



Terraformer Mars pour créer une nouvelle Terre

Peut-il y avoir un meilleur exemple du génie créateur humain que de voir l'homme quitter sa planète natale, et répandre la vie dans tout le système solaire grâce à la création de nouveaux habitats propices à la vie – de nouvelles Terres. Dans un texte rédigé en 1938, Vladimir Vernadski, le grand biogéochimiste russe, disait que la région géologique de la vie sur Terre – la biosphère – « *s'était, grâce aux machines des hommes, étendue jusque dans la stratosphère* ». Une décennie avant le texte de Vernadski, Hermann Oberth, le père des vols spatiaux, écrivait que l'utilisation de machines pour de futures explorations spatiales habitées, ne viserait pas seulement à s'aventurer au-delà de la surface de la Terre mais « *à rendre tous les mondes habitables* ».

Aujourd'hui, pour la première fois, l'homme a à portée de main les outils permettant d'emmener la civilisation humaine dans l'espace et, dès aujourd'hui, nous pouvons préparer les étapes nécessaires à la création de nouvelles Terres.

Bien que la Lune soit l'objet le plus proche et le plus commode pour l'exploration et la colonisation, ce petit corps céleste ne pourra jamais disposer d'une atmosphère indispensable à la vie. Pour rendre possible la vie sur la Lune, nous devons établir un habitat clos et protégé.

Mars, bien que plus difficile à atteindre, possède tous les ingrédients nécessaires à la vie. Même si elle

MARSHA FREEMAN

semble être aujourd'hui une planète sans vie, Mars a eu par le passé une atmosphère assez épaisse et chaude pour que l'eau liquide circule à sa surface – une condition préalable à la vie. Et une fois qu'il y aura à nouveau une atmosphère permettant la présence d'eau liquide, il y aura de la vie sur Mars. Terraformer Mars, par conséquent, est d'abord un projet de « restauration » visant à ramener la planète aujourd'hui aride et froide à une période de son passé géologique où elle possédait un potentiel susceptible d'accueillir la vie.

La première étape

Dans son état actuel, Mars ne pourrait pas entretenir la vie aérobie, humaine ou animale, parce que son atmosphère est principalement composée de dioxyde de carbone. Pour terraformer Mars, la première étape consistera à réchauffer et épaissir l'atmosphère existante de façon à la rendre habitable pour les micro-organismes anaérobies qui peuvent croître dans un environnement de dioxyde de carbone.

Le biologiste Robert Haynes a appelé ce processus « *ecopoiesis* », en utilisant les racines grecques signifiant « fabriquer » ou « produire » un

« habitat » ou un « environnement ». L'*ecopoiesis* sur Mars va exiger que l'on transforme ce que Vernadski appelait les « corps bio-inertes » de la planète – le sol, l'atmosphère et l'eau – qui joueront un rôle crucial dans l'organisation de la future biosphère et, en retour, ceux-ci seront « changés de l'intérieur par la matière vivante ».

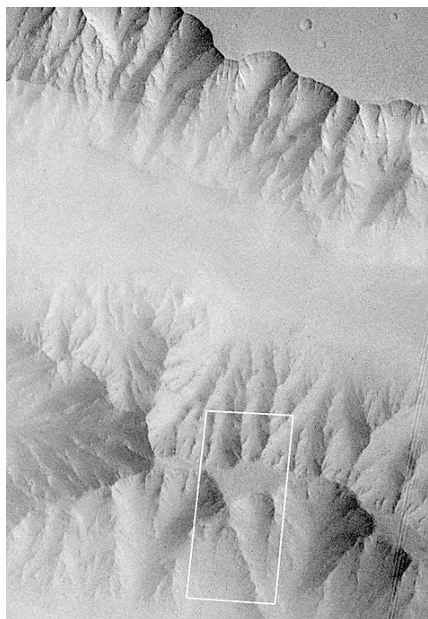
Aujourd'hui, la température sur Mars n'atteint le point de fusion de la glace (273 K) que pendant de brèves périodes, et cela seulement dans les régions équatoriales de la planète et quand celle-ci se trouve le plus proche du Soleil. Bien qu'il y ait des niches sur Terre où la vie existe dans un environnement caractérisé par un froid et une sécheresse aussi extrême (par exemple, en Antarctique), l'absence de couche d'ozone dans l'atmosphère martienne fait que sa surface est soumise à un bombardement constant de rayonnements ultraviolets, ce qui rend fortement improbable l'existence d'une quelconque espèce biologique.

Néanmoins, même si la température atmosphérique de Mars était légèrement au-dessus du point de fusion de la glace et s'il y avait un bouclier contre les ultraviolets, aucune forme de vie ne pourrait y survivre parce que l'atmosphère actuelle de dioxyde de carbone a une pression inférieure à 10 mbars, soit seulement environ 1 % de la pression atmosphérique terrestre au niveau de la mer. Nous ne con-

naissons aucun micro-organisme capable de résister à une pression atmosphérique aussi faible.

S'engager dans l'*ecopoiesis* de Mars requiert, par conséquent, que l'on augmente à la fois la température et la pression atmosphérique de la planète, ce qui va de pair. En plus de sa forme gazeuse dans l'atmosphère, Mars possède d'importantes réserves de dioxyde de carbone sous au moins deux autres formes. C'est d'ailleurs en libérant ce dioxyde de carbone gelé et chimiquement lié que l'on pourra réchauffer Mars et augmenter sa pression, et cela assez pour rendre possible des formes de vie anaérobies.

Depuis des décennies, nous savons que la calotte permanente du pôle sud de Mars est essentiellement composée de dioxyde de carbone gelé (neige carbonique), alors que le pôle nord, dont l'étendue varie avec les saisons, est surtout composé d'eau gelée. On pense qu'il existe une réserve de dioxyde de carbone gelé mélangée avec le sol martien, une sorte de permafrost. De plus, il est très probable que le sol martien contient des carbonates, en particulier dans les régions où il y a des traces d'écoulement d'eau à la surface. Ces carbonates ont sans doute été formés lorsque le dioxyde de carbone qui se trouvait dans l'atmosphère



Vue rapprochée de Vallis Marineris montrant clairement que, par le passé, l'eau a circulé à la surface de Mars.

s'est partiellement dissout dans l'eau et s'est combiné avec d'autres éléments comme le calcium, le fer et le magnésium.

Les estimations des réserves martiennes de dioxyde de carbone – et aussi d'eau, d'autres éléments volatiles et de minéraux – varient suivant plusieurs ordres de grandeur. Ce que nous savons de la composition de la planète rouge se limite à ce qui nous a été révélé par les sondes Viking des années 70, par les météorites martiennes qui ont atterri sur la Terre ainsi que par la toute récente mission Mars Pathfinder. C'est pour cette raison qu'il faut encore rester prudent dans l'élaboration d'un plan d'action précis pour terraformer Mars. Toutefois, les objectifs sont clairs. Les modèles utilisés vont gagner en précision à mesure que les missions de la prochaine décennie atteindront Mars et que les outils technologiques d'ingénierie planétaire continueront de progresser.

« Effet de serre galopant »

Divers moyens ont été suggérés pour augmenter la température et la pression de Mars, et ainsi démarrer le processus pour libérer le dioxyde de carbone qui se trouve gelé dans la calotte polaire sud et dans la couche du sol appelée « régolite ». L'astrophysicien Chris McKay estime qu'un réchauffement de 4 K de la température du pôle sud pourrait par exemple, peut-être en à peine une dizaine d'années, faire fondre la calotte glaciaire, libérant ainsi entre 50 et 100 mbars de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Pour l'instant, la pression atmosphérique au pôle est d'environ 6 mbars. Le réchauffement de la planète, provoqué par la libération du gaz de la calotte glaciaire, permettrait au dioxyde de carbone présent dans le régolite de commencer à être libéré. Ces dégagements combinés pourraient atteindre jusqu'à 400 mbars de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, ce qui au total pourrait accroître la température de Mars de 55 K, c'est-à-dire bien au-dessus du point de fusion de la glace.

Une des méthodes proposées pour un tel projet de réchauffement est de

déployer un ou plusieurs miroirs orbitaux pour concentrer la lumière solaire sur la surface du pôle sud. Toutefois, pour concentrer suffisamment d'énergie solaire sur le pôle, McKay estime que le miroir orbitant devrait être de la taille de l'Etat du Texas, ce qui semble difficilement réalisable. Parmi les autres approches considérées, certains proposent de décroître l'albédo aux pôles en disséminant de la poussière sombre de façon à accroître l'absorption des rayons solaires, tandis que d'autres projettent de faire percuter des météorites sur Mars pour augmenter les réserves de gaz dans l'atmosphère.

Une autre approche, qui est considérée plus sérieusement, s'inspire d'un précédent : l'évolution des conditions de la planète Vénus. Il s'agirait en fait d'utiliser des gaz à super-effet de serre pour induire un « effet de serre galopant ». Le type de gaz recherché doit avoir la propriété de ne pas absorber la lumière visible nécessaire pour réchauffer la surface de la planète, tout en ayant la capacité d'absorber les rayonnements infrarouges (chaleur) réémis par la planète, les empêchant ainsi de retourner dans l'espace. Un choix possible serait l'utilisation d'un gaz de la classe des chlorofluorocarbones (CFC). Cependant, les CFC ont un inconvénient : tant qu'il n'y aura pas une couche protectrice d'ozone sur Mars, les importants rayonnements ultraviolets rompront leurs liens chimiques. Il s'ensuivrait que les CFC n'auraient une durée de vie de seulement quelques heures.

Une voie de recherche qui semble plus prometteuse est l'utilisation de perfluorocarbones (PFC). McKay a calculé que même un petit nombre de parties par million de ces gaz à super-effet de serre pourrait faire passer la température moyenne à la surface de Mars de -60 à -40° C, ce qui serait suffisant pour déclencher une libération naturelle du dioxyde de carbone des calottes polaires et du régolite, et ainsi déclencher un effet de serre galopant. Selon les calculs de McKay, si les gaz peuvent piéger la lumière solaire avec une efficacité de 10 %, Mars aurait au bout d'une centaine d'années une atmosphère de dioxyde de carbone épaisse et chaude.

Pendant un atelier de deux jours, tenu au Ames Research Center de la Nasa en Californie les 10 et 11 octobre

2000, près de cent cinquante scientifiques ont discuté des conditions physiques et biologiques nécessaires pour rendre Mars habitable. Une des présentations, effectuée par une étudiante du Massachusetts Institute of Technology, Margarita Marinova, décrivait les recherches les plus récentes sur l'utilisation des gaz à super-effet de serre artificiel, parmi lesquels les PFC et l'hexafluorure de soufre, pour réchauffer Mars.

Sur Terre, le principal gaz à effet de serre est la vapeur d'eau mais celle-ci est presque inexistante dans l'atmosphère martienne. En ce qui concerne le deuxième gaz le plus efficace, le dioxyde de carbone, il existe en abondance relative sur Mars mais ce n'est pas assez pour réchauffer la planète.

Au lieu de les importer, Marinova propose d'introduire dans l'atmosphère des gaz à super-effet de serre qui seraient produits à partir de ressources martiennes locales. Ces gaz à super-effet de serre doivent être de vingt à trente fois plus efficaces que le dioxyde de carbone pour piéger les rayonnements, ils ne doivent pas endommager la couche d'ozone naissante, ils doivent avoir un long temps de séjour dans l'atmosphère, ils ne doivent pas être susceptibles d'être brisés par des rayonnements ultraviolets et, enfin, ils doivent être produits de façon biologique. Les PFC remplissent ces conditions.

Dans un entretien, Margarita Marinova a expliqué que les PFC

en question ont un temps de séjour dans l'atmosphère de l'ordre de trois mille ans, qu'ils ne sont pas dangereux pour la vie et qu'ils n'affecteront pas la couche d'ozone.

Un « cocktail » de gaz

Encore récemment, les bandes d'absorption spectrales des PFC étaient inconnues. Toutefois, les travaux en laboratoire de Hirofumi Hashimoto, à l'Institut du génie mécanique et systémique à l'université de Tsukuba au Japon, et les travaux de modélisation réalisés par Marinova, ont permis d'établir un profil de quel type de « cocktail » de gaz à super-effet de serre aurait un impact maximum pour l'*ecopoiesis* de Mars.

Leurs travaux indiquent que de petites quantités de gaz seraient suffisantes pour commencer la formation d'une atmosphère de dioxyde de carbone épaisse, dans la mesure où ces gaz réussiraient à activer les mécanismes naturels de feed-back inhérents au système climatique de la planète. Une combinaison de gaz est intéressante pour deux raisons. La première tient à un effet appelé élargissement de pression. On a découvert que lorsqu'un gaz non absorbant est introduit, il élargit, par collision, les raies spectrales des gaz à absorption-rayonnement. Sur Terre, la petite quantité de dioxyde

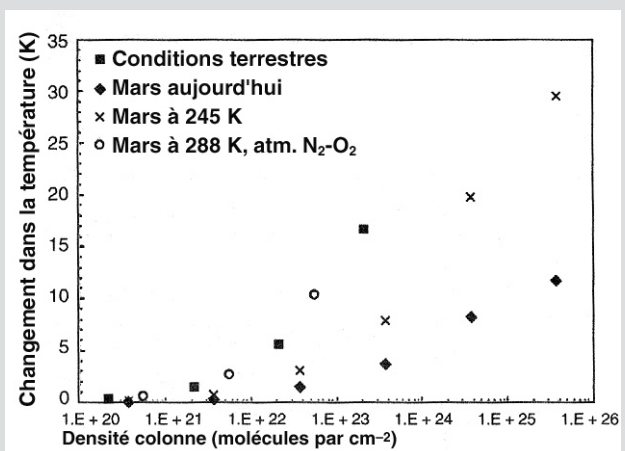
de carbone dans l'atmosphère est un absorbeur efficace parce que sa pression est élargie par l'oxygène et le nitrogène ambiant. Sur Mars, la présence de gaz rares est tellement insignifiante qu'il n'y a pas d'élargissement de pression du dioxyde de carbone.

La seconde raison tient au fait qu'il y a un moment à partir duquel accroître les quantités de gaz spécifiques atteint les limites d'efficacité puisque sa bande spectrale spécifique devient saturée. Une fois que le gaz a absorbé 100 % des rayonnements d'une bande spécifique, la température ne s'accroîtra plus, quelle que soit la quantité de gaz ajoutée.

Par conséquent, selon les chercheurs, utiliser plusieurs gaz en petite concentration sera plus efficace qu'en utiliser un petit nombre en plus grande concentration. Etudier les caractéristiques de plusieurs gaz potentiels à super-effet de serre, chacun doté de bandes d'absorption différentes, permettra aux ingénieurs planétaires de choisir la meilleure combinaison. Selon Marinova, la combinaison de gaz doit bloquer la plus grande partie de la bande spectrale possible car, sinon, « une grande partie de rayonnements pourra s'échapper même à travers une petite fenêtre spectrale où les gaz ne seraient pas bloqués ».

Lorsqu'on lui demande en combien de temps les gaz à super-effet de serre devraient être introduits

Figure 1. Augmentation de la température grâce à l'introduction de gaz à super-effet de serre. Le graphique présente quatre cas. Le premier est celui de la Terre telle qu'elle est aujourd'hui. Le second cas est celui de Mars dans son état actuel. L'introduction de gaz à super-effet de serre sur Mars élèverait lentement la température et la pression atmosphérique. Dans le troisième cas, grâce aux gaz à super-effet de serre, on atteint l'étape où la température à la surface a assez augmenté pour que soit enclenché l'effet de serre galopant. La plus grande partie et peut-être même la totalité du dioxyde de carbone disponible sera libéré dans l'atmosphère, la réchauffant encore davantage. Dans le quatrième cas, la composition chimique de l'atmosphère est passée de ses 95 % de dioxyde de carbone à une combinaison nitrogène-oxygène propice à la vie. Ce changement, bien que nécessaire pour l'établissement de l'homme sur la planète rouge, va entraîner une baisse de la température et de la pression, conditions qui devront donc être maintenues grâce à un apport continu de petites quantités de gaz à super-effet de serre.



sur Mars, Marinova répond « *le plus vite possible* ». Une fois que vous ajoutez des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, « *la question de savoir combien de temps ils mettront pour réchauffer Mars dépend simplement de combien de temps ils prendront pour se mélanger dans l'atmosphère. Une fois qu'ils sont là, sur une échelle temporelle géologique, il s'agit presque d'un réchauffement instantané* ».

Pour garder l'atmosphère martienne chaude, Marinova et ses collègues ont prévu qu'il serait nécessaire de continuer à ajouter des gaz à super-effet de serre même après que l'effet de serre galopant ait libéré tout le dioxyde de carbone possible. Elle explique dans son entretien que, d'abord, on ne connaît pas avec certitude la quantité de dioxyde de carbone présente sur Mars et, ensuite, que l'on n'est pas certain non plus de la quantité que l'on pourra en libérer dans l'atmosphère. Néanmoins, même s'il y en avait assez pour que Mars devienne habitable pour des micro-organismes, la deuxième étape qui consistera à rendre la planète rouge habitable pour l'homme, demandera une atmosphère riche en oxygène, « *c'est-à-dire faible en dioxyde de carbone, pour être respirable par des animaux* », ce qui signifie qu'elle nécessitera sans doute un réchauffement artificiel continu. Des gaz à super-effet de serre devront donc être soigneusement sélectionnés afin de bloquer les parties de rayonnements infrarouges qui étaient jusqu'alors protégées par le dioxyde de carbone.

Tous les ingrédients chimiques nécessaires à la production de gaz à super-effet de serre – carbone, fluorine et sulfure – sont déjà présents sur Mars, mais pour rendre cette transformation de la planète économiquement viable, des usines seront nécessaires sur place. Selon des estimations, McKay explique que vaporiser le dioxyde de carbone et l'eau sur Mars et faire évaporer le nitrogène du sol martien (décongeler Mars) demanderont un apport d'énergie de 5 mégajoules par centimètre carré de la surface planétaire, c'est-à-dire l'équivalent de dix années de lumière solaire sur Mars. Si l'on pouvait piéger cette lumière solaire avec 100 % d'efficacité, cette décongélation prendrait

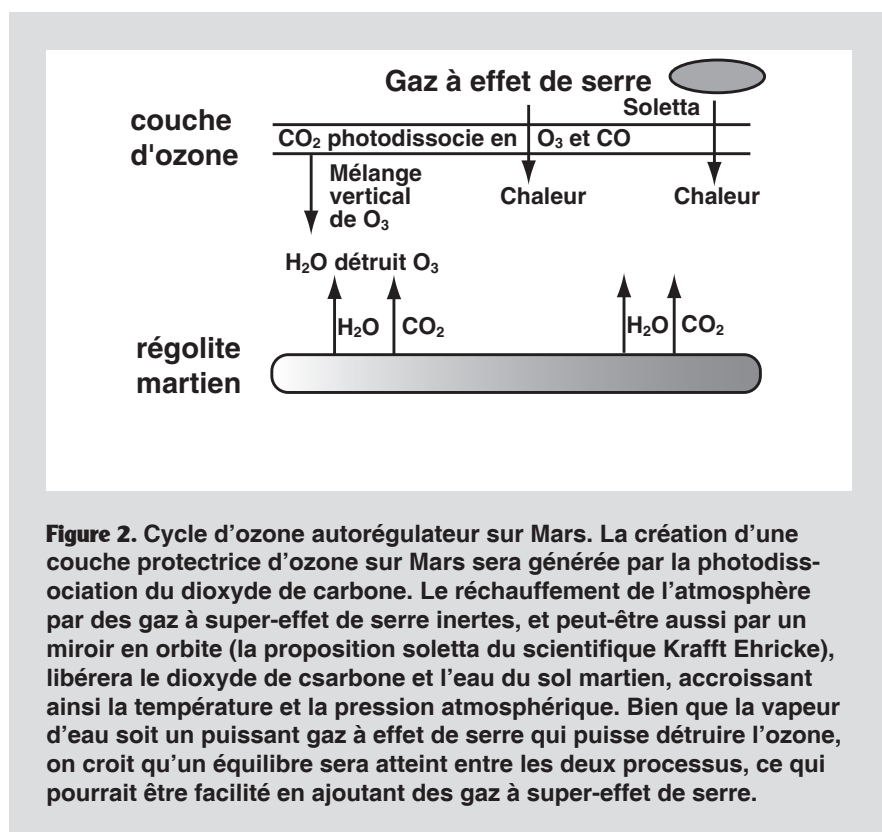


Figure 2. Cycle d'ozone autorégulateur sur Mars. La création d'une couche protectrice d'ozone sur Mars sera générée par la photodissociation du dioxyde de carbone. Le réchauffement de l'atmosphère par des gaz à super-effet de serre inertes, et peut-être aussi par un miroir en orbite (la proposition soletta du scientifique Krafft Ehrlicke), libérera le dioxyde de carbone et l'eau du sol martien, accroissant ainsi la température et la pression atmosphérique. Bien que la vapeur d'eau soit un puissant gaz à effet de serre qui puisse détruire l'ozone, on croit qu'un équilibre sera atteint entre les deux processus, ce qui pourrait être facilité en ajoutant des gaz à super-effet de serre.

soixante ans.

Marinova a calculé qu'il faudrait approximativement déployer quarante centrales nucléaires de 700 MW pendant une période de cent ans sur Mars pour permettre la production de la quantité de gaz à super-effet de serre nécessaire à la phase *ecopoiesis* de ce projet.

On ne connaît pas la quantité totale de dioxyde de carbone qui peut être libérée dans l'atmosphère de Mars, ni précisément combien de temps cela prendra. Certains pensent, explique Margarita Marinova, que l'effet de serre galopant pourrait aboutir à une pression se situant entre 0,5 et 1 bar (entre 0,5 et 1 pression atmosphérique terrestre). Pour Chris McKay, le premier niveau correspond à un Mars « pauvre » et le deuxième à un Mars « riche ».

Mais après moins d'un siècle, même si les niveaux de pression atmosphérique étaient inférieurs à ceux existant sur Terre, on pourrait marcher sur la surface de la planète en portant seulement des vêtements chauds et un masque à oxygène. Les microbes se seront déjà établis sur Mars. Avec l'addition d'oxygène et de nitrogène, les plantes se développeront et l'humanité aura accompli la première étape du processus permettant d'avancer le long de ce que

le géologue Martyn Fogg appelle le « *sentier menant de la stérilité à des états habitables en constante amélioration* ».

Vers la terraformation

L'étape de terraformation sera caractérisée par l'activation de l'hydrosphère et la création d'une atmosphère qui soit respirable pour les animaux et les humains – un climat habitable sur Mars.

Une température martienne plus élevée, nécessaire à la libération du dioxyde de carbone, aura comme importante conséquence d'accroître la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère, favorisant le mécanisme de feed-back naturel, ce qui accélérera le processus de réchauffement de la planète. Cependant, même une fois que l'effet de serre galopant aura été accompli, Mars sera encore un habitat assez froid et sec. Faire fondre la glace du permafrost, pour permettre à l'eau de couler à nouveau dans les canyons et les lits de rivières qu'elle avait creusés dans un lointain passé demandera des efforts herculéens. Sans ces efforts, nous devons attendre des siècles

avant d'avoir une atmosphère suffisamment chaude.

Il est vrai que pour libérer l'eau, il serait possible de réchauffer davantage la planète grâce à l'impact d'astéroïdes à sa surface, mais cette technique sera difficilement applicable une fois que l'on aura introduit des organismes vivants. L'ingénieur aérospatial Robert Zubrin et McKay estiment aussi que l'utilisation d'explosions nucléaires souterraines, telle que proposée par la méthode du Projet Plowshare, rendrait la planète radioactive à des niveaux inacceptables. Cependant, on pourrait envisager des explosifs (à fusion) thermonucléaires à cycle de combustible avancé qui ont peu de sous-produits radioactifs. Zubrin et McKay insistent sur le fait que la terraformation de Mars pourrait bien être un vecteur de recherche pour les technologies de fusion, celles-ci étant également indispensables pour les voyages interstellaires. En effet, une propulsion reposant sur la fusion permettrait des vols sûrs et rapides vers Mars.

Cependant, la tâche la plus exigeante pour la terraformation de Mars sera de transformer une atmosphère riche en carbone en une atmosphère de nitrogène riche en oxygène similaire à la nôtre.

Comme Vernadski le souligne, la vie dans la biosphère a comme caractéristique fondamentale d'être un « processus planétaire ». McKay fait écho à cette vérité en disant : « *Le seul mécanisme qui pourrait transformer la totalité de l'atmosphère est un processus biologique planétaire – la photosynthèse effectuée par les plantes qui absorbe du dioxyde de carbone et rejette de l'oxygène.* »

Le microbiologiste Julian Hiscox a longuement étudié la terraformation et la biologie du génie planétaire. Il parle d'« organismes pionniers » pour décrire la vie microbienne initiale qui pourra être introduite sur Mars lorsque les conditions ressembleront à celles de l'Antarctique. A la fin de la période d'effet de serre galopant, il devrait y avoir une libération de dioxyde de carbone, un accroissement de la pression atmosphérique et l'eau devrait être stable au moins dans certaines niches. Hiscox explique que ces organismes primitifs devront être psychrophiles, c'est-à-dire qu'ils pourront survivre à une température située entre 288 K

et 293 K. Ils seront capables d'utiliser la lumière solaire comme source d'énergie mais n'auront pas besoin d'un matériel organique complexe pour le métabolisme.

Hiscox propose d'entreprendre des travaux de génie génétique dans un environnement martien simulé, afin de créer des organismes qui pourront résister à la dessiccation (sécheresse) que l'on s'attend à voir perdurer sur Mars. Des expériences utilisant ces « enceintes martiennes » peuvent préparer la voie pour l'introduction de « microbes martiens » conçus génétiquement. Avant que l'on introduise des plantes, on peut utiliser des micro-organismes pour réussir à transformer les corps « bio-inertes » de Mars, de façon à pouvoir modifier la biosphère de l'intérieur par l'utilisation de matière vivante. Les « organismes pionniers » seront utilisés pour libérer le dioxyde de carbone des dépôts de carbonate dans le sol, ce qui accroîtra la température et la pression atmosphérique, et pour métaboliser les dépôts de nitrate afin de créer des gaz à effet de serre – méthane et ammoniac – de telle sorte que l'on augmente les gaz à super-effet de serre artificiel introduits par l'homme. Ces étapes préliminaires poseront les bases pour l'introduction de plantes productrices d'oxygène sur Mars.

Accélérer la vie

Si l'on considère que l'efficacité des plantes pour produire de l'oxygène à partir de la lumière solaire est de seulement un centième de 1 %, on peut comprendre que si elles étaient le seul moyen utilisé cela prendrait plus d'un million d'années pour transformer l'atmosphère martienne de dioxyde de carbone en une atmosphère respirable. Bien que cela semble très long, McKay nous rappelle de garder en tête que le même processus a pris plus de deux milliards d'années sur Terre.

L'intervention humaine peut accélérer cette transformation planétaire et la rendre possible en cent mille ans.

Dans la première étape pour créer une atmosphère riche en oxygène, Zubrin et McKay proposent l'utilisation de la « force brute », c'est-à-dire que l'on ait recours à

des térawatts de puissance sur des « matériaux cibles » appropriés contenant des oxydes dans le sol afin de libérer de l'oxygène. Ils estiment qu'après vingt-cinq ans, on pourra atteindre le 1 mbar d'oxygène atmosphérique nécessaire pour accueillir des plantes supérieures. A ce point, l'épaississement de l'atmosphère et le climat plus tempéré permettraient l'introduction de plantes génétiquement modifiées, sélectionnées naturellement en fonction de leur capacité à s'adapter au sol martien et leur capacité de réaliser la photosynthèse plus efficacement que les espèces présentes sur Terre.

Sur une période de quelques décennies, la planète pourrait être couverte de plantes qui produiraient l'équivalent d'une source de puissance productrice d'oxygène d'environ 200 TW. Ils pensent que si l'on ajoutait à cela environ 100 TW de puissance (la civilisation terrestre aujourd'hui utilise à peu près 12 TW), il faudrait environ neuf cents ans pour obtenir 120 mbars d'oxygène atmosphérique nécessaires pour un environnement dans lequel l'homme puisse vivre – il pourra alors ouvrir les fenêtres de sa maison sur Mars, respirer l'air et contempler directement le monde qu'il aura créé.

Et Mars ne sera que la première étape. L'objectif que Oberth proposait à l'humanité – « *rendre tous les mondes habitables* » – sera dès lors possible. Comme Zubrin et McKay le disent : « *Ce qui est en jeu, en fin du compte, c'est un univers infini de mondes habitables.* » ■

Références

Martyn Fogg, 1998. « Terraforming Mars : A Review of Current Research », *Adv. Space Res.*, p. 415.

Julian A. Hiscox, 2000. « Biology and the Planetary Engineering of Mars » in *Case for Mars VI*, AAS Science and Technology Series, ed. K.R. McMillen.

Margarita Marinova, Christopher McKay et Hirofumi Hashimoto, 2000. « Warming Mars Using Artificial Super-Greenhouse Gases », *JBIS*, Vol. 53, p. 235.

Margarita Marinova, Entretien, 23 octobre 2000.

Christopher P. McKay, 1999. « Bringing Life to Mars », *Scientific American Presents (Mars)* <http://www.sciam.com/1999/0399space/0399mckay.html>.

Robert Zubrin et Christopher McKay, 1997. « Technological Requirements for Terraforming Mars », *JBIS*, Vol. 50, p. 83.