir de l'oxygène. L'oxygène est un « sous-produit » de l'électrolyse de l'eau pratiquée pour obtenir l'hydrogène. On peut aussi puiser l'atmosphère, décomposer le CO₂ atmosphérique (à 95 %) vers 1 100°C, et séparer l'oxygène du monoxyde de carbone à l'aide de cellules à membrane de zircone.

L'oxygène est indispensable comme constituant de l'atmosphère des habitats et comme ergol des moteurs fusées chimiques.

Azote

L'atmosphère martienne contient 2,7 % d'azote. C'est peu, mais c'est une aubaine ! En effet, l'azote, pour inerte qu'il soit, est indispensable, avant tout comme gaz tampon des atmosphères artificielles. Mais il sera mis aussi à profit pour fabriquer des engrais azotés, nécessaires aux cultures vivrières.

Gaz carbonique

Le gaz carbonique atmosphérique est la ressource la plus accessible offerte par la planète à ses habitants. On vient de le voir, il permettra une production relativement aisée d'oxygène. Mais il sera aussi largement utilisé comme source de carbone pour la production d'hydrocarbures utilisés dans les moteurs-fusées. En effet, méthane, méthanol ou hydrocarbures plus lourds, polycycliques ou non, peuvent être obtenus par des procédés simples et peu gourmands en énergie, dont le plus prisé est le procédé de Sabatier (cf. §5.5.4).

Plus généralement, le CO₂ constitue une source de carbone, qui pourra être utilisé dans d'autres procédés industriels.

Régolite

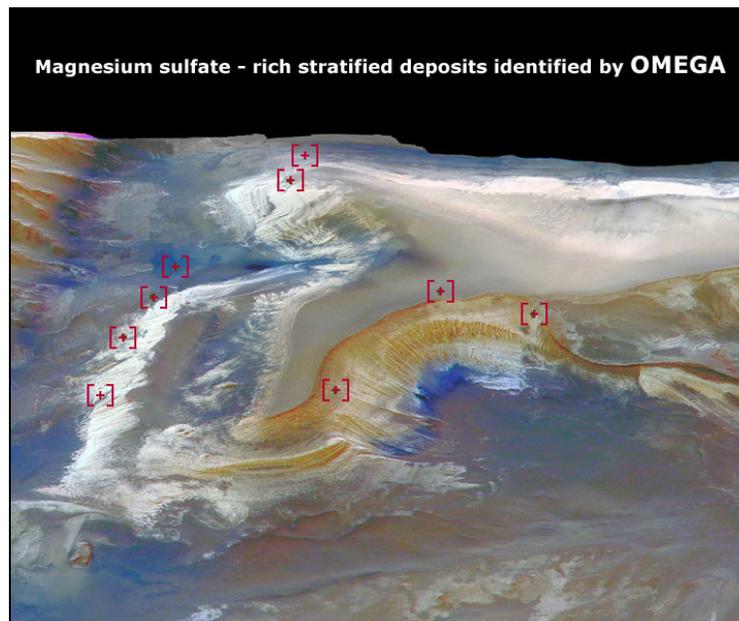
Le régolite, matériau poudreux ou concassé, sera utilisé massivement comme couverture des habitats, en vue de protéger ceux-ci des rayonnements ionisants. Par réduction de la silice on peut en extraire du silicium, pour la production de panneaux solaires (dans la mesure où d'autres technologies photovoltaïques ne seraient pas apparues d'ici là !).

Argiles

Les dépôts d'argiles sont nombreux sur Mars. L'argile peut être utilisée comme matériau de construction, sous forme de briques.

Sels minéraux

Les récentes missions robotiques ont révélé que les terrains martiens recelaient d'abondants dépôts de sels minéraux, principalement des sulfates et des chlorures, source de soufre et de chlore, permettant la synthèse d'acide sulfurique et de plastiques.



dépôts découverts par le spectromètre imageur de l'équipe de J.P. Bibring, embarqué sur Mars Express (doc. ESA)

Minerais

Tous les éléments métalliques sont présents dans le sol martien. Le plus abondant, sous forme de divers oxydes, est le fer. Il sera donc toujours possible d'extraire du fer, du titane, de l'aluminium du régolite. Par ailleurs, l'activité volcanique de la planète, très intense dans un lointain passé, a dû conduire à des manifestations hydrothermales importantes (dont le rover Spirit a d'ailleurs découvert une exemple caractéristique sur le site de « Home plate ») : ces phénomènes ont-ils été assez nombreux et prolongés pour avoir permis le dépôts de filons ? Nous ne le savons pas encore, mais il y a tout lieu de le penser. Ces gisements riches seraient surtout précieux dans le cadre de l'économie

d'exportation de la colonie ; en effet, l'approvisionnement de certains métaux déjà rares sur Terre (famille du platine par exemple) pourraient dans un proche avenir devenir un réel problème sous l'effet conjugué de l'épuisement des gisements et de la croissance des besoins industriels.

En matière de fabrication de pièces métalliques à usage de la colonie ou pour l'exportation vers des chantiers spatiaux, le fer du régolite devrait suffire, surtout si, grâce à la présence de carbone, on peut le transformer en acier.

Terrains cultivables

Le sol martien ne recèle pas de matières organiques en quantités utiles à une culture. Par contre, on a découvert qu'à certains endroits du moins il contenait les nutriments indispensables et ne présentait pas de caractéristiques rédhibitoires (acidité excessive par exemple). Il sera donc possible d'utiliser du sol martien comme support de cultures vivrières sous serre, à condition de l'amender et de l'irriguer. La proximité de ce type de sol sera un des facteurs à considérer pour le choix du site d'implantation.

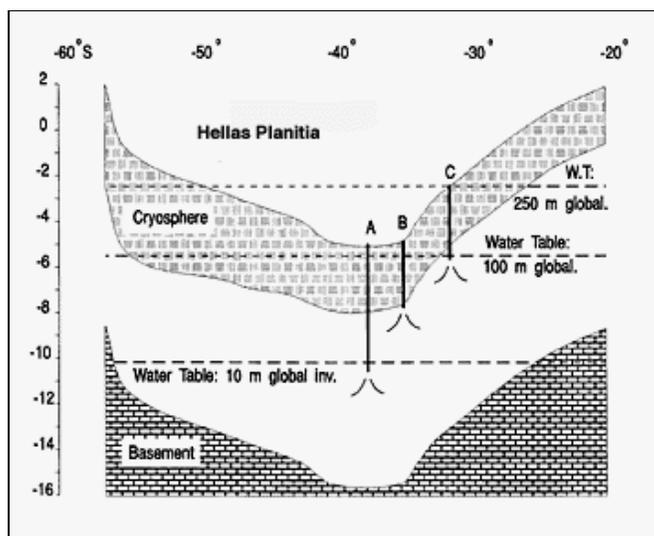
Énergies

Solaire

Sur un monde pratiquement sans nuages, aux vastes étendues vierges et présentant un cycle diurne de durée acceptable, il est a priori intéressant de tabler sur l'**énergie solaire**. Mais on a déjà signalé trois contraintes : la distance au Soleil, qui divise par 2 le rendement des panneaux par rapport à la Terre, les phénomènes de tempêtes de poussière, qui réduisent pratiquement à zéro la production d'énergie, et le dépôt inéluctable de cette poussière sur les panneaux (dépeussierage robotisé à prévoir)...

Aréothermique (ou aréohydraulique)

La géologie et la topographie martiennes permettent d'imaginer utiliser l'énergie provenant de gisements hydrothermaux ou même simplement hydrauliques. En effet, la thèse selon laquelle les énormes quantités d'eau qui ont labouré les paysages martiens sont à présent en grande partie séquestrées dans le sous-sol a été confortée par l'observation de quantités d'eau importantes (sous forme de glace et d'hydrates) dans les premiers mètres du sol. Si l'épaisseur de régolite imbibée d'eau est suffisamment importante, la glace doit se transformer en eau liquide à une certaine profondeur, laissant la place à des nappes phréatiques. En creusant des puits dans des dépressions (canyons, fonds de bassins d'impact) on pourrait faire jaillir de l'eau sous pression... Cette pression en elle-même pourrait actionner des turboalternateurs. Si de plus l'eau est chaude, ce qui devrait être le cas à une profondeur suffisante, on peut l'utiliser comme source chaude d'une machine thermique. Mieux encore, cette eau chaude sous pression se vaporisant immédiatement au débouché du puits, on peut utiliser directement cette vapeur pour faire tourner un turboalternateur.



des puits artésiens sur Mars ? (doc. M. Fogg)

Éolienne

La vitesse que peuvent atteindre les vents est un avantage trompeur, du fait de la faible densité de l'atmosphère. Par ailleurs, la vitesse du vent est usuellement beaucoup plus réduite (cf. §2.2). Cette option n'est pas applicable.

Ce tour d'horizon des ressources montre à quel point la surface de Mars est un site séduisant pour le projet de colonie spatiale. Il ne manque à vrai dire rien d'essentiel, sauf probablement des matières organiques pour amender les cultures (mais les déchets pourront être recyclés à cette fin, et des engrais azotés pourront être synthétisés). Notons en particulier que sont présents, contrairement au cas de la Lune, **les éléments chimiques de base de la vie** : C H O N.

2.4 Potentiel scientifique

Dans une communauté dont le niveau culturel, compte tenu des conditions à remplir pour vivre et travailler dans ces conditions particulières, sera a priori élevé, la recherche constituera une des activités majeures. L'économie martienne devrait en tirer une part déterminante de ses revenus d'exportation et le potentiel scientifique de la planète doit donc être considéré comme un élément de l'environnement de la colonie déterminant pour son évolution.

Ce potentiel, révélé dès à présent, sera exploité sur plusieurs plans :

-**La biologie** : à l'époque, la question de la vie sur Mars sera évidemment tranchée ; qu'on trouve des microorganismes vivants ou fossiles, l'étude comparative de la biologie moléculaire martienne et terrienne promet de faire approcher de beaucoup plus près les fondements mêmes du phénomène de la vie, avec toutes les conséquences qu'on peut espérer dans le domaine médical. Si on devait constater que la vie n'a pas réussi à éclore, on sait que l'histoire géologique de la planète (phase initiale propice à la vie suivie d'ères au cours desquels les dépôts sédimentaires primitifs ont été préservés) aura conservé des indices sur cette phase restée stérile, dont l'étude permettra d'approcher les origines de la vie.

-**La planétologie comparée** : même après un siècle d'exploration scientifique, beaucoup restera à faire pour mieux connaître la planète et nous aider ainsi à améliorer nos modèles géologiques, climatiques, hydrologiques, et de mieux comprendre comment fonctionne la Terre. En particulier, certains travaux scientifiques, comme les forages à très grande profondeur, ne pourront être entrepris que par une communauté suffisamment développée.

-**La maîtrise de l'environnement et des ressources** : ce sera peut-être le domaine de recherche scientifique et technologique dont la colonie tirera le plus de profit, au travers de la mise au point de procédés dont ils céderont la licence pour des applications terrestres. Cette maîtrise est tellement déterminante pour la viabilité d'une colonie et le potentiel de progrès tellement ouvert qu'elle devrait engendrer une véritable industrie de haute technologie. Les sous-domaines principaux concernés sont : recyclage de l'eau, recyclage ou amendement des déchets, maîtrise et stockage de l'énergie, récupération de l'énergie thermique des centrales, cultures intensives à haut rendement, gestion des écosystèmes clos, etc.

-**Les sciences humaines** : quel extraordinaire sujet d'étude que cette nouvelle communauté, créée à partir de rien, une entité humaine totalement nouvelle ! Les travaux dans ce domaine devront évidemment se dérouler essentiellement sur place, donnant naissance à un institut de recherche de pointe qui travaillera en étroite relation avec ses homologues terriens.

2.5 Attractivité

Mars présente tous les attributs psychologiques d'un monde. Un monde aux paysages incroyablement variés et de toute beauté, un désert polaire certes, mais auquel les couleurs chaudes de son sol et de son ciel redonnent vie, une planète au passé géologique et climatique extraordinairement riche, qui continue à vivre et qui semble attendre notre arrivée. Ce monde est une source d'imagination et d'inspiration unique parmi toutes les destinations astronautiques imaginables.

3. CONTRAINTES D'AMÉNAGEMENT ET CARACTÉRISTIQUES D'ENSEMBLE

Avant d'examiner en détail les infrastructures à mettre en place et à faire fonctionner pour assurer la vie de la colonie, il est utile d'analyser les contraintes auxquelles sera soumise la conception d'une colonie du type et de la taille envisagée ici (pour mémoire : première génération de colonie autonome, population de 2 000 personnes) et de donner une vue d'ensemble de ses principes d'aménagement général.

3.1. Contraintes d'aménagement

Utilisation des ressources in situ

L'utilisation de matériaux martiens pour la réalisation des constructions est un impératif majeur, compte tenu du coût considérable du transport de matières pondéreuses depuis la Terre (ou de la Lune). Fort heureusement, la présence d'oxydes de fer, de carbone, d'argiles et d'eau permet d'envisager de pouvoir les produire sur place. A condition de consentir cependant à un investissement initial conséquent : véhicules de collecte de matière première (scrapeurs, camions, convoyeurs...), installations de prétraitement des sols, de traitement chimique ou d'électrolyse, fours de cuisson (argiles), fours de production d'acier... Chacun de ces moyens gardera une taille modeste à l'aune des installations industrielles terrestres. Néanmoins, ils représenteront un tonnage importé de la Terre, ainsi qu'une quantité de main-d'œuvre pour la mise en place, relativement importants.

Servitudes astronautiques

La colonie, quel que soit son niveau d'autarcie, sera fortement dépendante des infrastructures astronautiques propres à assurer les trafics avec le domaine circumterrestre, les astéroïdes et les satellites de Mars, mais aussi les déplacements aériens à la surface du globe.

Même à cette époque avancée, les véhicules spatiaux resteront potentiellement dangereux, tout particulièrement au décollage (quand les réservoirs sont pleins) ; pour des raisons de sécurité, les aires de lancement (et d'atterrissage), ainsi que les infrastructures d'avitaillement, devront donc être suffisamment éloignées des zones habitées (plusieurs kilomètres). Les halls de maintenance - préparation devront également être déportés. Les aires d'atterrissage devront être consolidées et dépoussiérées et les pas de tir devront comporter un déflecteur pour éviter les projections sur le vaisseau en partance.

En principe, il n'est pas exclu d'utiliser des avions sur Mars, à condition de tolérer des envergures et des vitesses de décollage et d'atterrissage importantes, ce qui veut dire des pistes d'aérodrome de grandes dimensions.

D'un point de vue bilan d'énergie de lancement, un site proche de l'équateur serait préférable ; mais comme les ΔV à fournir sont nettement inférieurs au cas de la Terre, ce critère sera moins contraignant.

Bien entendu, cette vaste zone aéroportuaire devra être desservie par des routes, elles aussi consolidées, propres à assurer l'approvisionnement en ergols des zones d'avitaillement, le transit des vaisseaux, le trafic marchandises et passagers, ce qui pourrait représenter une vingtaine de kilomètres de voies.

Contraintes environnementales

Les caractéristiques de l'environnement, décrites au §2.2, vont déterminer dans une large mesure non seulement la conception des bâtiments, mais aussi l'aménagement d'ensemble (le plan de masse) de la colonie ; les facteurs perçus comme les plus déterminants sont : la pesanteur réduite, la composition, la pression et la température de l'atmosphère, la température et l'état physique du sol (poudreux, rocheux ou gelé), la présence de la poussière, les rayonnements ionisants (dont il faut se protéger).

La pesanteur réduite constitue à vrai dire un atout, que devront mettre à profit les architectes martiens. Les structures pourront être plus légères et plus élancées, leur assemblage nécessitera des machines de chantier moins puissantes. Mais l'avantage le plus significatif se manifestera dans la maintenance et la mise en place des revêtements épais destinés à protéger les bâtiments des radiations ionisantes, voire à assurer leur isolation thermique.

Pression et composition de l'atmosphère interdisant de vivre à l'air libre, tous les environnements habitables (bâtiments, véhicules fermés, combinaisons spatiales) devront être nécessairement

clos et pressurisés en atmosphère contrôlée. La pressurisation entraîne plusieurs contraintes techniques et opérationnelles :

-les coques de ces éléments (dont certaines seront de grandes dimensions) devront résister à la pression interne, qui pourrait être limitée à 340 hPa, comme dans la station Skylab (240 hPa d'oxygène, 100 hPa d'azote), sachant que la pression extérieure est pratiquement nulle ;



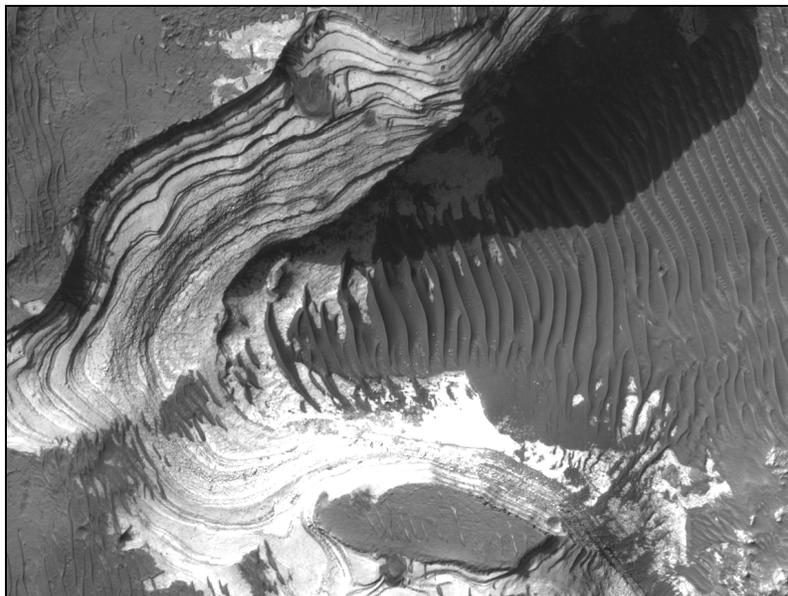
Skylab fonctionnait à une pression atmosphérique de 340 hPa seulement (doc. NASA)

-la sécurité impose une segmentation poussée en espaces séparés par des portes à fermeture express permettant d'isoler rapidement un segment frappé d'un accident de dépressurisation ;

-les caractéristiques de l'air dans les différentes enceintes devront être continuellement surveillées et des dispositifs devront permettre de les maintenir dans des limites relativement étroites, en ce qui concerne : pression, température, composition (taux d'oxygène et de CO₂), humidité, taux de polluants chimiques et organiques, charge en microorganismes.

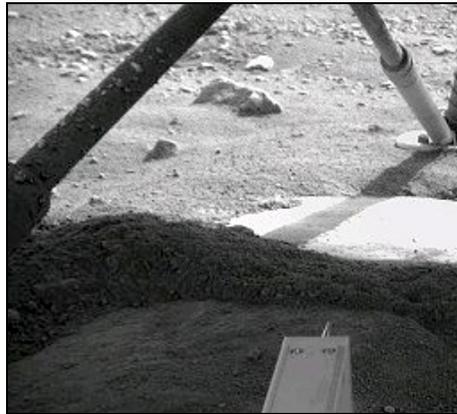
Le sol martien

La nature du sol martien peut être variée en surface : champs de lave, dépôts sédimentaires en terrasses, plus ou moins cratérisés selon leur âge, généralement encombrés de roches éparses, mais aussi dunes de sable ou de poussière, ou encore glissements de terrain, moraines, etc.



terrasses sédimentaires, champs de dunes et falaises : Mars n'est pas faite que de plaines désertiques, comme le choix prudent des sites d'atterrissage pour les sondes automatiques peut le laisser penser (doc. NASA/JPL)

Le régolite, mélange de poussière et de débris de roches fracassées par les impacts météoritiques, est omniprésent, sur une épaisseur qu'on n'a pu mesurer pour l'instant, mais qui devrait atteindre plusieurs centaines de mètres ou plus. Ce régolite en lui-même, et la couche de poussière plus ou moins fine qui le recouvre, constituent a priori des matériaux idéals à manipuler et à creuser. Cependant, de façon plus ou moins importante selon la latitude (cf. §2.3), ce sol est mêlé à de la glace d'eau, qui tend à le rendre très dur, sauf dans une couche anhydre superficielle de quelques dizaines de cm au plus. Il sera donc toujours possible de collecter du régolite, mais si l'on désire creuser (pour enfouir des bâtiments ou des servitudes) il faudra veiller à choisir un site pauvre en glace d'eau superficielle (ce qui est le cas général des régions sub-tropicales).



les jets des moteurs de descente de la sonde subpolaire Phoenix ont dégagé la couche de sol superficielle, dévoilant un socle de glace d'eau (doc. NASA/JPL/Un.of Arizona/Max Planck Inst.)

Dans la conception des bâtiments, il faudra tenir compte d'une autre caractéristique du sol : sa basse température ; en effet si la température de l'atmosphère connaît des excursions importantes selon l'heure et la saison, celle du sous-sol reste proche de la température moyenne (au voisinage de -50°C). Il sera donc nécessaire d'isoler les parois des coques d'habitation qui sont en contact direct avec le sol. Notons, d'un autre côté, que ce « réservoir » de froid pourrait être mis à profit pour constituer la source froide de générateurs électronucléaires, mais à condition d'être capable d'y enfouir un réseau développé de canalisations pour la circulation du fluide de refroidissement.

La poussière

Comme sur la Lune, Mars est un astre largement couvert d'une poussière produite par le fracas des sols par les impacts. L'atmosphère, tenue mais agitée par de forts gradients thermiques, mobilise ce milieu, ce qui a deux conséquences à prendre en compte dans la conception de la colonie :

-l'air contient de la poussière (micrométrique) en suspension ; compte tenu des risques potentiels qui en résultent pour la santé (silicose, éventuelles intoxications), mais aussi des difficultés qu'une accumulation progressive de poussière dans les habitats pourraient présenter (pertes d'étanchéité, encrassement d'équipements), il faudra mettre en place des dispositifs de dépoussiérage puissants à toutes les entrées (sas, dispositifs à air, électrostatiques...) ;

-toutes les surfaces exposées à l'atmosphère se couvrent progressivement de poussière ; pour les surfaces sensibles au phénomène (en particulier panneaux solaires) il faudra donc prévoir des équipements de nettoyage.

Les rayonnements ionisants

La nécessité de protéger les bâtiments (du moins ceux où séjourneront le plus fréquemment les colons) conduira à un type d'architecture bien particulier, alliant protection par une couverture de régolite et ouvertures sur la lumière et l'environnement visuel extérieur par différentes dispositions (cf. § 3.2 suivant). Un mètre de régolite suffirait. On pourrait imaginer augmenter cette épaisseur à 2,5 m pour équilibrer la pression interne par le poids de la couverture, mais dans ce cas l'enceinte s'effondrerait en cas de dépressurisation...

A proximité des zones d'activité en extérieur, éloignées de la colonie elle-même, il faudra prévoir des refuges anti-orages solaires (pas nécessairement pressurisés). Les véhicules eux-mêmes, dans la me-

sure où leur autonomie permettra de s'éloigner à plus d'un quart d'heure d'un refuge, devront comporter un réduit de protection.

Accès aux ressources

Certaines infrastructures devront, par nécessité, être installées sur les sites de minage, dont la proximité sera un des critères de choix du site d'implantation de la colonie. Cela concerne par exemple les exploitations de minerais, de sels minéraux, d'argiles. Par contre, pour tout ce qui concerne l'atmosphère et l'eau, et les activités de transformation de ces ressources, l'intégration des installations au voisinage immédiat de la colonie sera préférée pour des raisons de commodité d'accès et de sécurité.

La distribution des ressources fluides (air, eau, éventuellement eau chaude) et de l'énergie (électrique et thermique) doit être prise en compte dès la conception d'ensemble car ces infrastructures représentent une part non négligeable du coût d'équipement et de maintenance.

Dans le même ordre d'idées, la récupération des effluents et déchets, tellement cruciale pour la colonie, devra être assurée par des réseaux desservant les unités de recyclage intégrés dans l'architecture d'ensemble.

Infrastructures de production (matérielles et intellectuelles)

Elles devront aussi être intégrées, aussi harmonieusement que possible, au reste de la colonie.

3.2. Caractéristiques et types d'implantation des enceintes

Certaines des contraintes énumérées ci-dessus jouent un rôle déterminant dans la conception de la colonie, et plus particulièrement sur les types d'enceintes pressurisées concevables et leur implantation sur la planète. La nécessité de tenir la pression et le souhait d'atténuer les rayonnements ionisants conduiront à un nombre limité de solutions de base.

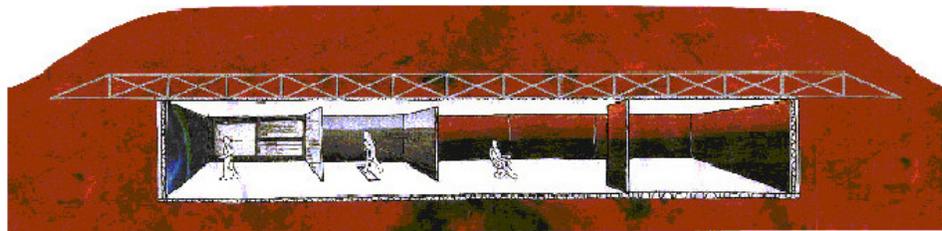
Les enceintes en surface devront être :

- des **sphères** (à la rigueur des lentilles sphériques)⁵ ;
- des **cylindres à fonds elliptiques** ;
- des **tores**.

Les formes des zones enterrées seront moins contraintes (la pression étant reprise par la couverture de régolite). Plus les dimensions de ces structures seront importantes, plus l'épaisseur de leur coque sera conséquente (sachant malgré tout que la couche de matériau protecteur peut contribuer à la tenue en pression, mais aux dépens de la sécurité structurelle en cas de dépressurisation accidentelle).

Plusieurs *modes de réalisation*, plus ou moins complexes à mettre en œuvre, sont envisageables à partir de matériaux in situ :

- métallique**, sous forme de cylindres d'aluminium ou d'acier ;
- plastique**, sous forme d'enveloppes gonflables ou soudées par morceaux sur une ossature ;
- minérale**, à base de briques d'argile ou de blocs de ciment, sous forme par exemple de structures à voûtes multiples.



habitat recouvert de régolite (doc. P. Brulhet)

⁵ La fixation à une dalle de fondation d'un dôme hémisphérique non chargé (transparent) de 1000 m² devrait reprendre une force de 3400 T, soit 30 T/m linéaire !

Les revêtements anti-radiations se présenteront sous les formes suivantes :

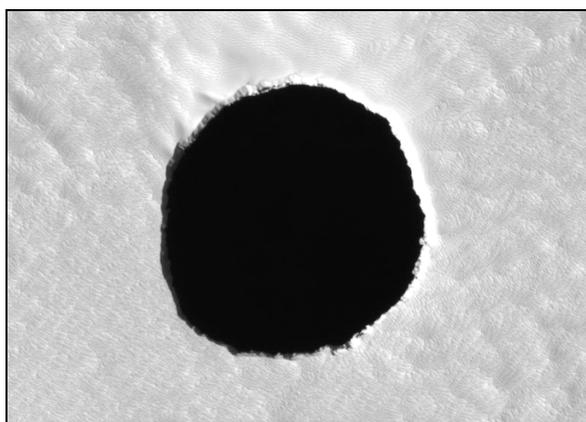
- simple **couche de régolite**, poussée sur les structures par un bulldozer ;
- sacs de régolite**, empilés par grutage, pour des structures plus petites et se prêtant moins à l'accès de bulldozers ;

- blocs de glace**, mis en place soit directement sous forme solide, soit sous forme liquide (remplissage de caissons), l'eau constituant, après l'hydrogène liquide, le meilleur écran.

Cette dernière solution pourrait s'avérer utile pour des serres à éclairage naturel, dans la mesure où on ne souhaiterait pas voir les récoltes éventuellement ravagées par des orages solaires. Une couche d'une trentaine de cm d'épaisseur pourrait suffire, mais elle peut être plus importante si on veut utiliser ce revêtement pour compenser la pression, ce qui peut être plus facilement envisagé pour une enceinte normalement inhabitée.

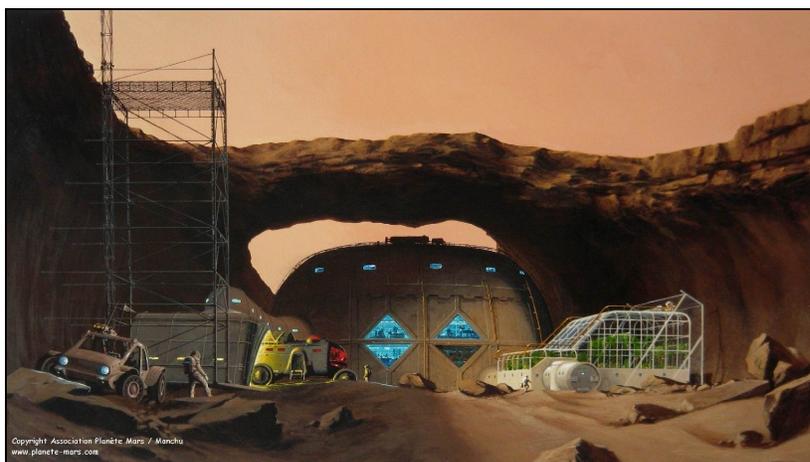
Toujours dans le but de réduire l'ambiance radiative, il a été proposé d'installer la colonie en un lieu procurant une protection naturelle :

- dans une dépression** (fond d'un cratère frais, canyon, gouffre) ;



super-Padirac sur Mars (doc. NASA/JPL)

- dans des tubes de lave** (qu'il faudrait sérieusement consolider) ;



base installée sous un pont naturel, dans un tube de lave effondré (doc. Assoc. Planète Mars / Manchu)

- ou au flanc d'une falaise** ⁶ orientée vers le pôle de l'hémisphère, ce qui permet de réduire l'angle solide du ciel (donc la dose de rayons cosmiques) et le temps de visibilité directe du soleil (donc les risques majeurs dus aux orages solaires) ; dans ce dernier cas, on peut même imaginer de creuser les emplacements des modules au flanc du relief (comme dans le projet Homestead) ;

⁶ Les falaises importantes présentent des risques d'instabilité. La pente des falaises stabilisées est limitée à un peu plus d'une trentaine de degrés.

-signalons encore la proposition de situer la colonie dans une **caverne de calotte polaire**, naturelle ou creusée au flanc d'une des vallées façonnées dans l'énorme glacier ; idéal pour la protection contre les radiations et pour trouver de l'eau !

Profiter du relief est certainement une excellente idée. Il ne faudra cependant pas que cela conduise à restreindre la mobilité au sein de la colonie (cas des tubes de lave), ni l'accès à l'environnement extérieur, y compris à l'aire astronautique (cas d'un canyon ou d'un gouffre !). L'implantation au pied d'une déclivité stabilisée et faisant face à un vaste terrain bien dégagé semble de ce point de vue la solution la moins contraignante. Cette déclivité peut d'ailleurs être de faible dénivelé ; elle peut n'être que le flanc érodé d'une terrasse comme on en trouve empilées par centaines en d'innombrables sites.

Pour réaliser ces implantations, il faudra en fabriquer et en manipuler les éléments avec des machines et engins qui, pour la plupart importés à grand prix de la Terre, seront de taille limitée. Par ailleurs, la charge de main-d'œuvre en conditions d'EVA⁷ (en scaphandre) dépendra fortement du mode d'implantation retenu ; il est beaucoup plus simple d'aligner sur le sol et de connecter des modules cylindriques préfabriqués (avant de les recouvrir de régolite) que de creuser des galeries (ou même des saignées) dans une colline (cet aspect terrassement et manutention est peu couvert dans la littérature). Il en résulte qu'on verra s'édifier des **réseaux de multiples cellules semblables**, de taille relativement modeste, plutôt que de grands dômes ou hangars. Ce type d'aménagement est d'ailleurs optimal pour la sécurité, puisqu'il limite l'espace à condamner en cas de dépressurisation accidentelle. Naturellement, ces réseaux devront eux-mêmes être tous interconnectés, de façon à ce qu'il soit possible de se déplacer d'un module à l'autre de la colonie sans procéder à une sortie. Malgré tout, il paraît difficile de priver la colonie de quelques lieux de socialisation plus vastes (dômes, grandes galeries).

3.3. Agencement général de la colonie

Les considérations d'urbanisme prendront une grande importance compte tenu des conditions d'existence des habitants :

- pas de vie « à l'extérieur » autrement qu'en combinaison spatiale ou en véhicule pressurisé ;
- espace disponible « en bras de chemise » délimité (on finit par se heurter partout à un mur d'enceinte ou à la paroi d'un dôme) ;
- superficie totale couverte limitée, qu'il faudra donc enrichir de perspectives et d'aménagements variés ;
- population réduite, d'où conditions psychologiques particulières (sentiment de ne voir que des têtes connues)...

Malgré ces conditions, les habitants devront pouvoir disposer d'une palette de services complète : ils ne devront manquer de rien et trouver dans les espaces publics une ambiance et une variété propre à briser l'impression d'enfermement. Les urbanistes et les architectes auront là un beau terrain pour exercer leurs talents. Ils devront cependant se soumettre aux limitations qu'imposent la construction sur un autre monde : utilisation maximale des ressources locales, économie drastique d'une main-d'œuvre limitée, nécessité de travailler sur les chantiers de construction en combinaison spatiale, contraintes de sécurité particulières liées à l'environnement... Autant dire que leur créativité sera sérieusement bridée, à moins qu'on considère au contraire que ces problèmes la stimuleront !

On peut imaginer deux grands types d'agencement général :

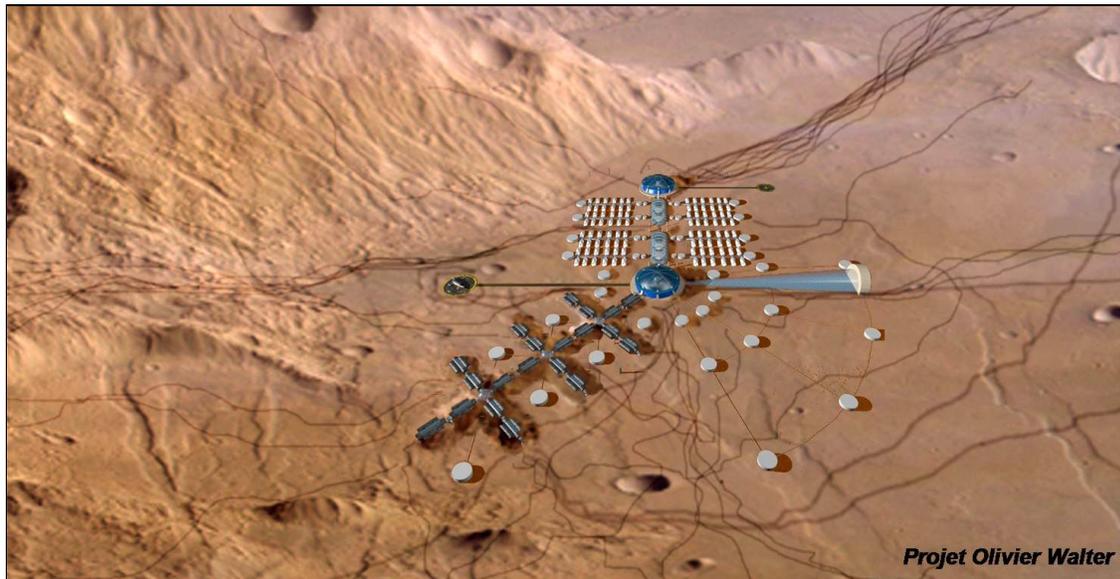
- linéaire : le long d'un axe principal de communication, les différentes infrastructures sont implantées, par zones (habitations, bureaux, ateliers, serres, etc.) ;
- rayonné : les différentes zones sont réparties selon des rayons centrés sur un « hub » d'interconnexion, où peuvent être localisées les infrastructures de vie sociale.

Cette deuxième solution est probablement plus rationnelle en termes de communication.

En tout état de cause, à partir du moment où on prévoit un établissement de la colonie progressif, avec des moyens de construction (matériels et humains) d'ampleur contrainte, on est condamné à la mise en

⁷ EVA : Extra Vehicular Activity : activité à l'extérieur de l'enceinte du vaisseau (de l'habitat).

réseau d'un nombre important de modules de taille relativement limitée, et par voie de conséquence à un aménagement à base de « linéaires ». L'édification d'enceintes plus vastes, qu'il s'agisse de dômes ou de cylindres, présente de sérieuses difficultés de moyens, tant pour la fabrication des éléments que pour leur manutention et leur assemblage à l'air libre. Notons d'ailleurs que de telles structures présentent une faible efficacité, sous plusieurs aspects : coefficient d'occupation des volumes, quantité d'atmosphère à fournir, épaisseur des coques... Néanmoins, il faudra en prévoir un minimum si l'on veut éviter de donner à la colonie un aspect monotone, asocial et déprimant d'une suite de modules tous identiques. Les deux vues qui suivent sont représentatives de concepts publiés.



Projet Olivier Walter

un projet de base martienne développée (doc. O. Walter)



GRAPHIC BY GEORGI PETROV

(C)

embryon de colonie autarcique à 90 % étudié par la Mars Foundation (doc. Mars Foundation)

4. QUELQUES DONNÉES SUR LES BESOINS

Le projet d'installation le plus fouillé que nous avons pu examiner est celui de la Mars Foundation (*Mars Homestead Project*⁸). Même si l'échelle à laquelle il est décrit (une cinquantaine de résidents) est sans rapport avec celle de la colonie que nous envisageons ici, ce n'est déjà plus une simple base scientifique mais bien l'embryon de ce que pourrait être par exemple la colonie expérimentale évoquée dans l'exposé du contexte de la présente étude. En effet, il vise d'emblée une implantation réalisée le plus complètement possible avec les moyens locaux et une autarcie en fonctionnement de 90 % (en masse). Le faible nombre d'habitants résulte de l'hypothèse d'un flux de transfert interplanétaire (passagers et cargo) limité (12 passagers, 250 T de cargo par fenêtre de lancement) ; par contre, la conception permet une croissance régulière au fil des opportunités de tir successives. L'étude fournit d'intéressantes données techniques et chiffrées sur les infrastructures, les consommables, les énergies (électrique et thermique).

Des données sur les besoins en énergie et consommables sont également fournies dans d'autres études ; en particulier :

-dans le livre « *Cap sur Mars* » de R. Zubrin (Editions Goursau) : données de consommations journalières d'équipages d'exploration ;

-dans l'étude « *MERIT* » (STAIF 2005, Plus Ultra Technologies) : données relatives aux besoins d'une communauté de 1 000 personnes en orbite terrestre et à son soutien logistique supposé fourni par une colonie martienne ;

-dans l'ouvrage « *Strategies for Mars* » (American Astronautical Society, Sc.& Technologies Serie, vol. 86) ;

-dans le document de travail de Jean Dunglas « *L'Homme et ses écosystèmes dans l'Espace*, mars 2007, Prospective 2100).

De ces références et d'autres projets, on peut s'efforcer de tirer un bilan chiffré des principaux besoins, permettant de se faire une idée de l'ampleur des moyens à déployer pour le fonctionnement de la colonie de 2 000 habitants envisagée ici.

4.1. Trafic astronautique

Même en supposant qu'une majorité de colons aient décidé de s'établir définitivement sur leur nouveau monde, on peut raisonnablement tabler sur une durée moyenne du séjour plutôt de l'ordre de grandeur de la quinzaine d'années, certains des volontaires « sous contrat » ne restant que le temps permettant un retour économique (18 mois) ou optant pour une « durée de service » d'une douzaine d'années (supérieure aux durées de service lointain connues sur Terre, pour des raisons évidentes de coût du voyage). Cette hypothèse correspond à un flux entre la Terre et Mars (tous les 26 mois) en régime de croisière, de :

270 voyageurs par révolution synodique

A ce trafic propre au renouvellement des résidents s'ajoutera le flux résultant des activités de la colonie au profit de chantiers ou infrastructures dans le domaine circumterrestre ou sur des astéroïdes. La plupart des prestations martiennes concerneraient la livraison de fluides (eau, ergols, oxygène...), de semi-produits de construction de grandes structures spatiales ou d'aliments, qui ne nécessiteraient la présence que d'un nombre très restreint d'opérateurs. On peut par contre imaginer que les équipes travaillant sur des astéroïdes proviennent plus naturellement de la colonie martienne que de la Terre, compte tenu du gain d'énergie propulsive et de temps que cela représente. Mais ces équipes, opérant sur des chantiers fortement robotisés, seront de taille limitée, et leur flux étant désynchronisé avec le trafic « saisonnier » entre la Terre et la Planète rouge, on peut faire l'hypothèse que ce dernier restera dimensionnant en termes d'infrastructures astronautiques martiennes.

En ce qui concerne les missions cargo, le projet Mars Homestead, dans sa version de 2007, chiffre à 600 T le besoin en matériels terrestres pour établir le premier noyau de sa colonie. Ce tonnage doit

⁸ Site Web : www.marshome.org/

permettre, selon les auteurs, de doter ce noyau des machines, outillages, moyens de chantier et éléments structuraux non productibles in situ nécessaires à l'extension progressive de la base. La capacité de transfert cargo correspondante, disponible au début de la période d'établissement de la colonie, pourrait être augmentée si nécessaire en cours de programme, de façon à atteindre en fin de construction le volume

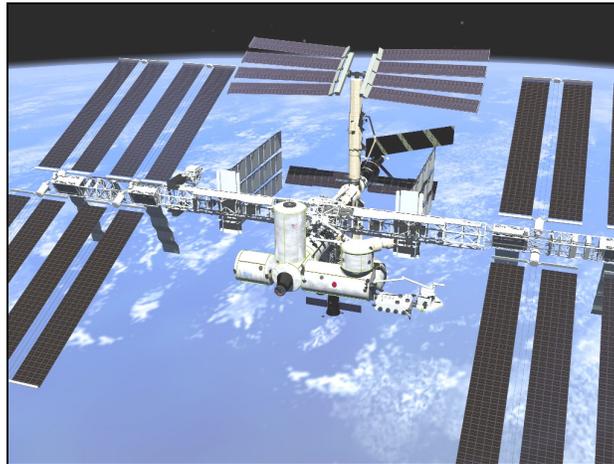
requis pour la vie et la maintenance de la colonie en régime de croisière. Mais des hypothèses cohérentes permettent de montrer que cela ne serait sans doute pas nécessaire.

En effet, en tablant sur une période d'installation d'**une vingtaine d'années**, la masse totale transportée sur Mars serait voisine de 6 000 T. En supposant un taux moyen de renouvellement annuel des matériels importés (rechanges et améliorations) de 5 %, la capacité de l'ordre de :

600 T par révolution synodique

correspond à un masse totale maintenable de 6 000 T ; or, une partie du tonnage transféré étant en fait constitué de renouvellements et de consommables, la masse utile accumulée sur la planète sera assez nettement moindre, mobilisant une capacité de transfert inférieure à 600 T. Par contre, plus la colonie grossira, plus les besoins en consommables d'origine terrestre croîtront.

4.2. Besoins en énergie



Station Spatiale : 80 kWe ayant nécessité l'installation de 8 panneaux de 70 m d'envergure (doc. NASA)

Dans l'espace, de façon générale, disposer d'une énergie abondante est capital. Les succès des missions spatiales menées jusqu'à présent ont pu masquer cette évidence, mais en réalité la plupart d'entre elles ont vu leurs capacités limitées, parfois sévèrement, par la faiblesse de la puissance disponible. Cela devient encore beaucoup plus vrai pour les missions habitées. Déjà, les énormes panneaux solaires de la Station Internationale démontrent l'importance que prend la génération de puissance dans un habitat spatial. Et les projets de base lunaire à l'étude à la NASA mettent en évidence le poids que cette fonction prend dans l'architecture d'ensemble.

Plus l'établissement planétaire verra ses domaines d'activité s'étendre et se diversifier, plus la demande d'énergie sera forte. Dans une colonie telle que nous l'envisageons, cette demande provient des fonctions suivantes :

- conditionnement des enceintes
- appareils domestiques, scientifiques et bureautiques
- production de fluides (eau, air, ergols pour vaisseaux et véhicules planétaires, utilitaires et industriels)
- production de matériaux de base, semi-produits, enceintes et réservoirs
- recyclage air, eau, déchets
- opérations de maintenance

-productions agricoles (serres, pisciculture...).

Une étude technique détaillée permettrait de chiffrer chacun de ces postes, en fonction du dimensionnement de la colonie et de ses productions de service et commerciales. Nous adopterons plutôt ici une approche tentant une synthèse de différentes sources bibliographiques, sauf pour les énergies à fournir aux habitats, pour la production des fluides et pour le fonctionnement des serres, qui seront estimées directement (cf. ci-dessous et, en ce qui concerne les fluides, le § 5.5).

Le projet Mars Homestead fournit des données en ce qui concerne le **traitement des minerais** (fours de séchage, broyeurs, traitements chimiques...), les **productions de matériaux** de construction et la **fabrication des semi-produits** (cf. § 5.6 et 5.7). Mais notre projet retenant un taux de croissance grosso modo 10 fois plus important (+200 colons par révolution synodique contre +18), il est a priori prudent de corriger d'un facteur 10 ces estimations ; on obtient :

- puissance électrique **3 MW_e** (moyennée sur un sol) ;
- puissance thermique **24 MW_{th}** (8 h/sol, soit 8 MW_{th} moyennée).

Fait remarquable, la majeure partie du besoin en énergie de la colonie apparaît sous forme thermique, non seulement au niveau des postes ci-dessus, mais également pour certains postes de production des fluides (extraction de l'eau par chauffage du sol) ou pour le chauffage des habitats. De nombreux procédés de production demandent de chauffer la matière première, comme par exemple la cuisson des briques, la déshydratation des minerais, le raffinage de l'acier ou de l'aluminium, la fabrication du verre, de céramiques, etc.). On constate que l'étude Homestead établit un rapport proche de 3 à 8 entre consommations d'énergie électrique et d'énergie thermique, mais en supposant possible de transporter de la chaleur à 1100°C entre les réacteurs nucléaires et l'ensemble des ateliers utilisateurs ! Ceci n'est certainement pas réaliste dans la plupart des cas.

En tout état de cause, l'imprécision sur cette estimation n'est pas essentielle, dans la mesure où on verra que ces valeurs restent faibles par rapport au besoin des serres (supposées éclairées artificiellement et chauffées) et comparables à chacun des postes de production des principaux fluides (eau, hydrogène oxygène, méthane, cf. § 5.5).

Nous trouvons également dans la littérature des **évaluations globales**, chiffrées en consommation d'énergie électrique par habitant d'une colonie. Mars Homestead donne **90 kWe/p** (au stade primitif de 12 résidents) ; on trouve, à l'échelle intermédiaire de 150 personnes, **45 kWe/p** (Yoshi Ishikawa, AAS 90-251) ; enfin, Martin Fogg évalue le besoin à **20 kWe/p** pour des projets beaucoup plus développés. La décroissance avec la taille paraît logique.

En ce qui concerne les cultures vivrières, nous ferons l'hypothèse de serres à éclairage artificiel (cf. § 5.4). En effet, cette solution est attractive pour une colonie d'effectif modeste, du fait de son meilleur rendement et de la protection antiradiations des plantations qu'elle permet de prévoir. Par contre elle conduit à un poste énergétique majeur ; pour 2000 colons : **100 MWe**.

Pour une véritable civilisation martienne, considérablement développée, l'option éclairage naturel devrait s'avérer plus intéressante, car il serait plus avantageux, en termes de masses importées depuis la Terre, d'édifier avec les matériaux locaux des serres plus grandes et plus nombreuses que de devoir transporter un très grand nombre de générateurs nucléaires.

A noter qu'indépendamment du fonctionnement logistique de la colonie, une part importante de la consommation d'énergie va dépendre du type d'activités « commerciales » qu'elle développera : si celles-ci sont tournées vers la recherche et les services en général, la puissance électrique demandée sera bien moindre que si l'activité principale consiste, par exemple, à extraire des métaux rares et à les expédier vers le domaine circumterrestre ! Le groupe de travail n'ayant pas souhaité s'attaquer à ce domaine prospectif vaste et spéculatif, **nous supposons que ces activités à caractère commercial resteront, par nature et en volume, compatibles avec les infrastructures développées pour l'établissement de la colonie, en particulier en matière de fourniture d'énergie.**

Compte tenu de ces différents facteurs : effet d'échelle, possibilité de fournir une partie du besoin en thermique et hypothèse conservatrice en ce qui concerne la consommation des activités « commercia-

les », nous proposons de retenir comme évaluation du besoin en énergie électrique, hors éclairage des serres, **30 kWe/colon**, valeur moyenne de la fourchette trouvée dans la littérature, sans retenir la valeur basse de 20 kWe/colon estimée par Martin Fogg. Ceci correspond donc pour la colonie à **60 MWe en continu**. Cette estimation sera validée lorsque les puissances nécessaires pour les activités de production (fluides, matériaux) auront été évaluées (cf. § 5). Avec cette valeur, on aboutit à un total général de :

160 MWe

4.3. Espaces pressurisés

Les espaces pressurisés comprendront :

- les espaces de vie privés (logements) ;
- les espaces de vie publics (lieux de rencontre, de réunion, de distraction, de shopping) ;
- les locaux administratifs et de bureaux, les laboratoires ;
- les installations médicales ;
- les ateliers de production, pour leurs parties nécessitant la présence de l'Homme ;
- les ateliers de maintenance - préparation des navettes orbitales et des véhicules de sorties planétaires (jeeps, rovers pressurisés) ;
- les salles de préparation des sorties extravéhiculaires (EVA) et les sas ;
- les serres vivrières (traitées dans le paragraphe suivant).

Pour ses grandioses cités orbitales artificielles, O'Neill prévoyait une densité de population de 200 habitants par hectare, soit **50 m² au sol / habitant**. C'est la densité rencontrée dans Paris intra muros. Il nous semble que cette valeur peut être conservée pour une colonie spatiale, même si son effectif n'est en rien comparable avec celui d'une métropole. Ici, cela représenterait :

10 hectares

Naturellement, le besoin en surface au sol n'est pas tout. En premier lieu, la valeur de 50 m² par habitant n'est à considérer que comme une moyenne. Tout comme nos citoyens, et peut-être encore davantage, les colons auront besoin d'espaces aérés, où ils pourront changer, pendant leurs périodes de détente, les perspectives de leur cadre de vie : patios, jardinets, fontaines, lieux communs de divertissement, de shopping, de rencontre. Le tout certes contraint par les dimensions limitées des enceintes et la surface au sol mesurée, mais aménagé le plus adroitement possible pour procurer variété, agrément, sensation d'apaisement, impression d'espace, proximité de la nature, terrestre (plantes, aquariums) et martienne (vues sur le paysage et le ciel).

4.4. Besoins nutritionnels

Nourrir les colons risque d'être une des fonctions les plus difficiles à assurer en totale autarcie, non seulement du fait du tonnage de nourriture à produire, mais aussi du fait des exigences nutritionnelles de l'organisme humain ; il s'agira de ne pas développer un « scorbut spatial » qui résulterait de carences mal identifiées ou mal couvertes.

Le besoin en masse est évalué, avec une assez bonne concordance selon les auteurs, à **1,8 kg/jour/personne, dont 0,6 à 0,7 kg de masse anhydre**.

Pour la population totale, cela représente donc :

3,6 T par jour (sol) de nourriture

dans son état naturel (non lyophilisé).

La question se pose de savoir si un régime purement végétarien est suffisant et souhaitable. Il apparaît possible d'offrir un éventail plus large, à l'aide de la pisciculture en particulier (cf. § 5.4).

4.5. Consommation de fluides

4.5.1. Pour les colons

Il existe également dans ce domaine des estimations en ce qui concerne les consommations des équipages spatiaux. On peut retenir :

-pour l'eau potable : 1,7 l pour la boisson, 0,8 l pour la préparation de la nourriture, soit un total de **2,5 l/jour/personne** ;

-pour l'eau domestique : **20 l/jour/personne**, même si des expériences, menées en particulier par la Mars Society dans sa base de simulation de l'Arctique, ont montré qu'il était possible de se restreindre à 4 à 5 litres ; mais ce qui est envisageable dans une mission spatiale de durée limitée n'est sans doute pas désirable pour le confort d'un colon ;

-pour l'oxygène respirable : **0,8 kg/j/personne**.

Ces consommations quotidiennes doivent être corrigées des taux de recyclage pour conduire aux besoins globaux :

-pour l'eau, on suppose un taux de recyclage moyen de 90 %, ce qui sera certainement atteignable à l'époque et conduit à un apport de **4,5 T/j** (pour un débit total de 45 T/j) ;

-pour l'oxygène, avec un taux de 80 %, on obtient **0,3 T/j**.

En matière d'**air respirable** (mélange 240 hPa O₂, 100 hPa N₂), les besoins résultent :

-de la **compensation des fuites** des enceintes et de leurs interconnexions ; on verra (§ 5.3) que celles-ci devraient représenter un volume de l'ordre de 300 000 m³, serres non comprises, soit 100 T sous 340 hPa ; même un de taux de fuite de 5 % par an⁹ ne représenterait qu'une production annuelle d'oxygène et d'azote de remplacement s'exprimant en tonnes seulement, donc commensurables avec les besoins durant l'édification et, concernant l'oxygène, sans commune mesure avec les besoins pour la propulsion (des fusées et des véhicules planétaires) ;

-des **déperditions liées au fonctionnement des sas** lors des sorties « à l'air libre » : il est probable que, pour économiser l'oxygène et - surtout - l'azote, on évitera de dépressuriser les sas directement à l'extérieur ; des pompes seront chargées au moins de réduire le niveau de pression d'un facteur 10 (34 hPa), mais sans doute pas en allant jusqu'à la pression extérieure (7 hPa) pour limiter le dimensionnement des pompes et la durée de l'opération. Les sorties individuelles (en scaphandre) seront relativement peu fréquentes et les sas correspondants de petites dimensions. On accédera aux véhicules pressurisés par des conduits, sans passer par un sas. En fin de compte, les opérations de dépressurisation - repressurisation largement les plus significatives risquent d'être celles attachées aux entrées et sorties des véhicules spatiaux des halls de maintenance et de préparation. Une rapide évaluation permet néanmoins de vérifier que, même avec une vidange à l'air libre d'un reliquat de 10 % (34 hPa), la consommation n'atteindra pas l'ordre de grandeur considérés pour les pertes dues aux fuites.

4.5.2. Pour les serres

L'atmosphère des serres contiendra surtout de l'azote, de l'oxygène qui, du fait de la photosynthèse, n'aurait pas à être compensée par des apports et du gaz carbonique. Surface, volume et taux de fuites des enceintes de serre étant du même ordre de grandeur que pour les enceintes habitées, les consommations d'azote seront très limitées.

En ce qui concerne l'irrigation des cultures, on peut faire l'hypothèse qu'elle est assurée par les eaux usées des colons (l'eau accomplirait une boucle globale : usage humain => traitement pour irrigation => usage agricole => traitement final pour usage humain => réutilisation).

En effet, le débit journalier pour les besoins humains, évalué à 45 000 litres, correspond, pour une production quotidienne totale d'aliments (état naturel) de 1,8 kg x 2 000, à un apport en eau de **12,5 l/kg** d'aliments (*auquel correspond, pour une surface cultivée totale évaluée à 6 ha (cf. § 5.4), une irrigation de 0,75 litre/m² de culture/jour*).

⁹ Les fuites constatées sur Biosphère 2 étaient de 3 % / an.

En termes de besoin, la littérature¹⁰ indique, pour la culture des tomates, hydroponique, en serre chauffée¹¹ et en circuit fermé, un apport pouvant être réduit à 15 l/kg. Sachant que la tomate présente un rendement d'irrigation assez moyen (1000 l/kg de matière sèche en plein champ, contre 500 pour la pomme de terre), nous prendrons comme apport nécessaire une valeur moyenne entre ces deux cultures, soit un besoin d'un peu plus de 11 l/kg, en bonne concordance avec la capacité de 12,5 l/kg considérée (une déperdition de 10 % reste permise).

4.5.3. Pour la propulsion (spatiale et planétaire)

A partir des hypothèses de trafic retenues au § 4.1 et de la façon de l'assurer entre l'orbite martienne et la surface de la planète au moyen de navettes orbitales (cf. § 5.1.1), on peut estimer les besoins en propergol correspondant, au prix d'un dimensionnement sommaire de ces vaisseaux. Avec, pour la version cargo, une charge utile de 50 T en descente et de 10 T en montée, on aboutit au besoin suivant par rotation : 50 T de propergol H₂/O₂ en montée, 17,5 T de propergol CH₄/O₂ en descente¹². A raison de 25 vols par an (cf. § 5.1.1), et en prenant forfaitairement une marge de 10 % pour déperditions dans les opérations d'avitaillement (33 % pour H₂), on obtient pour les vols spatiaux, en valeurs arrondies, un besoin par année (terrestre)¹³ de :

220 T d'hydrogène liquide,
100 T de méthane liquide,
1 400 T d'oxygène liquide

Les véhicules de transport planétaires (essentiellement une dizaine de rovers pressurisés et quelques dizaines de jeeps, cf. 5.1.2), et, surtout, les engins employés au minage sur des sites éloignés (foreuses, scrapeurs, pelles mécaniques, camions) consommeront de l'énergie électrique fournie par des piles à combustible (ou des générateurs à moteur à combustion) fonctionnant au couple CH₄/O₂ (le méthanol pourrait être préféré). Il est plus difficile d'évaluer la consommation que cela représentera. En se fondant sur les évaluations du § 5.1.2 pour ce qui concerne le parc de véhicules :

Type	Puissance unitaire (CV)	Nb actifs / Site	Nb Sites	Puissance installée (CV)	Taux d'emploi ¹⁴	Puissance consommée (CV)
Engins	500	1	4	2 000	25 %	500
Camions	200	2	4	1 600	25 %	400
Rovers	100	10	1	1 000	10 %	100
Jeeps	20	50	1	1 000	10 %	100
				Puissance totale (CV)		1 100

En supposant que les moteurs (à combustion interne ou électriques, alimentés par des piles à combustible oxygène méthane) fonctionnent avec un rendement global de 25 %, et en prenant une puissance calorifique du CH₄ de 48 MJ/kg de méthane, on en déduit un besoin par sol de :

Soit, par année terrestre, environ :

2 100 T de méthane liquide
8 400 T d'oxygène liquide

¹⁰ Document du Centre technique interprofessionnel des Fruits et Légumes (CtiFL), septembre 2005.

¹¹ Fonctionnant avec un taux d'humidité optimal, 70 %, qui réduit la transpiration des plantes et donc le besoin en irrigation.

¹² Le choix du méthane pour la descente, de préférence à l'hydrogène, serait permis par le faible ΔV à assurer pour la déorbitation, le freinage final et l'approche finale (~800 m/s) ; il simplifierait le management des ergols pendant la phase orbitale de la mission.

¹³ La révolution synodique étant de 26 mois, le besoin pour un an est le 12/26^{ème} du besoin d'une révolution.

¹⁴ Puissance moyenne de fonctionnement sur une journée, par rapport à la puissance unitaire (maximale).

On constate que les besoins de motorisation planétaire, provenant essentiellement des engins de chantier de construction et de minage, prédominent largement par rapport aux besoins liés au trafic astronautique. Naturellement, ces tonnages sont très dépendants du niveau d'exploitation des ressources et des estimations ci-dessus concernant la puissance moyenne consommée par les engins correspondants. Mais en tout état de cause, c'est un poste déterminant en matière de capacités à installer.

Nota : le méthane étant obtenu à partir de gaz carbonique et d'hydrogène, par le processus de Sabatier (cf. § 5.5.4), dans le rapport de 1 kg d'hydrogène pour 4 kg de méthane, le total de 2200 T nécessite à la base la production supplémentaire de 550 T / an d'hydrogène.

4.5.4. Pour les productions

En-dehors de la production de propergols, les deux fluides suivants seront principalement utilisés pour la production de plastiques et pour la sidérurgie :

-**le gaz carbonique** : c'est la ressource la plus facile à capter, puisqu'elle constitue 93 % de l'atmosphère ;

-**l'hydrogène** : pour la production de plastique (polyéthylène par exemple).

Comme nous supposons les productions limitées aux besoins résultant de la phase de construction de la colonie (pas de production exportée), les quantités d'hydrogène à produire, difficiles à évaluer, resteront faibles par rapport à ce que nécessitera la synthèse du méthane pour la motorisation.

4.6. Récapitulation des principaux besoins

Il est évident qu'en l'absence d'études détaillées du fonctionnement de la colonie et de la conception de ses équipements, les évaluations de besoins qui précèdent restent très incertaines et, pour beaucoup, fortement dépendantes d'hypothèses discutables. Néanmoins, elles permettront de visualiser un ordre de grandeur des moyens qui seraient à mettre en œuvre pour assurer le fonctionnement d'une colonie de 2 000 résidents telle qu'envisagée ici.

Ces besoins se résument ainsi :

Trafic interplanétaire passagers	270	pass. / révolution synodique (26 mois)
Trafic interplanétaire cargo	600	T / révolution synodique
Puissance électrique installée	160	MW (serres en éclairage artificiel)
Surface d'espaces habitables	10	ha
Nourriture	3,6	T / sol (en état prêt à consommer)
Eau (habitants et serres)	4,5	T / sol (recyclage à 90 %)
Eau (pour la production H ₂ /O ₂) : de	19,5	T / sol (6950 T/an)
à	31,6	T / sol (1150 T/an) *
Oxygène (principalement liquide)	28	T / sol (10 000 T/an)
Hydrogène	2,2	T / sol (770 T/an)
Méthane	6,2	T / sol (220 T/an)

*selon procédé : l'oxygène peut être obtenue par électrolyse, et/ou par décomposition thermique du gaz carbonique atmosphérique (cf. § 5.3)

5. COMMENT ASSURER LES FONCTIONS DE LA COLONIE ?

5.1. Moyens et infrastructures de transport – Moyens de communication

5.1.1 Trafic spatial (passagers et cargo)

Plusieurs raisons conduisent à imaginer que ces trafics feront tous étape en orbite martienne (probablement fortement elliptique et aréosynchrone) et que **l'astroport de la colonie ne verra jamais atterrir et décoller les vaisseaux interplanétaires, mais des navettes cargo et passager** faisant l'aller retour entre la base et l'orbite de parking de ces vaisseaux.



concept d'atterrisseur à corps porteur (doc. ESA/N. Frischauf)

En effet :

- les vaisseaux interplanétaires seront massifs et de très grande taille (radiateurs des générateurs électronucléaires ou panneaux des générateurs solaires), et de plus dotés de propulseurs électriques à très forte impulsion spécifique mais d'une poussée ridiculement faible ; ils seront pour ces raisons totalement inaptes à une entrée atmosphérique et à un décollage planétaire ;

- leur charge utile importante, en version cargo (150 T)¹⁵ poserait un problème de coefficient balistique (taille du bouclier) lors d'un freinage atmosphérique ; si l'on veut que les protections thermiques soient réutilisables pratiquement sans maintenance, il est nécessaire de limiter fortement le flux thermique, et donc de fractionner la charge utile en « lots » de masse inférieure (50 T) ;

- la propulsion de ces engins sera aisée à assurer dans d'excellentes conditions de coût opérationnel et de fiabilité, compte tenu de la modicité du ΔV requis (3,7 km/s, pertes comprises, pour une orbite à 300 km) ; des moteurs O_2/H_2 peu poussés (et O_2/CH_4 pour la descente) conviendront ; ils présenteront l'avantage de pouvoir être alimentés en ergols produits sur place, à partir de l'eau du sol et du gaz carbonique atmosphérique (pour CH_4).

Le trafic imaginé avec l'espace circumterrestre (cf. § 4.1) devrait correspondre à environ 25 vols de ces navettes orbitales par révolution synodique, en supposant la charge utile égale à 50 T en descente et à 10 T en montée (resp. 25 passagers dans les deux sens pour les « taxis »). Si on estime que le trafic « commercial » à destination de chantiers spatiaux ou « logistique » à destination de stations orbitales martiennes représente un volume équivalent, on obtient un total de **50 vols tous les 26 mois**. On peut donc imaginer l'astroport de la colonie dédié au service d'une flottille (**une douzaine ?**) de na-

¹⁵ Il n'est pas déraisonnable d'imaginer que les vaisseaux cargos de l'époque (à propulsion électrique de forte puissance) atteignent une capacité de 150 T ; le flux de 600 T correspondrait donc à une flottille de 4 vaisseaux navettes (tous les 26 mois). Notons que les missions d'exploration actuellement envisagées prévoient d'ores et déjà, par fenêtre de lancement, l'envoi d'au moins 3 fois 50 T.

vettes orbitales à large corps portant, en deux versions : cargo et passagers. Compte tenu de la faible densité de l'atmosphère, ces véhicules seront nécessairement à décollage et atterrissage verticaux et propulsés, ce qui dispense de construire (et maintenir) une longue piste, mais oblige à prévoir :

-des **aires d'atterrissage** soigneusement consolidées (cimentées) ;

-des **pas de tir** avec déflecteur de jet pour les décollages.

Le convoi entre ces lieux et des hangars de maintenance - préparation pressurisés, suffisamment éloignés (1 à 2 km) pour des raisons de sécurité, devra être assuré par **des véhicules porteurs** roulant sur une piste également consolidée. L'avitaillement en ergols cryogéniques conduit à prévoir **des réservoirs « pied de banc » qui seront alimentés par des camions ravitailleurs** faisant la navette avec le centre de production de fluides de la colonie.

L'ensemble constituera donc une emprise étendue, avec un réseau de pistes à maintenir en état de propreté.

(nota bene : la maîtrise de la propulsion électrique de très forte puissance permettra de réduire la durée d'un transfert à 3 mois et l'aller-retour à 7 mois, incluant un séjour d'un mois sur la planète).

5.1.2. Trafic planétaire

A la surface de la planète, les colons devront disposer de différentes classes de véhicules :

-des **jeeps** non pressurisées et très rustiques pour les déplacements dans l'emprise de la colonie et à son voisinage immédiat (retour à pied possible) ; leur structure devrait être productible sur place ; quelques dizaines devraient suffire, les EVA (sorties en scaphandre) devant rester l'exception ;

-des **rovers pressurisés** (mobiles homes) pour les déplacements plus lointains (jusqu'à 500 km), soit vers des sites annexes de la colonie : stations scientifiques, lieux d'extraction de minerais, de sels minéraux, d'eau liquide éventuellement (puits artésiens) ; chaque véhicule pourrait avoir une masse de 10 T et emporter une dizaine de colons ; une petite dizaine devraient suffire, même avec un taux de disponibilité limité à 50 % ;

-quelques « **hoppers** », véhicules fusées suborbitaux permettant d'atteindre rapidement d'autres sites plus éloignés, dédiés à la recherche scientifique (base secondaire) ou à la prospection de ressources ;

-quelques **drones** : ce mode de déplacement à longue distance présente l'avantage d'être simple et relativement facile de mise en œuvre ; mais, selon leur taille, ils peuvent nécessiter de véritables pistes d'envol, compte tenu de la faible densité de l'atmosphère ; il est donc peu vraisemblable que l'on aille jusqu'à déployer sur Mars des avions capables d'emporter des (un) passager.



R. Zubrin présente le démonstrateur de drone martien à CO₂ comprimé développé par sa société, Pioneer Astronautics (doc. TMS)

A ces véhicules d'usage général s'ajouteront les engins de transport et de manutention propres aux chantiers de construction et aux opérations de minage.

5.1.3. Moyens de communication

La colonie devra disposer de moyens de communication :

- avec la Terre et les autres implantations spatiales (la Lune, astéroïdes) ;
- entre les différentes installations et les mobiles à la surface de la planète.

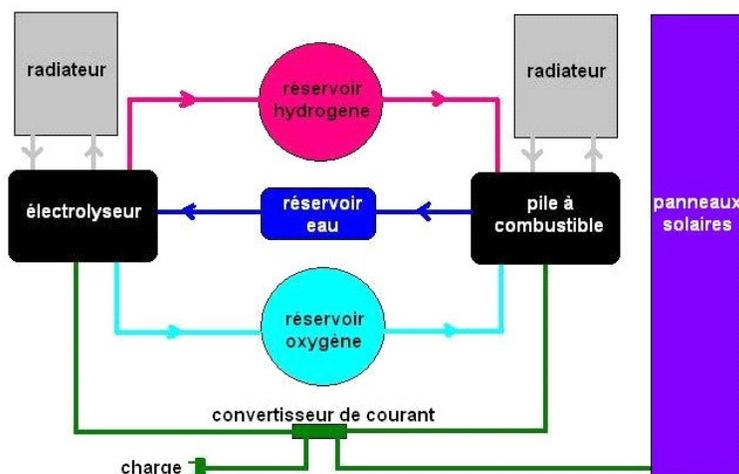
La présence de plusieurs satellites relais est nécessaire pour assurer la continuité des communications spatiales, compte tenu de la rotation de la planète. Les transmissions entre ces satellites (aréostationnaires) et la Terre (ou les autres destinations spatiales) auront probablement recours aux techniques de transmission laser, qui permettront de surmonter le handicap des distances de transmission considérables. Entre la surface et ces satellites, les ondes radio pourront continuer à être utilisées, le développement épisodique des tempêtes de poussière interdisant en tout état de cause d'avoir recours au laser.

La communication de surface, entre la colonie, ses sites auxiliaires (mines, stations scientifiques), les véhicules et les résidents en EVA, présente des difficultés spécifiques liées d'une part à la rotondité de la planète (l'horizon est plus proche), d'autre part à l'absence d'ionosphère, deux facteurs limitant la portée des moyens radio traditionnels. Là aussi, le recours aux moyens satellitaires (stationnaires ou, peut-être, à défilement) sera nécessaire.

La mise en place de ces moyens ne présentera pas de difficultés particulières.

5.2. Génération et distribution d'énergie

Au § 2.3 nous avons indiqué les différentes sources d'énergie in situ envisageables : solaire, aréothermique et éolienne (en théorie). En réalité, c'est une quatrième forme de génération de puissance électrique (et thermique) qui continuera de s'imposer à ce stade du développement de la présence humaine sur la planète : l'énergie nucléaire de fission.



complexe système de génération d'énergie solaire - un système de stockage par électrolyse (doc.R. Heidmann)

L'option solaire, a priori séduisante par sa simplicité, sa fiabilité et sa sécurité environnementale, présente de sérieux handicaps :

-l'éclairement moyen deux fois plus faible qu'au niveau de la Terre, conjugué à l'impossibilité pratique de tabler sur des panneaux orientables au niveau de puissance requis (160 MWe en moyenne sur la journée complète) conduisent à des surfaces de panneaux photovoltaïques immenses ; en effet la production sur une journée ne représenterait qu'une puissance moyenne de 60 W/m² (avec un rendement de 33 % et des panneaux fixes) ; pour obtenir 160 MW, c'est donc 270 ha (un carré de 1,6 km de côté) qu'il faudrait être capable de couvrir de panneaux...

-le cycle diurne, bien qu'infiniment moins pénalisant que sur la Lune (où il dure 28 jours) oblige à disposer de moyens de stockage pour les besoins en période de nuit ou d'enseuillement marginal (matinée et soirée) ; les batteries sont lourdes (peut-être productibles in situ ?), le stockage par

électrolyse de l'eau est envisageable mais son rendement n'est pas bon, le stockage par pompage dans des réservoirs hydrauliques présentent des problèmes de choix du site : présence d'un fort dénivelé (pesanteur réduite) et d'ambiance thermique (gel de l'eau) qui rendent ce procédé illusoire ;

-la poussière martienne oblige à prévoir un système robotisé de dépoussiérage périodique et, surtout, oblige à prendre en compte la récurrence de tempêtes de poussière durables (typiquement 1 mois), généralement une fois par année martienne, au cours desquelles la lumière reçue peut être réduite à quelques pourcents de la normale seulement ! Ce dernier point semble rédhibitoire.

A vrai dire, il existe une option solaire plus futuriste, qui consisterait à construire des **stations photovoltaïques orbitales aréostationnaires** (à partir des matériaux extraits des satellites de Mars) et à retransmettre l'énergie au sol par laser ou micro-ondes. C'est une solution à ne pas exclure, mais qui conduirait quand même à des surfaces de l'ordre du km²... La solution d'avenir ?

La solution aréothermique est à notre avis la plus prometteuse pour l'avenir, du moins si l'hypothèse de vastes poches d'eau souterraines devait se confirmer. Elle requiert évidemment la capacité de forage à de grandes profondeurs (1 à plusieurs km) mais sa mise en œuvre est relativement simple, les infrastructures sont de masse et d'étendue limitée et elle évite les problèmes du nucléaire. Nous ne la retiendrons néanmoins pas dans cette étude, du fait de l'incertitude où nous sommes concernant l'existence et l'étendue des ressources exploitables. Notons également qu'il si on veut éviter l'installation de lignes haute tension, le recours à cette source d'énergie contraindrait fortement le choix du site de la colonie.

L'option éolienne a déjà été réfutée au § 2.3 et n'est donc citée que pour mémoire.

Le générateur à fission nucléaire constitue d'ores et déjà la solution privilégiée pour les premières bases d'exploration temporaires ou permanentes, que ce soit sur la Lune ou sur Mars. La raison principale est que, pour la gamme de puissance requise, c'est la solution la plus compacte et la moins complexe à déployer. Les projets à l'étude montrent qu'un tel générateur, délivrant en continu 40 kWe, aurait une masse de moins de 5 T tout compris et un encombrement en configuration de transfert limité à 7m x 3,3m. Son encombrement en configuration déployée au sol est beaucoup plus impressionnant, du fait de la taille du radiateur (source froide), dont la température n'est que de 400 K, les concepteurs ayant souhaité utiliser pour le cœur des technologies éprouvées et garantir la durée de vie des matériaux par une température modérée (900 K). Sa durée de vie serait de l'ordre de 10 ans. Il est évident qu'un tel modèle, adapté aux projets d'exploration actuels, ne conviendrait pas pour un besoin de 160 MWe.

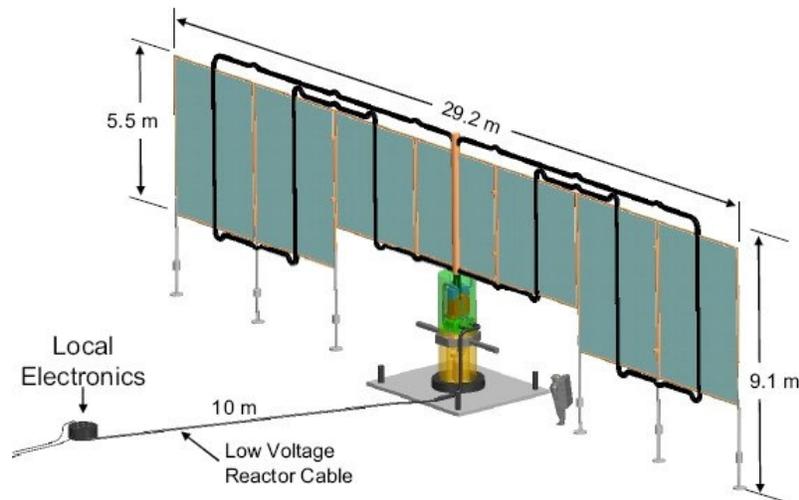
Le changement d'échelle ne remet cependant pas en cause le principe. En effet, rien n'empêche de demander au cœur nucléaire, sans accroître ses dimensions ni sa charge en combustible, de fonctionner à plus grande puissance et de céder au fluide thermodynamique des puissances thermiques bien plus importantes et à plus haute température¹⁶. En réalité, ce sont les dimensions de la source froide - radiateur ou échangeur de chaleur¹⁷ - qui vont limiter la puissance unitaire extractible du générateur.

Si on s'en tient à la solution du **radiateur**, l'impératif est d'augmenter sa température (capacité de rayonnement en T⁴), et donc la température devant turbine du turboalternateur. En la portant de 400 à 1 270 K (**1 000°C**), avec une **température devant turbine de 1 800 K**, on multiplie sa capacité d'évacuation par 100. En multipliant sa surface par 2, par exemple en disposant **4 panneaux de 15 m** de long en croix, on atteint une puissance de **8 MWe** (en réalité moins, car la chute de température du cycle étant moins marquée, son rendement thermodynamique est dégradé ; les dimensions du radiateur devront donc être légèrement accrues).

La **durée de vie**, sans avoir à intervenir sur la charge de combustible, devra aussi être augmentée, à **20 ou 25 ans**, de façon à ce que le cycle de renouvellement soit homogène avec la durée d'implantation de la colonie (supposé de 20 ans).

¹⁶ Le moteur fusée nucléaire expérimental NERVA est allé jusqu'à délivrer 4 000 MWth en fonctionnement, l'équivalent de plus de 4 tranches nucléaires, pour un diamètre de réacteur de l'ordre d'un mètre !

¹⁷ Contrairement aux installations terrestres, on ne dispose pas sur Mars, en tant que source froide, de fleuves ou de bords de mer. Utiliser le sol obligerait à de difficiles terrassements. Et l'atmosphère est trop ténue pour être utilisée (bien que des projets aient proposé un procédé de convection forcée par des ventilateurs).



projet NASA de générateur planétaire nucléaire de 40 kWe (doc. NASA)

Nous avons relevé que la majeure partie du besoin en énergie de la colonie se manifestait **sous forme thermique**. Il est donc tentant d'utiliser la chaleur dissipée par les générateurs nucléaires, plutôt que de la dissiper par rayonnement. Cependant, la température requise par certains des procédés utilisateurs est élevée (exemple : la production d'oxygène par décomposition du CO_2 : $1\ 100^\circ\text{C}$) ; si faire fonctionner un échangeur de chaleur à de telles températures est à la limite envisageable - au prix d'infrastructures de masse importante - le problème est celui du transport par fluide caloporteur. Les conduites haute température ne seraient pas fabricables in situ et il devient indispensable de localiser à proximité immédiate des générateurs les installations consommatrices. De plus, si on utilise des échangeurs de chaleur plutôt que des radiateurs, on préférera, pour augmenter le rendement du cycle thermodynamique, abaisser la température de la source froide.

L'utilisation des calories serait donc limitée aux procédés les moins exigeants en termes de température : chauffage des bâtiments et des serres, bien entendu, mais aussi mobilisation de l'eau à partir du sol gelé, et tous procédés nécessitant des opérations de séchage ou des enceintes réactives en température : déshydratation des minerais bruts, cuisson / séchage des briques, séchage de la chaux, différentes parties des procédés de production d'acier, d'aluminium, de fibre de verre, etc. A basse température, le transport sur de longues distances - aller et retour ! - est relativement faisable (par exemple sous forme d'eau chaude), même si cela impose de « tirer » des canalisations isothermes de distribution entre les générateurs électronucléaires et les différentes enceintes de la colonie. Il est donc envisageable d'assurer le chauffage des locaux (habitats et serres) de cette façon.

La possibilité d'utiliser directement de l'énergie thermique valorise l'option nucléaire. Le choix de la température de sortie des échangeurs dépendra de l'inventaire de ces procédés. L'étude Homestead aboutit à un rapport de 8 à 3 entre la consommation d'énergie thermique et d'énergie électrique. Par contre, cela imposerait d'implanter les fours et enceintes de traitement à proximité immédiate des générateurs. C'est ce que se propose le projet Homestead, au prix d'un enfouissement des réacteurs sous des écrans anti-radiations de régolite (plusieurs mètres d'épaisseur). La proximité de réacteurs ainsi masqués ne pose pas de problème en soi, sauf en cas d'intervention de maintenance et pour le démantèlement, qui nécessiteront de dégager la couche de régolite.

Pour l'établissement progressif de la colonie, l'idéal serait de délivrer à chacun des transferts une « tranche » supplémentaire. Chacune de ces tranches devrait donc produire 16 MWe, ce qui correspond à **deux générateurs de 8 MWe, pour une masse totale d'une douzaine de tonnes**. Notons que les radiateurs pourraient probablement être produits in situ (à condition d'accepter qu'ils soient plus lourds et de technologie moins avancée que des radiateurs spatiaux).

La technologie présente par contre un certain nombre d'inconvénients :

-elle devra être acceptée politiquement, à une époque où l'utilisation de la fission, peut-être supplantée par la fusion¹⁸, risquera de faire figure de technique archaïque ; d'un autre côté, on pourra arguer que les risques éventuels seraient uniquement l'affaire des « martiens » ;

-même si les cœurs fonctionnent à faible niveau, ils finissent par s'épuiser et leurs matériaux par vieillir ; il faut donc prévoir un renouvellement par de nouveaux générateurs venant de la Terre ;

-il faut aussi envisager la possibilité à terme d'un démantèlement et, en attendant, accepter de protéger leur zone d'implantation ; à la longue, si la colonie est appelée à se développer, cette solution ne serait plus admissible et il faudrait se tourner soit vers des centrales beaucoup plus puissantes, soit vers d'hypothétiques générateurs à fusion (?), soit vers des stations solaires orbitales géantes ;

-dans le but d'éviter de longues lignes de transport d'énergie électrique et de fluide caloporteur, les générateurs devront être implantés à proximité immédiate des installations utilisatrices, elles-mêmes pour la plupart parties intégrantes de la colonie pour des questions d'accessibilité (tout doit communiquer) ; de nouveaux aspects sécuritaires seront donc à prendre en compte, ceci d'autant plus que, contrairement aux centrales terrestres, on n'enfermera pas les réacteurs dans des enceintes de confinement massives, difficiles à produire in situ.

En conclusion, pour la production d'énergie, si le solaire est envisageable, au moins comme option d'appoint et de secours, la véritable solution pour une colonie est bien, sur la base de ce que l'on maîtrise à ce jour et compte tenu du niveau des besoins, la fission nucléaire.

En ce qui concerne **la distribution d'énergie électrique**, l'étude Homestead préconise un réseau primaire triphasé 480 V (pour limiter les pertes en ligne) et un réseau secondaire monophasé 120 ou 240 V. Le câblage devra être redondant pour éviter les points de défaillance unique, et rendu particulièrement accessible, impérativement de l'intérieur des enceintes, pour les interventions de maintenance.

5.3. Espaces pressurisés

Si l'on imagine des enceintes modulaires cylindriques de 5 m de diamètre et de 20 m de long, la surface totale requise de 10 ha équivaldrait à un total de 1 000 modules, conduisant, pour une durée d'implantation de 20 ans, au rythme de production d'un nouveau module (entièrement équipé !) par semaine. Un rythme certes industriel, mais qui n'apparaît pas extravagant par rapport à l'ensemble des données du projet. A noter que le volume correspondant, pour des enceintes cylindriques, serait de l'ordre de grandeur de 300 000 m³, représentant, à 340 hPa, une masse d'air aisément productible sur 20 ans (environ 100 T) et maintenable même avec des taux de pertes significatifs (5 % par an).

Ces modules seront recouverts de régolite. Mais, pour certains d'entre eux du moins, un dispositif d'éclairage indirect (puits de lumière avec miroir) procurera une ouverture sur l'extérieur bénéfique pour le confort psychologique des habitants.

Malgré les difficultés présentées par l'édification d'espaces pressurisés nettement plus importants que les modules cylindriques standards envisagés, il est difficile d'imaginer une colonie uniquement constituée de ce type d'espaces ; l'effort nécessaire sera consenti pour aménager un nombre restreint d'espaces communs, constitués soit de dômes transparents, soit de galeries voûtées en briques ou en ciment (comme dans le projet Mars Homestead). Des dômes sphériques ou lenticulaires en plastique, gonflables et d'une trentaine de mètres de diamètre sont imaginables ; ils permettraient d'aménager des espaces conviviaux variés, certes moins protégés des radiations mais où les habitants ne séjourneraient de toute manière qu'épisodiquement. Les voûtes en briques posent de sérieux problèmes de chantiers à l'air libre et coûteux en main-d'œuvre, mais le résultat est séduisant.

En fin de compte, nous nous proposons de retenir comme hypothèse le panachage suivant :

700 modules cylindriques de 100 m²

30 espaces communs (dômes, galeries voûtées) de 1 000 m²

¹⁸ Au siècle prochain, l'humanité pourrait avoir maîtrisé la fusion. Mais, sauf découverte révolutionnaire, dont certains caressent l'espoir (fusion froide, fusion inertielle électrostatique...), les centrales à fusion resteront des monstres non transposables à une échelle transportable de la Terre à Mars !

Les ateliers seront répartis, selon l'encombrement de leurs moyens, entre ces deux types d'espace.



GRAPHIC BY PHIL SMITH
 espace troglodyte voûté du projet Mars Homestead (doc. Mars Foundation/P. Smith)

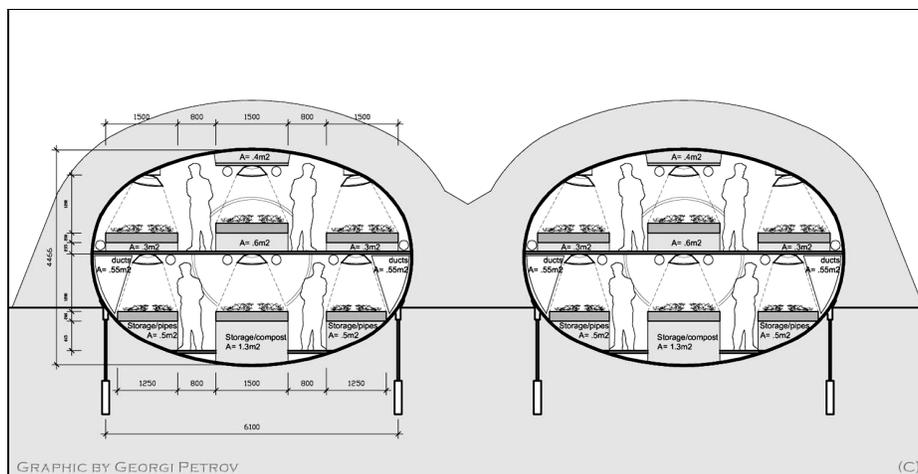
5.4. Production alimentaire

La production de 0,7 kg/jour (en équivalent anhydre) requerrait 60 m² de cultures sous serre, en condition d'éclairage naturel, soit : 12 hectares de serres pour la colonie. Le recours à l'éclairage artificiel et à la culture hors sol permet de réduire considérablement la surface à cultiver et l'emprise au sol, mais aux dépens d'une consommation d'énergie importante. C. Rahaim (STAIF 2008) cite ainsi, pour un projet de serre nutritionnelle pour un équipage de 6 astronautes, à éclairage artificiel, les valeurs suivantes (par personne) : surface cultivée : 32 m² (sur une emprise de 25 m² dans sa conception d'implantation des cultures) ; puissance électrique : près de 50 kWe. Pour 2 000 résidents, on obtient ainsi une surface cultivée de **6 hectares**, ce qui pourrait correspondre, compte tenu d'un aménagement en clayettes, à une surface au sol de serres pressurisés d'environ :

4 hectares

mais au prix d'une puissance d'éclairage de :

100 MWe



exemple d'aménagement de serres couvertes (doc. MarsFoundation)

Cela revient à presque tripler la consommation de la colonie, sauf à supposer qu'on alimente en alternance sur la journée l'éclairage des serres et l'alimentation des unités de production de fluides et matériaux (mais il faut alors doubler la surface cultivée). Il faut aussi se représenter l'infrastructure que représentent ces surfaces, en matériels aussi divers que circuits d'eau, électricité, éclairage (milliers de lampes), etc.

Il y aurait lieu de faire un bilan détaillé de la masse totale à importer de la Terre pour chacune de ces deux solutions.

Il est possible de réduire considérablement la pression atmosphérique des serres, les plantes pouvant se contenter de **50 à 90 hPa, dont 20 à 60 de N₂, 20 de O₂, 6 de vapeur d'eau, moins de 1 de CO₂** ; mais il est préférable d'enrichir en CO₂ (de près de 100 % par rapport à la Terre) pour augmenter les rendements (avec juste ce qu'il faut d'O₂). Bien sûr, cette faible pression impose de revêtir une combinaison spatiale pour travailler dans les serres. Malgré la quantité de gaz atmosphériques plus importante à fournir, une pression identique à celle des modules habités (p.m. 340 hPa) sera peut-être préférée ; ce choix permettrait de pénétrer dans les serres sans scaphandre, un respirateur restant néanmoins nécessaire du fait de la composition atmosphérique différente. En tout état de cause, il faudra prévoir une robotisation très poussée des soins à apporter aux cultures, du fait des surfaces importantes concernées et du souci de dégager le potentiel humain de tâches extensives automatisables. Pour les serres terrestres, on compte une personne pour 40 m² ; les 60 000 m² de surface cultivée considérée ici correspondrait donc, si on conservait le même ratio, à 1 500 colons...

Le besoin en circulation d'eau d'irrigation est discuté plus loin (cf.§ 5.5.1) ; il dépend naturellement du mode de culture retenu (plein sol ou hydroponique), mais aussi des espèces cultivées et des conditions climatiques maintenues dans la serre (taux d'humidité en particulier).

Le sol martien semble contenir, comme l'ont montré les analyses fines de la sonde Phoenix, la plupart des nutriments nécessaires, à l'exception de matières organiques. Celles-ci seront procurées en majeure partie par le recyclage des déchets organiques de la communauté (humaine et éventuellement animale). Il sera sans doute souhaité d'amender les sols par des engrais azotés. Ceux-ci pourront être produits par synthèse, à partir de l'azote extrait de l'atmosphère.

En cas de culture sur sol, celui-ci devra être préalablement « lavé » pour le débarrasser de sa charge en sels (abondants sur Mars) et des peroxydes qu'il contient.

Yoshi Ishikawa et al. (AAS 90-251) donnent un exemple de répartition des surfaces de cultures :

blé	40 %
riz	26 %
pommes de terre	16 %
fraises	6 %
laitues, tomates, haricots, oignons	3 % chacune

(à noter cependant que le riz présente une mauvaise performance en termes de besoin en irrigation).

En complément de cette production végétale, il serait intéressant de disposer de sources de protéines animales, bien que le rendement énergétique pour la production de ces aliments soit très mauvais, comparé à celui des végétaux. La présence d'animaux permettrait aussi de valoriser des sous-produits de la production végétale (déchets végétaux).

La pisciculture semble le procédé le plus facile à maîtriser, tant du point de vue confinement que de gestion des déchets. Le tilapia, deuxième espèce d'aquaculture après la carpe, est intéressant pour son taux de croissance, sa robustesse et son alimentation à base de protéines végétales. Son élevage est très développé au Canada, dans de l'eau douce chauffée (entre 22 et 31°C), en circuit fermé. Mais un élevage de chèvres (pour le lait) et de poules est aussi envisageable. Pour produire 100 g / jour / personne de protéines animales, on a estimé (Yoshi Ishikawa, AAS 90-251) qu'il faudrait des parcs de :

50 000 poissons
700 chèvres
2700 poules

La gestion écologique de tels parcs dans un système clos présente de nombreuses inconnues : comment recycler les déchets, les sous-produits ? Comment maîtriser les aspects sanitaires ?



le tilapia, un champion de la pisciculture

5.5. Production de fluides

5.5.1. Eau

Il s'agit de la ressource de base la plus importante pour la colonie (cf. §4.5). Elle est en effet non seulement utilisée en tant que telle pour les besoins humains et pour les serres, mais constitue aussi la source d'hydrogène et, au moins pour partie, la source d'oxygène. Elle sera aussi utilisée dans certains procédés métallurgiques.

Fort heureusement, comme on l'a vu au § 2.3, l'eau sur Mars, est abondante, principalement sous forme de glace dans le sol (dès le premier mètre !). Abondante, mais nécessitant néanmoins des équipements puissants pour la récupérer. Pour des raisons climatiques et astronautiques, on peut faire l'hypothèse d'une implantation de la colonie à une latitude inférieure à 50°, donc dans une région contenant de l'eau, mais dans une proportion limitée ; dans de vastes régions équatoriales, il reste possible de choisir un site dont le sol immédiatement accessible (dès le premier mètre) contient entre 6 et 10 % d'eau (en masse).

Nous avons estimé les besoins en eau de 24 à 36 T/sol, selon que tout l'oxygène n'est pas ou est produit par électrolyse. En retenant une proportion récupérable de 6 %, la masse de sol à traiter est de 400 à 600 T/sol, soit, en supposant 8 h de travail par sol, 50 à 75 T/h, soit encore, en prenant une masse volumique de 1,5 T/m³, un volume de 33 à 50 m³/h. Un tel volume peut être enlevé par un ou deux camions de taille raisonnable. En matière de manutention, les quantités sont donc tout à fait accessibles.

Reste une question : quelle est la consistance d'un sol contenant 6 à 10 % de glace d'eau ? Une fois scrapée la couche superficielle anhydre, ne risque-t-on pas de tomber sur un pergélisol nécessitant de puissants moyens de perçage (marteau-piqueur, explosifs ?). A priori, avec des pourcentages de cet ordre de grandeur, la réponse est non. Au minimum, il paraît utile de prévoir un outil de percussion sur l'engin de minage, lui permettant d'ébranler et de fendre des plaques de duricrust et de roche. Au niveau de la station de traitement, cette matière première devra être réduite en fins gravats dans un concasseur.

L'extraction de l'eau se ferait par chauffage à une température de 350°C, dans un four qui permettra, par évaporation et condensation, l'extraction du précieux liquide. Le procédé le mieux adapté pour cette opération semble être le chauffage par micro-ondes. En effet, la conductivité thermique du sol fragmenté est faible, rendant difficile sa mise en température ; par contre, sous cette forme, l'énergie se couple directement aux molécules d'eau. La quantité d'énergie de chauffage est évaluée, selon les sources, entre 12 kWh/kg d'eau (dans l'hypothèse, il est vrai, d'une teneur en eau réduite à 1 %) et 3,6

kWh/kg. En prenant une valeur médiane de 6 kWh/kg, la puissance nécessaire serait de **6 MW** pour 24 T/sol. Ce poste représente 10 % de la puissance totale générée pour la base (hors puissance consommée par l'éclairage des serres).

5.5.2. Hydrogène

Un des atouts majeurs de la planète Mars en tant que site d'implantation d'une colonie est que, disposant d'abondantes ressources d'eau, elle dispose ipso facto d'hydrogène.

L'hydrogène sera obtenu par électrolyse de l'eau extraite du sol. Son bilan énergétique thermodynamique est de 240 kJ/mole, qu'il convient de majorer du fait du rendement de l'électrolyse (0,65). Le besoin calculé de 770 T/année, conduit à une puissance de **4,5 MW**.

Environ un tiers (220 T) de l'hydrogène produit, destiné à l'avitaillement des navettes, doit encore être liquéfié, ce qui représente une dépense d'énergie de 28 kJ/mole, et une puissance voisine de **100 kW**, non significative par rapport à l'électrolyse. Le reliquat, destiné à la synthèse du méthane, reste en phase gazeuse.

5.5.3. Oxygène

Deux procédés sont envisageables pour la production d'oxygène : l'électrolyse de l'eau extraite du sol ou la décomposition thermique du CO₂ atmosphérique.

La production d'hydrogène par électrolyse permet en tout état de cause d'obtenir une partie du besoin en oxygène comme « sous-produit ». Aux 770 T/an d'hydrogène correspond 6150 T d'oxygène ; reste donc à produire en complément 3850 T, soit 10,5 T/j (10,8 T/sol).

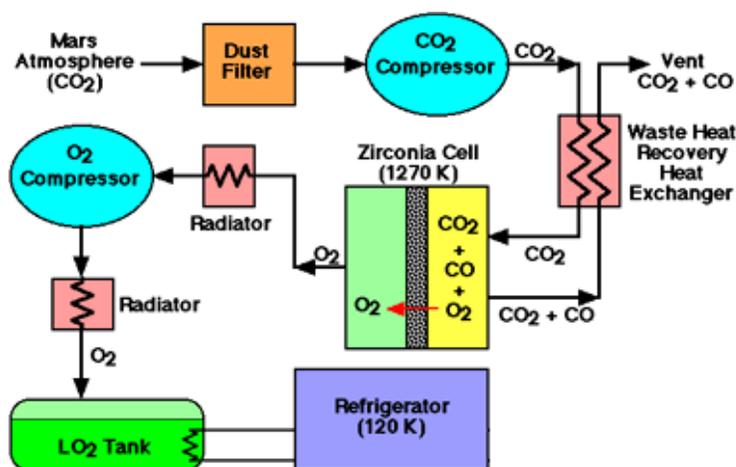


schéma de principe de la production d'oxygène par décomposition thermique du gaz carbonique (doc. NASA/JPL)

Si tout l'oxygène est produit par électrolyse, le besoin étant de 27,4 T/j (28 T/sol), la consommation d'eau correspondante est de 11250 T/an, soit 30,8 T/jour (**31,6 T/sol**). Dans ce cas de figure, on dispose d'un excédent d'hydrogène de **480 T/an**, dans lequel on peut puiser pour les synthèses chimiques, en particulier pour la production de polyéthylène, matériau plastique de base.

Si on limite le recours à l'électrolyse (et donc le besoin en eau) à ce qui est nécessaire à la production de l'hydrogène, il reste à produire 10,8 T/sol par décomposition thermique du CO₂ atmosphérique. Cette option présente l'avantage de réduire la demande en eau de la colonie d'un tiers (de 36 à 24 T/sol), et le besoin en énergie d'extraction correspondant (de 9 à 6 MW).

Le procédé consiste à puiser l'air, par aspiration et compression à 20 bar, suivi d'un refroidissement qui permet de liquéfier le CO₂, tout en le séparant de l'azote et de l'argon (autres constituants significatifs de l'atmosphère). Le choix de la pression de 20 bars permet de liquéfier et de conserver sous forme liquide le CO₂. On décompose celui-ci dans un four à 1 000 - 1 100°C, le mélange CO/O₂ étant ensuite séparé à l'aide de cellules à membranes zirconite, qui présentent la propriété de ne laisser trans-

pirer que les molécules O₂. Il reste ensuite à liquéfier l'oxygène. Le monoxyde de carbone, en principe rejeté à l'atmosphère, sera néanmoins utilisé dans certains procédés de synthèse chimique (urée) ou métallurgiques, en particulier pour la fabrication d'acier (cf. § 5.6.4). On peut aussi envisager son utilisation comme carburant, en lieu et place du méthane, mais avec une valeur énergétique bien moindre et des problèmes de sécurité au stockage (gaz mortel).

Il existe à vrai dire un autre procédé de captation du CO₂, par adsorption sur un lit de zéolite exposé à l'air libre au froid (de nuit), puis réchauffé en enceinte close (de jour). Ce mode de captation est plus économe en énergie, mais inadapté aux débits importants qu'il s'agit ici d'assurer.

A noter le problème posé par la présence en suspension dans l'air de poussière, qu'il s'agira de filtrer soigneusement si on entend assurer une longue durée de vie aux membranes séparatrices.

En matière de bilan énergétique, les deux procédés ne se distinguent pas nettement : 740 kJ/mole O₂ pour l'électrolyse (rendement de 0,65 inclus) contre 566 KJ/mole O₂ pour la décomposition thermique. Néanmoins, il convient aussi de tenir compte du surcroît de puissance consommé (3 MW) pour l'extraction d'eau dans le cas de l'électrolyse.

5.5.4. Méthane

Le méthane, excellent ergol pour la propulsion fusée et vecteur d'énergie compact et d'emploi commode pour la motorisation planétaire, est également des plus faciles à synthétiser sur Mars. Le procédé, connu dans l'industrie chimique depuis plus d'un siècle, est le procédé de Sabatier, basé sur la réaction (exothermique) :



Dans les conditions typiques suivantes : température voisine de 300°C (donc modérée), pression de 1 bar, en présence d'un catalyseur à base de ruthénium/alumine, on obtient un excellent rendement de réaction (94 % de conversion)¹⁹.

Le CO₂ est puisé dans l'atmosphère de la même manière que pour la production d'oxygène par décomposition thermique. La puissance nécessaire pour le besoin estimé de 6,2 T/sol s'élève à **1,3 MW**, dont environ 1/3 pour la compression de l'atmosphère. Mais remarquons que le chauffage à 300°C, une température modérée, peut être réalisé en utilisant directement l'énergie thermique des centrales.

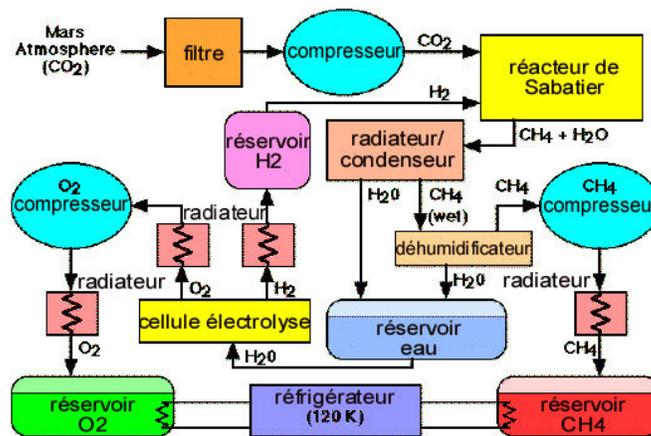


schéma de principe de la production de méthane par le processus de Sabatier (doc. NASA/JPL)

¹⁹ Référence : R. Zubrin, Martin Marietta, AIAA 94-2844

Un point important est à souligner : fondamentalement, le processus de Sabatier peut être étendu, moyennant une modification des paramètres de fonctionnement et du catalyseur, à la synthèse d'autres composés organiques, en vue d'améliorer soit les contraintes thermiques de stockage (sous forme liquide), soit la densité, tout en ne dégradant pas significativement les performances énergétiques et propulsives.

En ce qui concerne l'usage pour les moteurs-fusées, à partir du moment où on admet que les navettes sol-orbite emportent déjà de l'hydrogène liquide (pour l'ascension) et de l'oxygène liquide, le choix du méthane (utilisé en quantité réduite pour la descente) semble s'imposer, compte tenu du gain de performance qu'il offre par rapport aux autres carburants envisageables (hormis, bien entendu, l'hydrogène). Par contre, pour la motorisation planétaire, que ce soit au moyen de moteurs à combustion interne ou de moteurs électriques alimentés par des piles à combustible, des composés tels que le méthanol, l'éthanol, voire des hydrocarbures à noyau benzéniques, présentent de sérieux avantages logistiques (avitaillement, conservation longue durée à bord des véhicules), alors que le pouvoir calorifique (en kJ/kg) n'est plus le facteur déterminant. Le méthanol apparaît particulièrement bien placé.

5.5.5. Azote

L'air martien, nous l'avons signalé au § 2.3, contient 2,7 % d'azote (mais aussi 1,6 % d'argon). L'azote pourra donc être obtenu comme sous-produit des processus de production du méthane et de l'oxygène par voie de décomposition thermique. La liquéfaction sous 20 bar du CO₂ capté permet de séparer naturellement les gaz atmosphériques résiduels. Pour l'applications la plus consommatrice, l'alimentation des enceintes pressurisées en gaz tampon, ce mélange convient, il n'est pas nécessaire d'obtenir de l'azote pur. Pour les applications de synthèse chimique de produits azotés : fertilisants essentiellement, mais aussi, si besoin, explosifs (nitrate d'ammonium), la présence d'argon est probablement acceptable compte tenu de son inertie chimique.

Un grand nombre de fertilisants peuvent être synthétisés à partir de l'ammoniac, lui-même aisément obtenu par réaction directe de l'azote avec l'hydrogène, à basse température (réaction exothermique, 46 kJ/mole NH₃). L'ammoniac avec l'oxygène permet la production d'acide nitrique qui, en présence de carbonates (dont la présence a été révélée récemment par Phoenix) peut donner des nitrates. Il est aussi possible de fabriquer de l'urée par réaction de l'ammoniac avec le monoxyde de carbone. La synthèse de phosphates d'ammonium et de superphosphates ne pose pas de problème particulier. Une fois le processus de culture amorcé, la nitrification du sol sera aussi l'œuvre des plantes, en symbiose avec des bactéries capables de fixer l'azote.

5.6. Production de matériaux

5.6.1. Briques et ciment

Les argiles, abondants au moins dans certaines régions (en particulier dans les terrains anciens), permettront de fabriquer des briques, excellent matériau de construction. Pour une qualité optimale, il faudrait porter la cuisson à 900°C, mais une température de 300°C pourrait suffire ; ce niveau réduit permettrait d'envisager, pour le chauffage du four, l'utilisation de la chaleur provenant des générateurs électronucléaires (c'est à ce niveau que fonctionnent également les réacteurs de Sabatier). Les ingénieurs du projet Homestead ont proposé un recours intensif aux briques pour la construction d'enceintes enterrées. L'idée, séduisante en ce qu'elle évite la construction (ou l'importation) de gros modules métalliques, n'est pas réaliste en matière de consommation de main-d'œuvre : montage manuel des édifices, qui plus est en combinaison spatiale ! A moins de préfabriquer des éléments de murs et de voûtes dans un atelier pressurisé...

Il est par contre possible de fabriquer un ciment de bonne qualité mécanique à partir de sol martien, qui est chargé en sels (sulfates de magnésium, chlorure de sodium) et riche en argiles. En mouillant ce sol on obtient après séchage un matériau (duricrete) de résistance analogue au béton, mais plus sensible à la fracture, défaut qui peut être corrigé en ajoutant des fibres dans le mélange. A partir de ce matériau on peut couler toutes sortes d'éléments de construction, comme avec du béton.

5.6.2. Matières plastiques

Une autre possibilité particulièrement attractive est l'utilisation de matières plastiques, pour fabriquer soit des enveloppes gonflables, soit des éléments structuraux tels que des poutrelles, cornières, cloisons, etc. En effet, il est facile de produire de l'éthylène à partir d'hydrogène et de monoxyde de carbone, lui-même sous-produit de la production d'oxygène par décomposition thermique du CO₂ ou obtenu par une réaction analogue à celle de Sabatier : $3 \text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO} + 2\text{H}_2$. On utiliserait à cette fin la réaction (fortement exothermique et à constante d'équilibre élevée, donc à bon rendement) :



L'éthylène est à la base de la production de la plus grande partie des plastiques les plus couramment utilisés, en particulier le polyéthylène, le polypropylène, le polycarbonate (pour les fenêtres), la résine de polyester. Cette filière permettra d'étendre la palette de produits bien au-delà des matériaux de construction : tissus, lubrifiants, isolants, outils divers, emballages, récipients, etc. Le polyéthylène est aisé à manipuler et conserver, car il se liquéfie à la température nocturne de Mars et se conserve liquide sous quelques bars.

Il est à noter que c'est la présence sur Mars (contrairement à la Lune) à la fois du carbone et de l'hydrogène qui permettra le développement de cette « industrie » essentielle pour le développement d'une colonie.

5.6.3. Verre et céramiques

Les argiles de Mars devraient permettre la fabrication de céramiques, tandis que la silice omniprésente permettra de produire du verre. Une difficulté cependant : la silice martienne sera obtenue à partir d'un sable riche en oxyde de fer Fe₂O₃ (hématite), qu'il est nécessaire d'éliminer si l'on veut obtenir un verre de bonne qualité optique. Ceci peut se faire par réduction de Fe₂O₃ par du monoxyde de carbone et séparation du fer ainsi obtenu. A partir du verre, on pourra aussi fabriquer de la fibre de verre, utile pour l'élaboration de pièces en composite.

5.6.4. Acier, Aluminium

C'est le besoin en acier qui commandera les quantités de fer à extraire du sol martien, le verre devenant plutôt un sous-produit. En fait, deux réactions peuvent être mises en œuvre pour réduire le Fe₂O₃ : celle évoquée ci-dessus, utilisant le monoxyde de carbone, l'autre utilisant l'hydrogène ; dans ce dernier cas, l'hydrogène peut être recyclé par électrolyse de l'eau produite par la réaction. Pour la Lune, un procédé analogue a été proposé, mais pour traiter l'ilménite (FeTiO₃, cependant plus difficile à réduire). Au fer ainsi obtenu, il convient d'ajouter du carbone et d'autres métaux tel que manganèse ou nickel, tous présents sur Mars, pour obtenir les variétés d'acier souhaitées. Le carbone sera de préférence apporté par du monoxyde de carbone, mais il pourrait aussi l'être par des déchets végétaux autrement non utilisables.

L'acier jouera un rôle important dans l'établissement de la colonie, pour les structures, mais aussi pour l'élaboration de réservoirs divers et de pièces résistantes d'outils, de machines, de véhicules... A noter qu'en présence d'une atmosphère ne contenant pas d'oxygène et des quantités minimales de vapeur d'eau, l'acier sera pratiquement inoxydable.

L'oxyde Fe₂O₃ étant contenu en forte proportion dans le sol martien, en toutes régions, il ne présente aucune difficulté de minage.

L'aluminium est également présent dans le sol (4 % en masse), mais sous forme d'alumine (Al₂O₃) dont la réduction est difficile et demande beaucoup d'énergie (20 kWh par kg d'aluminium). La réduction peut se faire par électrolyse, vers 1 000°C, d'une solution d'alumine, avec des électrodes en carbone (fabriquées sur place). Compte tenu de la bonne résistance de l'acier à l'atmosphère martienne et de ce coût énergétique élevé, l'aluminium ne sera retenu que pour quelques applications particulières, pour exploiter sa légèreté (pièces de vol) ou sa bonne conductivité électrique (câbles). Pour ce dernier usage, le cuivre serait meilleur. Mais si ses oxydes sont facilement réduits, c'est un élément plus rare,

qu'on ne trouvera de manière exploitable que dans des gisements qu'il faudra rechercher. La forte activité volcanique et hydrothermale de Mars dans le passé laisse penser que, d'une façon générale, les gisements de métaux doivent être fréquents.

5.7. Production de semi-produits

A partir des matériaux de base, il faut dès que possible permettre à la colonie de produire les semi-produits nécessaires à son extension et ses besoins de maintenance. Cela implique d'importer de la Terre les machines et outillages de transformation.

L'étude Homestead a tenté d'établir un inventaire de ces moyens, mais à une échelle de croissance environ 10 fois plus lente que celle considérée dans la présente étude (jusqu'à +18 colons par révolution synodique, contre +200). On peut néanmoins s'y référer pour se faire une idée du spectre et de l'ampleur de ces infrastructures. Voici ces estimations, multipliées par 10 pour remise à l'échelle :

Consommations de matières premières ci-dessous (en T/année) :

-ciment :	2000	
-verre :	750	
-polyéthylène :	500	
-polycarbonate :	350	
-polyester :	300	(composites)
-acier :	750 à 1500	
-aluminium :	100	

Semi-produits à base d'argile ou de ciment :

- briques, parpaings ;
- panneaux et poutres préfabriqués.

Semi-produits métalliques (acier et aluminium) :

- feuilles, conduits, tubes, câbles, toiles métalliques ;
- coques, poutres, roues (par estampage) ;
- poutres, corps de vannes, pièces de véhicules planétaires... (par fonderie)

Semi-produits à base de matières plastiques et de verre :

- pièces moulées : emballages, récipients, ustensiles divers ;
- panneaux en polycarbonate : vitrages hublots, dômes ;
- polyester : pièces moulées, drapées ou bobinées en composite verre-résine.

A ces élaborations de base devront s'ajouter :

- des **processus de traitement** nécessitant des moyens propres (bains, fours) : galvanisation, revêtements à base de poudres, électrodéposition ;
- des moyens **d'usinage** : perceuse, tour de précision, fraiseuse, broyeuse, découpeuse ;
- des moyens **de soudage, de découpe plasma** ;
- des moyens **de manipulation** : pont, bras manipulateur ;
- un dispositif **de prototypage rapide**.

L'étude estime le détail des volumes et des masses des matériels correspondants (à importer de la Terre), pour des totaux, également multipliés par un facteur 10 de mise à l'échelle, d'environ :

volume :	1000 m³
masse :	65 T

Ces valeurs donnent à penser, si on se réfère aux hypothèses de trafic cargo, que le volume à transporter pour la mise en place initiale de ces moyens de production sera plus contraignant que la masse elle-même. D'autant plus que s'y ajouteront les moyens de chantiers déjà évoqués (scrapeurs, excavateurs, camions...). Il faudra donc envisager, soit de consacrer une ou deux missions préliminaires non habitées dédiées au débarquement de ces matériels, soit d'admettre une mise en régime du développement de la colonie sur plusieurs révolutions synodiques.

5.8. Récapitulation des principaux moyens

(A mettre en parallèle du tableau des besoins du § 4.6)

Trafic interplanétaire	12	navettes orbitales - 50 vols par révolution synodique
Trafic planétaire (personnel)	10	rovers, 50 jeeps, quelques hoppers et drones
Génération électrique (pour 160 MW) :	20	générateurs nucléaires de 8 MW (6 T, $T_{\text{turb}} = 1800 \text{ K}$)
Espaces habitables	700	modules de 5x20 m² + 30 espaces communs de 1000 m²
Serres	6 ha	hydroponiques, éclairage artificiel (100 MW)
Élevages (?)	50 000	poissons, 700 chèvres, 2700 poules
Productions Fluides :		
Eau (hab.et serres)	6 à 10 MW	pour 24 à 36 T/sol ¹ , chauffage de sol microondes
Oxygène	7,3 MW	pour 28 T/sol (hypothèse procédé électrolyse)
Hydrogène	4,6 MW	pour 2,2 T/sol, par électrolyse
Méthane	1,3 MW	pour 6,2 T/sol, par Sabatier (CO₂,H₂) + électrolyse
Production Matériaux :		
Ciment	2 000 T/an	à base de sol chargé en sels et argiles, dans four
Matières plastiques	1 100 T/an	à partir de polyéthylène, obtenu par Sabatier (CO₂, H₂)
Verre	750 T/an	à partir de silice, dans four haute température
Céramiques		à partir d'argiles, dans four haute température
Acier	750 à 1500 T/an ²	à partir d'hématite Fe ₂ O ₃ , réduit par CO ou H₂
Aluminium	100 T/an	à partir d'alumine Al ₂ O ₃ , électrolyse à 1000°C
Production Semi-produits : 65 T, 1 000 m³ de machines et outillages		
Briques		argiles / moules et four 300°C (900°C souhaitable)
Parpaings, poutres		ciment / moules et four
Fibre de verre		verre / four, filière
Feuilles, tôles, tubes, câbles		acier, alu / laminoir, filière, découpeuse, plieuse
Coques, poutres, roues		acier, alu / estampeuse
Pièces moulées		acier, alu, verre / four et moules de fonderie
Pièces plastique diverses		polyéthylène, polycarbonate / moules, découpeuse
Pièces composites		fibre de verre, polyester / moules, four
Finition		ateliers usinage, traitement de surface, soudage
Moyens de minage :		
Nombre de sites actifs	4	pour eau & régolite, minerais (2), argiles
Nombre d'engins / site	2	dont 1 seul au maximum actif à tout instant
Nombre de camions / site	2	
Puissance installée engin	500 CV	taux d'emploi : 25 %
Puissance installée/camion	200 CV	taux d'emploi : 25 %

¹ selon procédés production oxygène

² selon estimations

CONCLUSIONS - ASPECTS DÉTERMINANTS NON TRAITÉS

Cette étude avait pour but principal d'identifier **les modes de réalisation et de fonctionnement technique** envisageables pour une colonie martienne de 2 000 résidents, et d'en évaluer les **principales caractéristiques dimensionnelles**. Cette approche a permis de se faire une opinion sur les difficultés matérielles de la réalisation d'un tel projet et de quantifier les moyens à mobiliser pour y parvenir.

Il convient cependant de souligner que, du fait de la nature éminemment prospective du sujet, et malgré les efforts déployés par certains auteurs pour concrétiser le projet, de nombreuses hypothèses ou approximations ont dû être faites tout au long de l'étude. D'autres choix (par exemple serres à éclairage naturel plutôt qu'artificiel) conduiraient à des dimensionnements différents. Néanmoins, il nous semble que ces lacunes ne remettent pas en cause l'idée générale qu'on peut tirer de ce concept, ni les principales conclusions de l'étude.

L'analyse ne fait pas apparaître de points véritablement bloquants, en particulier en matière de trafic cargo à assurer pour être capable de faire démarrer, puis de soutenir l'implantation, supposée se dérouler sur une vingtaine d'années. Par contre, elle permet de réaliser qu'installer une communauté humaine sur un autre monde, fût-il la moins inhospitalière et la plus riche en ressources des destinations, conduit à la mise en place de vastes infrastructures : 10 ha d'espaces pressurisés (un millier de modules !), 6 ha de serres hydroponiques (des milliers de lampes !), 20 générateurs électronucléaires de 8 MW, etc.

Pratiquement tous les domaines techniques posent de sérieux défis, liés principalement à l'impératif d'autarcie : fiabilité et maintenabilité des équipements et infrastructures, constitution des stocks de matériels en tous genres (outillages, consommables, pièces de rechange, médicaments, compléments nutritionnels, etc.), conception des constructions maximisant l'usage de ressources locales et minimisant le besoin de main-d'œuvre, etc.

Il apparaît que le besoin de la colonie le plus dimensionnant et le plus compliqué à satisfaire est sa subsistance nutritionnelle, tant en surface et technicité des serres qu'en termes de charge de main-d'œuvre et de puissance consommée, du moins dans l'option d'éclairage artificiel considérée. De plus, des inconnues sur la viabilité à long terme de telles installations demeurent à ce jour. Notons d'ailleurs que cette option, comme celle du recours à des générateurs nucléaires modulaires pour l'énergie, seraient à reconsidérer dans l'hypothèse d'un développement de la colonie à une échelle plus conséquente ; la culture en plein sol et en éclairage naturel, et l'utilisation de stations d'énergie solaire orbitales (construites à partir de matériaux extraits des satellites de Mars) seraient probablement mieux adaptées.

Il est clair que cette analyse technique ne couvre pas certaines facettes, pourtant déterminantes, de la viabilité du projet. Une colonie spatiale, ce sont des infrastructures et des processus techniques, mais c'est aussi, avant tout, **une communauté** d'hommes, de femmes (et d'enfants), ce qui implique la prise en compte des **processus sociaux, psychologiques**, et celle des **fondements éthiques** (aspirations, relations avec la Terre, mode de gouvernance, politique de développement, etc.). Ces aspects passionnants, abordés par plusieurs auteurs, mériteraient à eux seuls une analyse permettant d'identifier, dans ce domaine également, les problèmes de faisabilité et les contraintes à prendre en compte.

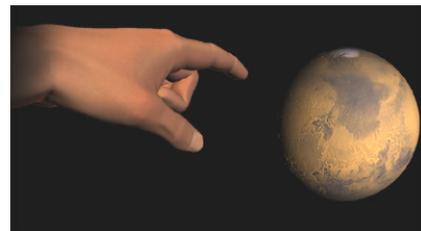
L'autre élément essentiel non couvert par cette étude concerne la **nature des activités de la colonie** susceptibles de conduire à l'indispensable émergence d'une économie interplanétaire. A moins d'imaginer qu'elle soit établie uniquement dans le but de fournir des loisirs à des rentiers, ou qu'elle soit indéfiniment supportée par la Terre, la colonie devra produire des biens et services exportables. En effet, son équilibre fonctionnel impose d'importer de la Terre un flux de matériels de haute technologie qu'il est inimaginable de produire sur place. On peut en citer quelques exemples : microprocesseurs, instruments de précision, pièces métallurgiques nécessitant des moyens de production lourds et spécialisés, réacteurs nucléaires, compléments nutritionnels, médicaments, etc. Ces importations devront être contrebalancées, au moins en majeure partie, par l'exportation de biens et services à destination de la Terre et de ses installations spatiales éventuelles (chantiers de minage d'astéroïdes, de construction de centrales solaire...).

Identifier la nature de ces activités « commerciales » permettrait de juger de la viabilité de la colonie et de mieux cerner la définition technique de ses infrastructures. Celles-ci ne seront évidemment pas identiques selon que ces activités seront essentiellement intellectuelles (recherche, conception), moyennement consommatrices en infrastructures (tourisme, foncier) ou, au contraire, tournées vers des applications « industrielles » (fourniture de fluides et semi-produits vers les astéroïdes, extraction de métaux rares). Néanmoins, afin de limiter le périmètre de l'étude, il a été convenu de ne pas aborder cette question, trop spéculative. Dans l'évaluation des moyens techniques et des flux de consommables de la colonie, nous avons donc été amenés à retenir une hypothèse moyenne, assez floue, en ce qui concerne ces activités (cf. § 5.1.1).

Cette question constitue pourtant le véritable fondement de la crédibilité du scénario. Elle présente, du fait de la difficulté à cerner les évolutions socioéconomiques à long terme de notre monde et le développement de ses activités spatiales, des incertitudes beaucoup plus importantes que les considérations purement techniques développées dans cette étude.

Richard Heidmann

rheidmann@aol.com



ON TO MARS !

Bibliographie, Webographie

Ouvrages et recueils de communications

- Cap sur Mars*
Robert Zubrin & R. Wagner, Editions Goursau ISBN 2-904105-09-3
- From Imagination to Reality, Part II : Base Building, Colonization and Terraformation*
American Astronautical Society (AAS) Vol.92, 1997 ISBN 0-87703-428-X
- Strategies for Mars: a Guide to Human Exploration*
AAS Vol.86, 1996 ISBN 0-87703-406-0
- The Case for Mars V*
AAS Vol.97, 2000 ISBN 0-87703-460-5
- Resources of Near-Earth Space*
The University of Arizona Press, 1993 ISBN 0-8165-1404-6
- Mining the Sky*
John S. Lewis, Addison Wesley, 1996 ISBN 0-201-32819-4
- Islands in the Sky*
Stanley Schmidt & Robert Zubrin, Wiley, 1996 ISBN 0-471-13561-5
- Beyond Earth, the Future of Humans in Space*
L. Morris & K. Cox, PhD Apogee Books, 2006 ISBN 1-894959-41-8
- Planète Mars, une aggraction irresistible*
Richard Heidmann, ALVIK Editions, 2005 ISBN 02-914833-36-9

Articles (autres que ceux trouvés dans les recueils AAS ci-dessus)

- Resources Utilization and Site Selection for a Self-Sufficient Martian Outpost*
G. James, G. Chamitoff, D. Baker, 1998 NASA/TM-98-206538
- In Situ Resource-Based Lunar and Martian Habitat Structures Development at NASA/MSFC*
M. P. Bodifor et al. , 2005 AIAA 2005-2704
- The Economic Viability of Mars Colonization*
Robert Zubrin, Lockheed Martin Astronautics
- Requirements for Space Settlement Design*
A. E.Gale, R. P.Edwards, The Boeing Company 4Frontiers Corporation
- A Permanent Settlement on Mars: Generation 1 Design*
Georgi Petrov, B. Mackenzie, M. Homnick,. Palaia, IV 4Frontiers Corporation
- Martian Cement*
Robert J.Milligan, 2007 10th Mars Society Convention
- Organics on Mars*
Robert J.Milligan, 2007 10th Mars Society Convention
- Horticulture on Mars*
Raymond M.Wheeler, 2006 NASA Biological Sciences Office
- Creation of Closed Ecological Life Support Systems*
I. I. Gitelsona & G. M. Lisovskya, 2008 Jal of Siberian Federal Univ. Biology
- MERIT: New Approach for a Large Scale Space Infrastructure based on Resources from Mars*
J. Powell, G. Maise, J. Paniagua STAIF 2005
- Reference Reactor Module for the Affordable Fission Surface Power System*
D. I.Poston, R. J.Kapernick STAIF 2008
- Radar Men on the Moon: a Brief Survey of Fission Surface Power Studies*
Gary L.Bennett STAIF 2008
- Commonality of Electrolysis Sub-Systems for ISRU, Power and Life Support for a Lunar Outpost*
D. D.Linne, J. E.Freeh, A. F.J.Abercromby STAIF 2008
- A Greenhouse for Mars and Beyond*
Christopher P. Rahaim, Paul A. Czysz STAIF 2008
- L'Homme et ses écosystèmes dans l'Espace*, 2007 Prospective 2100
Jean Dunglas

Quelques sites Internet

Association Planète Mars	www.planete-mars.com
The Mars Society	www.marssociety.org
American Astronautical Society	www.astronautical.org/
Space settlement	www.nss.org/settlement/nasa/index.html
Mars Foundation (ite du projet Mars Homestead)	www.marshome.org/
4Frontiers Corporation	www.4frontierscorp.com/company/index.php
Centre technique interprof. des Fruits et Légumes	www.ctifl.fr/Accueil.aspx
Univelt Publishers	www.univelt.com/home.mv



www.planete-mars.org
28, rue de la Gaîté 75014 Paris