



La terraformation

QU'EST-CE QUE « TERRAFORMER » ?

L'homme a depuis déjà plusieurs décennies entamé sa conquête de l'espace. Le progrès technologique ne cessant jamais et l'homme continuant à rêver, des projets de plus en plus extraordinaires, qui relevaient auparavant de la science-fiction peuvent devenir envisageables dans un futur plus ou moins proche.

C'est le cas du concept de « terraformation », mot provenant de l'anglais « terraforming » et qui consiste à vouloir modifier les caractéristiques d'une planète afin de la rendre habitable pour l'homme. Le terme officiel équivalent en langue française est celui d'« écogenèse » ou de « biosphérisation ».

Le problème bien connu qui s'oppose à la colonisation de l'espace est l'environnement (température, oxygène, gravité, etc.). Deux solutions s'offrent alors à l'humanité : soit l'on décide d'adapter l'homme à son environnement, soit de modifier l'environnement afin de l'adapter à l'homme.

Dans le premier cas, le concept de terraformation fait partie des nombreuses possibilités que les scientifiques auront à explorer dans l'avenir, et il comporte l'avantage intéressant de permettre de se déplacer et d'agir dans l'espace sans davantage de contraintes qu'il n'y en a sur la Terre. On pourrait également préférer coloniser l'espace par des stations spatiales.

Dans le second cas, les possibilités seraient de modifier l'homme lui-même, soit génétiquement à travers son ADN, soit en recourant à l'électronique et aux nanotechnologies. Celles-ci pourraient permettre de ne plus avoir besoin d'oxygène par exemple. Mais les raisons et les avantages de la biosphérisation sont nombreux et variés :

- La population de la Terre augmente sans cesse, et certains pays sont d'ores et déjà contraints

de recourir à une limitation des naissances (exemple de la Chine). La terraformation pourrait permettre d'acquiescer de nouveaux espaces habitables pour l'homme.

• Le manque et la recherche de nouvelles sources d'énergie constituent également un argument de poids en faveur de ce concept. On peut ajouter à cela la possibilité de propager la vie à travers l'univers, l'augmentation des connaissances humaines par l'étude de nouvelles planètes et la découverte de nouveaux matériaux, ainsi que la préservation de l'humanité face à une éventuelle menace majeure résultant d'un cataclysme (le fameux exemple de l'astéroïde percutant la Terre) ou en raison d'une pollution importante due aux activités humaines.

LA RECHERCHE DE PLANÈTES « TERRAFORMABLES »

Lorsque la décision d'appliquer le principe de la terraformation aura été prise, il faudra que les scientifiques fassent le choix d'une planète « test ». Les distances dans l'espace restent relativement énormes à notre échelle, le choix se portera vraisemblablement sur une des planètes de notre système solaire. Ces planètes sont au nombre de huit : Vénus, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune, Mars, Mercure, La Terre. Auxquelles on peut ajouter certains de leurs satellites, pour leurs caractéristiques similaires : Europe, Titan...

Il s'agira de rechercher les planètes les plus simples à transformer en fonction de leur distance avec la Terre et de leurs caractéristiques propres : différence de température et de pression, présence ou non d'une atmosphère, gaz présents, éventuelle dangerosité au sol (certaines planètes subissent de gigantesques tempêtes de sable ou de vent, bien plus violentes que celles rencontrées sur Terre).

Afin de sélectionner les planètes intéressantes pour la biosphérisation, nous allons définir

dans un premier temps les facteurs nécessaires à la vie.

COMPOSITION DE L'ATMOSPHÈRE

Le dioxygène est un corps gazeux diatomique (O₂) nécessaire à la respiration, constituant en volume un cinquième de l'**atmosphère terrestre**. La respiration est vitale



pour la survie des cellules et donc pour l'organisme car elle permet la production d'énergie et l'élimination des toxines. L'organe le plus sensible au déficit de dioxygène est le système nerveux. Un taux acceptable pour l'organisme correspond à un pourcentage de dioxygène dans l'air respiré d'environ 20 %.

LA TEMPÉRATURE

L'organisme humain a besoin d'une certaine température pour vivre, elle doit être comprise entre -3 et 40 °C en moyenne. On trouve en effet au sein de l'organisme des enzymes (les biocatalyseurs), qui sont des substances organiques ayant pour but d'accélérer des réactions chimiques utiles au corps humain, comme lors de la digestion. Ces enzymes dépendent des conditions extérieures que sont le pH (l'acidité du milieu) et la température. On peut observer l'influence de la température sur les enzymes organiques sur le graphique ci-contre.

LA PRESSION

Une pression atmosphérique comparable à celle de la Terre est indispensable pour obtenir une pression d'oxygène suffisante pour la respiration.

LA PRÉSENCE D'EAU LIQUIDE

Si la Terre est la seule planète habitée du système solaire, c'est grâce à l'eau qui est le constituant essentiel du vivant.

Une température adéquate (au-dessus de 0 °C sur Terre) et une pression atmosphérique suffisante permettent à l'eau de rester sous forme liquide.

Selon les avis de différents scientifiques, la « fenêtre spatiale » dans laquelle l'eau peut se rencontrer à l'état liquide varie de 0,95 à 1,5 U.A. (distance moyenne terre-soleil) pour les planètes du système solaire.

Les études actuelles tendent à prouver que Vénus, la Terre et Mars

Récapitulatif des caractéristiques et comparaison Terre-Mars

	TERRE	MARS
Distance à l'aphélie	152,1 millions de km	249,13 millions de km
Distance au périhélie	147,1 millions de km	206,7 millions de km
Diamètre équatorial	12756 km	6794 km
Masse	59,75 · 10 ²¹ milliards de tonnes soit 1 masse terrestre	6,418 · 10 ²¹ milliards de tonnes soit 0,107 masse terrestre
Période d'une rotation (une journée)	23 h 56 min 4 s	24 h 37 min 23 s
Période de révolution (durée de l'année)	365,256 jours	686,98 jours
Inclinaison sur l'écliptique	0°	1,85°
Excentricité	0,0167	0,0934
Température moyenne	+15 °C	-53 °C
Atmosphère	Azote (78%), oxygène (21%), argon (0,9%), autres (0,1%)	Gaz carbonique (95,3%), azote (2,7%), argon (1,6%), oxygène (0,13%), autres (0,1%)
Satellites	Lune (3476 km de diamètre)	Phobos (18 km x 22 x 28) Deimos (10 km x 12 x 16)
Période de rotation (satellites)	29 jours	Deimos : 61 h 08 min Phobos : 5 h 52 min

avaient initialement des atmosphères similaires riches en CO₂ et en vapeurs d'eau.

PROTECTION CONTRE LES PARTICULES COSMIQUES

Le champ magnétique représente une véritable ceinture protectrice contre les particules de haute énergie projetées par le soleil. Comparativement, Vénus est dépourvue de champ magnétique et Mars présente un champ très faible. La présence de ce champ magnétique interagit avec les gaz ionisés représentant l'état plasma et provoquent un rempart contre les particules de haute énergie projetées par le Soleil. Outre le champ magnétique, la protection contre les rayonnements électromagnétiques s'effectue grâce à la présence d'ozone dans la haute atmosphère de la Terre, qui est un excellent bouclier contre ces rayonnements de haute énergie.

RÉCAPITULATIF

On peut résumer d'après ce que l'on vient de voir que la présence de vie est due au fait que :

- La Terre est suffisamment volumineuse pour retenir une atmosphère ;
 - elle se trouve à la bonne distance du Soleil (température) pour avoir de l'eau liquide ;
 - l'atmosphère contient du dioxygène en concentration suffisante.
- Après comparaison de ces

principaux éléments, on distingue généralement des autres Vénus, Mars, Europe et Titan. Mais celle qui apparaît comme la plus proche de la Terre, et donc comme la plus simple à transformer est la planète Mars.

APPLICATION À L'EXEMPLE DE MARS

CONDITIONS ACTUELLES SUR MARS

La vie est actuellement impossible sur Mars, c'est une planète hostile où la température la plus basse peut atteindre -143 °C et où la température la plus haute ne dépasse pas 22 °C. La moyenne pour l'ensemble de la planète est de -53 °C. Cette faible température est en partie due à un éloignement plus important du soleil que pour la Terre (1,5 fois plus loin) et au fait qu'une grande partie des rayons solaires est réfléchi et renvoyée dans l'espace. En effet, elle ne conserve pas les rayons car les gaz à effet de serre, qui permettent de les absorber (ce sont les mêmes que ceux qui provoquent le réchauffement sur Terre, comme le dioxyde de carbone, ou CO₂) ne sont pas retenus dans son atmosphère en raison de sa très faible pression atmosphérique (160 fois moins que la pression terrestre avec seulement 6 millibars de pression). La rare atmosphère martienne est composée à 95 % de CO₂, elle est donc totalement irrespirable pour des êtres humains (notre air est composé à 21 % de

Conditions de vie

20 %
Taux de dioxygène dans l'air respiré acceptable pour un bon fonctionnement de l'organisme humain.

-3 °C à +40 °C
Fourchette de température compatible avec le vie humaine.

-53 °C
Température moyenne à la surface de Mars.

95 %
Teneur en CO₂ de l'atmosphère martienne.

160
La pression atmosphérique sur Mars est 160 fois plus faible que sur Terre.

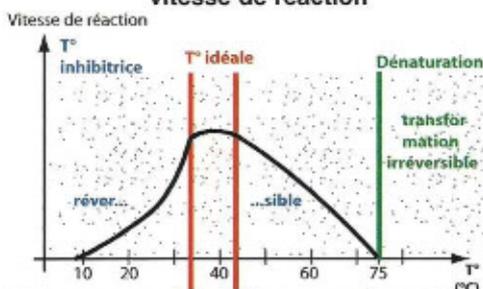
Entre 100 et 1 000 ans
Temps estimé pour terraformer Mars.

La planète Mars

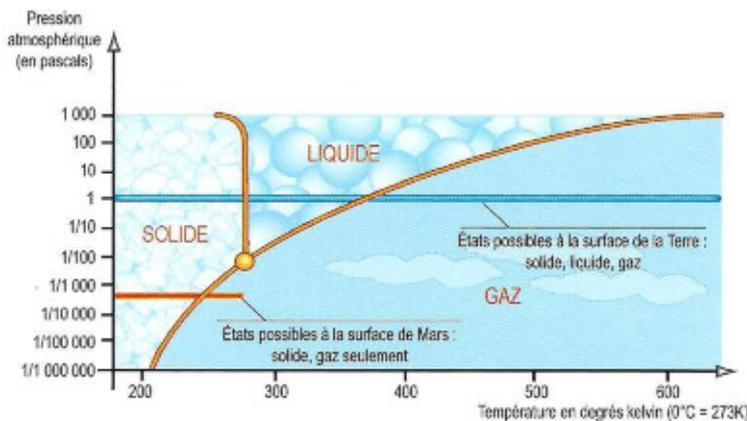


La planète la plus simple à terraformer

Action de la température sur la vitesse de réaction



États de l'eau à la surface de la Terre et de Mars



dioxygène et à 78 % d'azote). De plus, l'eau ne peut pas exister sous forme liquide pour les raisons de pression évoquées précédemment.

On voit sur ce graphique ci-dessus que les différents états de l'eau (solide, liquide, gazeux) ne dépendent pas uniquement de la température de celle-ci mais également de la pression à laquelle on la trouve. Attention aux unités de température : Les physiciens expriment généralement la température non pas en degrés Celsius mais en degrés Kelvin. Il faut savoir que 0 °C correspond à 273 degrés Kelvin.

La courbe bleue représente les états de l'eau à la pression terrestre (1 pascal) en fonction de la température. La courbe rouge représente les états de l'eau à la pression martienne en fonction de la température.

On voit bien qu'à la faible pression martienne, la courbe rouge ne traverse pas la zone liquide, car pour être liquide, l'eau demande un minimum de pression.

De plus, l'atmosphère de Mars ne protège pas suffisamment des ultraviolets ainsi que des rayons cosmiques. Or, ceux-ci sont extrêmement nocifs pour les êtres vivants.

Cependant, Mars reste relativement proche de la Terre avec laquelle elle partage de nombreuses caractéristiques communes :

L'inclinaison de leur orbite, leur vitesse de rotation, la nature du sol et sa composition, des saisons proches de celles de la Terre...

Tout ceci a pour conséquence qu'un jour martien est très proche d'un jour terrestre (24 heures 37 minutes et 22,7 secondes) ce qui permettrait une bonne adaptation des êtres vivants.

On trouve par ailleurs de nombreux reliefs à sa surface qui laissent supposer que la planète avait un climat plus chaud ainsi qu'une atmosphère plus dense et plus humide. L'eau était alors présente et ruisselait pour former des rivières et des mers. On y trouve également des preuves de volcanisme intense et d'usure par les vents.

En plus de ses caractéristiques passées plus qu'encourageantes, il se trouve que Mars a conservé la majorité de ses réserves de CO₂ et d'eau, que l'on sait contenues sous forme de glace dans les calottes polaires et le sol.

Les nouvelles expéditions des sondes spatiales d'observation (**Mars**

express) ont en effet démontré que la



calotte sud est en fait une calotte de glace d'eau et qu'il y a bien une fine couche de CO₂ solide d'une dizaine de mètres d'épaisseur par dessus.

Le sol (régolithe) martien est composé à 50 % d'oxygène, 20 % de silicium, 1 à 4 % de fer et de 2 à 7 % d'aluminium. La différence avec la Terre est la teneur du sol en fer, qui est trois fois plus importante sur Mars.

L'homme, de par son activité modifie profondément son environnement. Selon les situations, son action peut-être considérée soit comme positive (aménagement d'espaces habitables, parcs, constructions, lacs artificiels) soit comme négative (pollution des cours d'eau, de l'air et du sol, effet de serre, déforestation). Il est bon signe de constater que par un amusant paradoxe, les effets des actions humaines sur l'environnement considérées comme mauvaises sur Terre pourraient devenir utiles dans le cas de la terraformation. On va effectivement chercher à modifier le climat d'une planète.

Résumons les trois raisons principales qui sont défavorables à la vie sur Mars :

- des conditions de température et de pression incompatibles avec la formation d'eau liquide ou la vie humaine à l'air libre ;
- une atmosphère riche en CO₂ mais très ténue (6 mbar) ce qui implique un effet de serre peu important et une faible protection contre les rayons nocifs du soleil ;
- un manque d'oxygène dans l'atmosphère empêchant toute vie aérobie.

LES ÉTAPES DE LA TERRAFORMATION

Maintenant que nous connaissons l'état de la planète que nous souhaitons transformer, voyons, dans l'ordre, les différentes étapes de la terraformation qui répondront à ces problèmes

Élévation de la température et de la pression

La première étape serait d'engendrer un « effet de serre » sur Mars afin de

réchauffer son atmosphère. Or, nous avons vu que Mars est riche en gaz carbonique (CO₂). C'est un gaz capable de piéger efficacement la chaleur, très connu sur Terre pour être responsable du réchauffement de la planète. Le but serait de réchauffer les pôles afin qu'ils libèrent le dioxyde de carbone contenu dans les calottes dans l'atmosphère martienne. Celle-ci se densifiera alors et se réchauffera en retenant davantage les rayons et donc la chaleur solaire.

Une fois le mécanisme enclenché, ce n'est ensuite qu'un effet « boule-de-neige » car plus l'atmosphère de la planète se réchauffe, plus elle deviendra dense et plus elle se réchauffera encore. Le processus se poursuivra jusqu'à l'épuisement du gaz carbonique contenu dans le sol. On considère que le sol martien a pu absorber jusqu'à 20 % de son poids en CO₂ en 2 ou 3 milliards d'années ce qui offre de belles perspectives.

On considère qu'une hausse de 4 °C suffirait pour initier le processus. Quels sont les moyens utilisables pour réchauffer les pôles ?

Le premier projet avancé est un miroir positionné à 200 000 km de la planète et large de 250 km qui permettrait de réfléchir la lumière solaire pour réchauffer de 5 °C les régions contenant le CO₂ et l'eau.

D'autres scientifiques ont proposé de recouvrir le pôle Sud de poussières noires qui absorberaient mieux la chaleur solaire et feraient fondre la glace (le noir absorbe tandis que le blanc réfléchit la lumière).

Une autre idée très prometteuse serait l'introduction de chlorofluorocarbonates (ou CFC) dans l'atmosphère. Ces gaz induisent un effet de serre dix mille fois plus important que le réchauffement de Mars (CO₂). De plus, ils ne sont pas dangereux pour l'homme. Les principaux gaz à effet de serre sont la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, le méthane, l'oxyde nitreux, l'ozone et les halocarbures. Ces gaz à « effet de serre » empêchent la chaleur du soleil de s'échapper en absorbant les radiations infrarouges réfléchies par la planète et évitent ainsi qu'ils ne soient renvoyés dans l'espace. Ces gaz ont une longue durée de vie, ce qui permettra d'agir sur le long terme sur le réchauffement de Mars :

- dioxyde de carbone : 100 ans
- méthane : 12 ans
- protoxyde d'azote : 120 ans
- halocarbures : jusqu'à 50 000 ans

Introduction du cycle de l'eau (Hydrosphère)

Une fois que la température et la pression auront atteint un niveau suffisant, il sera alors possible de relancer le cycle de l'eau sur la planète. On s'intéressera alors aux **calottes polaires**, dont on estime le contenu en



glace d'eau à 5 trillions de tonnes. De plus, la sonde Mars Odysée a détecté que l'eau serait également présente en grande quantité sous forme de glace dans le sous-sol martien sous forme de pergélisol ou de permafrost. Après échauffement, la vapeur d'eau libérée contribuera par ailleurs à l'effet de serre et à l'augmentation de la température.

Lorsque l'eau se répandra à la surface de la planète, un immense océan recouvrira l'hémisphère nord et les cratères de l'hémisphère sud se rempliront pour former de grands lacs.

Développement de bactéries et d'algues sur la surface de Mars pour « fabriquer » de l'oxygène (Biosphère)

À ce stade, la température sur Mars aura fortement augmenté et le cycle de l'eau aura été réintroduit. Le problème suivant qui se pose à la vie humaine sera l'énorme taux de dioxyde de carbone dans l'air.

Effectivement, l'être humain est aérobie c'est-à-dire qu'il a besoin de dioxygène dans l'air pour pouvoir respirer. C'est également le cas de la plupart des animaux sur Terre.

Il faudra alors faire appel dans un premier temps à des organismes vivants anaérobies et à des végétaux qui vont transformer, comme ils le font déjà sur Terre, le CO₂ en dioxygène. Ces organismes seraient des bactéries particulières, les cyanobactéries. En voici deux sortes :

- *Chroococcidiopsis* est une bactérie capable de survivre dans des conditions extrêmes d'aridité continue, ainsi qu'à des températures très basses ou très hautes. Elle est relativement commune dans les régions désertiques et sèches, et vit dans des petites coquilles protectrices et transparentes qui agissent à la fois comme cage à moisissures et à UV.

- *Deinococcus Radiodurans* est une bactérie possédant une résistance impressionnante aux UV et aux radiations ionisantes, grâce à sa structure cellulaire sur plusieurs couches et à un système de réparation de l'ADN très perfectionné. Elle est si résistante qu'il est possible de la retrouver dans les eaux de refroidissement des réacteurs nucléaires.

Ces cyanobactéries permettraient d'augmenter la teneur en dioxygène de l'air jusqu'à un niveau acceptable pour certains végétaux, comme les mousses, lichens et algues que l'on peut modifier génétiquement pour qu'ils résistent bien aux conditions environnementales

martiennes. Ces végétaux produiront également de l'oxygène et lorsque le niveau sera suffisant, d'autres végétaux plus importants pourront être introduits, comme des arbres.

Habitation par l'homme et des animaux

À ce stade, les trois conditions nécessaires à la vie seront établies (température, pression et oxygène), Mars sera complètement terraformée et habitable pour l'homme. On pourra y introduire des animaux.

NOTIONS DE TEMPS, DE BUDGET ET DE TECHNOLOGIE

Maintenant que nous avons vu tous les moyens à notre disposition pour modifier les caractéristiques d'une planète, ainsi que la manière de les mettre en œuvre, il est intéressant de se demander combien de temps cela va prendre. Et bien les estimations pour terraformer Mars varient entre une durée nécessaire de 100 ans (hypothèse optimiste) et 1 000 ans (hypothèse pessimiste).

On estime pouvoir faire augmenter la pression en oxygène de 1 mbar en 25 ans à l'aide d'ingénierie lourde, ou en 100 ans grâce à l'action des bactéries. La durée de la première étape, consistant à atteindre une pression de 120 mbar en oxygène pourra donc être très longue.

On suppose qu'au bout d'un siècle, les hommes pourront se déplacer à la surface à l'aide d'un simple masque à gaz, sans combinaison pressurisée ou chauffante. Et après une période comprise entre 100 et 1 000 ans, il sera possible de faire vivre des plantes lourdes de type arbre.

Ensuite, en termes de budget, l'investissement serait bien entendu colossal, à l'échelle du travail à fournir. On peut chiffrer le montant en centaines de milliards d'euros. Étant donné la difficulté de financement des programmes spatiaux (seule l'Europe avec **Ariane**, ou les États-Unis, et



maintenant la Chine peuvent se permettre de payer les montants nécessaires), une coopération internationale sera attendue.

Néanmoins, tout peut arriver. La technologie évolue de manière exponentielle et un saut technologique est toujours possible. De plus, un désastre écologique, ou un besoin urgent de nouvelles sources d'énergie peuvent accélérer les choses.

On peut également imaginer dans le cas contraire, que des événements viennent contredire la biosphérisation de planètes. Par exemple, le fait de modifier les conditions environnementales pourrait réveiller accidentellement des micro-organismes extrêmement dangereux pour l'homme et viendraient également détruire les espoirs de recherche concernant la vie passée sur Mars.