

# L'HUMANITE HORS DU BERCEAU, OU EXPLORER, POURQUOI ? COMMENT ?



Sous la direction de  
**VLADIMIR PLETSER**  
**GUERRIC de CROMBRUGGHE**  
**INNOVASPACE BOOKS**

**L'HUMANITE HORS DU BERCEAU,  
OU EXPLORER, POURQUOI ? COMMENT ?**

**Sous la direction de Vladimir Pletser et Gueric de Crombrughe**

**Copyright © 2021 Les auteurs**

Tous droits réservés. Ce livre ou toute partie de celui-ci ne peut être reproduit ou utilisé de quelque manière que ce soit sans l'autorisation écrite expresse de l'éditeur sauf pour l'utilisation de brèves citations dans une critique de livre.

**Publié par InnovaSpace Books** [www.innovaspace.org](http://www.innovaspace.org)

**Première édition E-Book: Janvier 2021**

**ISBN E-book: 978-1-8382283-0-9**

## Introduction

Le titre fait référence à la phrase de Tsiolkovsky, l'érudit russe du début du XXème siècle, « La Terre est le berceau de l'humanité, mais personne ne reste jamais longtemps au berceau ».

L'ouvrage se présente comme une succession de cartes blanches ayant pour thème le sens de l'exploration, et en particulier de l'exploration spatiale.

L'idée est de fournir un panel de réponses à la question suivante : les humains ont-ils réellement ce besoin, cette envie d'explorer ? Si oui, à quel prix ? Peut-on tenter d'expliquer cette soif d'aventure et de nouveauté ? Au-delà des arguments économiques et sociologiques, quelle est la part de poésie, de romantisme, et de fantaisie ? Le rôle central de la littérature, et de la poésie en particulier, sera inévitablement présent en filigrane tout au long de l'ouvrage. Car l'exploration spatiale est avant tout une entreprise poétique.

Onze intervenants sont choisis du monde scientifique et technique, et de l'univers des arts et lettres. Le choix est laissé aux auteurs aussi bien par rapport au fond qu'à la forme des contributions, un essai, un poème, ou une fiction. Les équations sont tout simplement bannies.

Explorer, une activité humaine ? Voyez par vous-mêmes.

## **Table des Matières**

[Avant-propos- Dirk Frimout](#)

[Atacama, récit d'une exploration- Caroline Corbasson](#)

[L'appropriation du cosmos, une nécessité- Dominique Tilmans](#)

[L'exploration et l'explorateur- Frank De Winne](#)

[Celui qui reste, celui qui part- Jean-François Mayence](#)

[Habitabilité dans le système solaire et ailleurs- Véronique Dehant](#)

[Mars 2034- Vladimir Pletser](#)

[Voyager dans l'espace-Yaël Nazé](#)

[Les évènements du 7 avril 2008- Gueric de Crombrugghe](#)

[La tâche du chercheur- Olivier Chazot](#)

[L'exploration mathématique en questions- Dominique Lambert](#)

[Explorations \(triptyque\)- Stephanie Roland](#)

## Avant-propos

Dirk Frimout

*Premier astronaute belge*

L'atterrissage sur la lune, il y a 50 ans, est le début d'une nouvelle ère dans l'histoire de notre Terre : le premier pas de l'homme sur un autre corps céleste est une étape importante pour l'humanité. C'était une extension de notre "bulle" de présence humaine dans l'univers. Aujourd'hui, 50 ans plus tard, nous avons commencé à nous préparer à la prochaine étape. Avant la fin de ce siècle, il semble que nous aurons une colonie sur la lune et sur Mars et nous serons impatients de poursuivre ces explorations.

Notre société a connu un bouleversement énorme depuis l'atterrissage sur la lune qui a été une incitation au développement explosif de la technologie et des sciences qui sont les moteurs d'une évolution rapide dans notre monde d'aujourd'hui.

Notre société est complètement différente d'il y a 50 ans. Gordon Moore, l'un des fondateurs de la compagnie Intel, un des plus grands fournisseurs de processeurs pour ordinateurs, a annoncé dans un essai en 1965 que le nombre de transistors qui peuvent être intégrés sur un support, double tous les deux ans. Nous appelons maintenant cette prédiction la 'loi de Moore'. Il ne s'agit pas d'une loi scientifique, mais d'une loi empirique. Cependant, cette prédiction est devenue vraie et s'applique encore aujourd'hui. Cette loi a été à la base de ce grand changement dans notre société.

La miniaturisation des ordinateurs nécessaires aux voyages spatiaux a rendu possible la digitalisation de la société. En conséquence, la communication à travers le monde est née et a cru via l'Internet et le smartphone, qui a fait de notre planète un "Village global". L'espace a joué un rôle majeur dans ce domaine et a également contribué à de nombreux domaines scientifiques. Depuis les premiers pas de l'Homme sur la lune, nous avons beaucoup appris sur notre univers. L'astronomie a pris une dimension différente grâce au télescope Hubble et à d'autres plates-formes spatiales.

D'autres domaines ont également évolué à la même vitesse. L'évolution technologique dans le monde médical est énorme. Les nouvelles technologies ont rendu possible le déchiffrement de l'ADN et l'imagerie par résonance magnétique, avec la Tomographie par Emission de Positron (ou PET scan) et l'échographie, contribuent à l'amélioration de nombreux diagnostics médicaux. En conséquence, l'espérance de vie humaine a augmenté.

Les nouvelles technologies ont fait en sorte que beaucoup d'outils que nous utilisons sont meilleurs, plus rapides et plus précis que l'être humain lui-même. Cependant, cela n'a pas rendu la vie ici sur Terre plus facile. Nous nous rendons compte que nos vies sont devenues plus agitées et trépidantes malgré, ou peut-être à cause des énormes possibilités de la technologie. Nous voyons que beaucoup de gens ne peuvent pas gérer le stress, que le corps ne peut pas toujours faire ce que l'esprit voudrait.

Il est clair déjà que les STEM (Science, Technologie, Ingénierie et Mathématique) resteront le moteur de l'évolution de notre société, mais bien sûr, notre société a besoin de plus. Elle a besoin d'harmonie, d'équilibre en incluant la culture et la détente.

Les voyages dans l'espace, et les voyages spatiaux habités encore plus, sont un sujet qui fascine beaucoup de monde. Les légendes sur les voyages dans l'univers ont existé depuis les temps anciens. Le ciel a toujours eu une influence majeure sur notre société. Tous les peuples de l'antiquité ont regardé les étoiles, le soleil et les planètes et ont essayé de comprendre leurs mouvements. Les astronomes ont

cherché les lois qui pourraient les expliquer. Ce fut le début d'une évolution qui, grâce au progrès technologique, a conduit aux premiers pas de l'homme dans l'univers.

Lentement, nous nous sommes forgé une idée de la dimension de l'univers, combien notre Terre est une petite planète dans cet espace quasi-infini avec des milliards d'étoiles et de planètes. Nous nous demandons quelle est notre place. Il ne serait pas compréhensible que notre planète soit la seule où la vie ait apparu et a évolué en 3,5 milliards d'années à l'homme tel que nous le connaissons aujourd'hui.

L'homme a toujours eu un besoin de chercher, d'explorer. C'est pourquoi nous cherchons si la vie peut exister ailleurs que sur notre Terre. Notre technologie est tellement avancée que nous pensons avoir maintenant les connaissances et les moyens de chercher la vie sur la planète Mars. Mars est une planète sœur de notre Terre : Mars et la Terre ont la même origine et une évolution similaire pendant 1 milliard d'années. Aujourd'hui, Mars est une planète stérile, mais dans le passé, Mars avait des conditions similaires à notre Terre. Si nous pouvons y trouver des traces de vie, il y a une forte probabilité que la vie ait pu apparaître aussi dans beaucoup d'endroits dans l'Univers, suite à une évolution naturelle. Espérons que cette recherche apportera une réponse aux questions essentielles que l'Homo Sapiens se pose, sur le but de la vie, sur notre origine et notre avenir.

L'exploration de l'espace est très fascinante. Elle fait rêver les jeunes et c'est un moyen de les motiver pour les disciplines STEM.

La recherche spatiale couvre beaucoup d'aspects. Par conséquent, les promoteurs de ce livre ont fait appel à des spécialistes de différentes disciplines, leur demandant de décrire ce que l'exploration signifie pour eux. Ce livre n'est pas destiné à être un livre scientifique en tant que tel, bien que beaucoup d'informations y soient données. Il rassemble les idées de personnes de différentes disciplines, ayant des approches différentes. Je tiens à féliciter les promoteurs d'avoir osé mettre ces approches ensemble.

La contribution de Vladimir Pletser, un des promoteurs de ce livre, prend place en 2034, lors d'une mission sur la planète Mars. Mais ce n'est plus une histoire de "Science-Fiction". Vladimir a acquis une grande expérience au cours de sa carrière à l'Agence spatiale européenne et sa participation aux simulations martiennes. Son histoire reflète les connaissances que nous avons aujourd'hui d'une mission vers Mars. On sait que ce sera un travail difficile. Aujourd'hui, il y a encore beaucoup de problèmes qui attendent une solution.

Mais le compte à rebours a commencé et dans un avenir proche, l'expansion de la présence de l'homme dans l'univers sur la planète Mars deviendra réalité.



# Atacama

## Récit d'une exploration

Caroline Corbasson

Artiste

- *Que cherches-tu, exactement?*

- *Si je le savais, je cesserais de chercher.*

\*

C'est précisément cela, explorer. Chercher à tâtons dans le noir, sans aucune garantie de trouver quoi que ce soit un jour. Qu'est ce qui nous pousse à entreprendre une telle quête, alors même que l'objet du désir demeure inconnu?

*Je me demande ce qui m'attire tant chez cette terre aride et hostile. Est-ce son silence, son apparente quiétude, en opposition au vacarme du monde? Le désert d'Atacama semble muet, figé tel un immense fossile, indifférent au passage du temps. Rien ne peut y vivre, et rien ne peut y mourir complètement.*

Une exploration prend racine dans l'imaginaire. Elle naît sous forme d'idée fixe, de virus, contaminant la pensée à l'infini tant qu'elle n'est pas réalisée.

*Il existe un endroit au milieu du désert, où, perchés sur une haute colline, des astronomes fouillent dans la poussière du cosmos, scrutent l'univers à la recherche de nos origines. À l'Observatoire Paranal, au Chili, un paysage de préhistoire vierge côtoie les plus hautes technologies de notre monde moderne.*

Le chemin serait le voyage.

*Paris-Santiago, vol de nuit. Le réel s'introduisait, chassant les phantasmes, et je sentais mon pouls s'accélérer. Il fallait faire le deuil de tout ce que j'avais imaginé, accueillir les dissonances, les décalages et les imprévus. Chaque minute de ce vol me rapprochait du réel, m'éloignant simultanément du rêve que j'avais fabriqué. Par le hublot, je regardais le ciel avaler la terre.*

*Je pensais à ce livre que j'aime tant, Le Mont Analogue, dans lequel une équipe d'explorateurs-alpinistes partent à la recherche d'une montagne imaginaire. Leur conviction et leur volonté de trouver cette montagne est si infaillible qu'ils finissent par la trouver.*

\*

La science est une lumière dans l'étendue aveugle, un périmètre éclairé. La zone gagnée du terrain, sa croissance donne l'illusion d'avancer, de repousser les barrières de cet enclos. En réalité, j'ai l'impression qu'il ne s'agit que d'une infime parcelle de terre cartographiée, flottant dans un épais brouillard informe et illimité. Une mouche minuscule posée sur un monstre gigantesque.

Comment accède-t-on à *tout le reste* ? Comment franchit-on les barrières de l'enclos ?

À dos de monstre, peut-être, armé de son imaginaire.



La série d'images qui suit s'intitule COLLAPSE. Elle a été réalisée d'après une photographie de la nébuleuse de la Tête de Cheval, capturée par le VLT à l'Observatoire Paranal (ESO).



## L'appropriation du cosmos, une nécessité.

Dominique Tilmans

*Sénatrice honoraire*

Douze statuettes du Tell d'Asmar, regard tourné vers le ciel, de leurs yeux immenses fixent l'invisible. Mains jointes sur le torse, hypnotisé par la voûte céleste, les adorants, dans une supplique pressante, tentent d'infléchir les divinités. Debout, corps crispé, lèvres serrées, d'eux émane l'angoisse de l'homme confronté au numineux, ce sentiment profond de la présence d'un ailleurs. L'organisation politique sumérienne est théocratique et économiquement encadrée de ziggurats, ces empilements de terrasses, ces tours de Babel permettant aux dieux de descendre sur terre. Les cieux sont envahis de dieux à l'image de l'homme. Il est impératif de servir ces dieux, et ainsi, se prémunir de leur courroux.

Au moyen âge, les chants liturgiques emplissent les églises de voix aériennes. Les cantiques de l'extase d'Hildegarde de Bingen poussent à la méditation, à l'adoration. Le mystique domine et englobe la voûte céleste et la société médiévale. Dieu a colonisé le ciel, la terre, la pensée et le savoir. La parole révélée et l'unicité de la vérité inondent l'espace chrétien, byzantin et musulman. L'univers s'est replié sur la terre et s'explique théologiquement. La société est encadrée de monastères, d'églises, de cathédrales. Le pouvoir politique est subordonné au religieux. L'homme a été créé par Dieu et à son image. Le ciel est son royaume, peuplé d'anges, de saints et d'âmes des élus. Face aux démons de l'enfer, il est nécessaire que l'homme se fasse pardonner de sa trahison, de sa faute originelle qui d'individuelle est devenue collective. La société doit prouver sa soumission à Dieu et à ses lois. Cette soumission est incontestable et il est nécessaire de le prouver au quotidien.

Ronde et héliocentrique, une hérésie pour les théologiens jésuites de l'église catholique romaine. La terre est le centre du monde, elle ne bouge pas. L'ancien testament est clair, l'interprétation du psaume 93 évidente : « Le monde est ferme, il ne chancelle pas ». Copernic, Galilée brisent le regard sur la terre, sur la perception du cosmos, pire sur l'approche scolastique de l'univers. La pensée évolue. Les hommes se radicalisent. La société devient violente. Par nécessité de justification, par besoin de sens, de nouvelles bases de raisonnement émergent. Il faut oser d'autres regards, il faut oser une révolution copernicienne. Les guerres de religion poussent à l'émigration. Les hommes se regroupent sur des bases conceptuelles. L'univers n'est plus géocentrique. L'approche scientifique éclot.

D'or et d'argent, de rouge et d'azur, les pavillons du haut des mats claquent sous la brise du vent du nord. Amsterdam accueille les flottes marchandes des villes du nord de l'Europe. La réforme et le rationnel se sont affranchis du carcan ecclésiastique. Les villes s'émancipent et veulent survivre. Venise, Brugge, Amsterdam rassemblent leurs ressources. L'homme ose la liberté d'entreprendre et franchit les limites admises. Les villes commerçantes créent le capital. Elles dominent les relations économiques et politiques. La navigation hauturière ouvre le monde à ceux qui disposent de la connaissance adéquate. Par nécessité, le ciel et la terre se cartographient. La voûte céleste est devenue utile, marchande. Elle devient symbole de richesse, de découvertes et d'aventures.

Bip-bip, bip-bip, bip-bip. Spoutnik, une petite sphère de 58 cm de diamètre est en orbite elliptique autour de la terre. Sa seule fonctionnalité est d'émettre un signal, un bip-bip. Véritable traumatisme politique en occident, le bip-bip marque la suprématie technologique de l'Union Soviétique. Nécessité faisant loi, pour des raisons de suprématie militaire, d'un bloc face à un autre, la conquête de l'espace

est ouverte. Les crédits budgétaires des états alimentent les programmes. La voute céleste est crevée. Elle n'est plus cette limite du monde réel, cette borne de l'univers accessible. Dans l'imaginaire collectif, l'espace remplace le ciel. Il se peuple de satellites, de navettes spatiales, de croiseurs intergalactiques, d'extraterrestres. Il est vrai que depuis Nietzsche, « Gott ist tot ». Le big-bang et son explication quant à l'origine et à l'expansion de l'univers a fait son œuvre.

Quel que soit l'époque, quel que soient les structures de pensée du moment, c'est toujours la nécessité qui pousse l'homme à mobiliser ses ressources, à innover. La curiosité le porte à comprendre. La connaissance lui donne des clés de lecture. Le savoir lui montre des pistes d'action. Mais c'est la nécessité qui le force à agir.

### L'homme, cet autre étourneau

En automne, à la tombée de la nuit, des milliers d'étourneaux forment dans le ciel une nuée, une masse compacte, un volume qui de façon aléatoire se transforme et se déplace. Le vol, coordonné en apparence, n'est que la résultante d'un système ou chaque unité cellulaire, chaque individu, chaque volatile réagit uniquement en fonction de ses voisins immédiats, suivant des règles comportementales élémentaires. L'étourneau n'a aucune perception du volume dans lequel il évolue, mais son comportement systémique lui assure sécurité.

Dans son attitude, dans son évolution, l'homme a de l'étourneau. Il évolue dans la société en fonction de ses voisins immédiats, voisin non dans le sens métrique, mais voisin dans un sens culturel. Loin du déterminisme religieux, loin du leadership stalinien, la nécessité pousse à agir et les choix posés correspondent à l'accessible.

Aujourd'hui, le spatial apparaît accessible et est envisagé comme un potentiel de développement. C'est une activité qui tire par le haut non seulement l'industrie mais aussi la recherche et par là les innovations technologiques, deux pans essentiels dans une économie particulièrement à l'heure où l'on cherche à retrouver une activité industrielle de pointe.

Par nécessité liée au besoin de croissance, ou à la faiblesse de rentabilité des actifs, à la contraction des débouchés, aux besoins de matière premières ou que ce soit par soif de découvrir, de multiples acteurs, institutionnels ou non, franchissent le pas du spatial. Ils s'y intéressent, ils s'y investissent, ils y investissent.

Le gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg vient d'ailleurs de signer un protocole d'accord portant sur l'exploration, l'utilisation et la commercialisation d'objets géocroiseurs tels que les astéroïdes.

Eh oui, de proche en proche, l'étourneau économique entraîne ses voisins vers le spatial, un secteur accessible à ceux qui disposent et disposeront de la maîtrise, des technologies, du savoir-faire et surtout du savoir.

Les technologies s'achètent, la maîtrise, le savoir-faire aussi. Le savoir quant à lui s'apprend, se transmet. Transmettre, épauler, convaincre nos étudiants à s'investir dans le secteur spatial, voilà un des défis de l'Europe en pleine mutation générationnelle car si l'on y prend garde, le « papy boum » qui déferle sur l'Europe risque d'assécher nos entreprises !

C'est l'ambition que s'est fixé *YouSpace*, encourager les relations interpersonnelles par le mentoring entre étudiants, *Young Professionals* et *Seniors Professionals*.

Notre volonté est de construire un vaste réseau belge d'abord, européen ensuite qui porté par un spirit fort donnera à la fois aux jeunes l'envie de bâtir leur propre avenir dans le secteur et aux entreprises la force de continuer à innover et entreprendre.

Domestiquer la lune, découvrir les océans de Titan, s'approprier les astéroïdes, établir une colonie sur mars, dompter l'enfer de Vénus, ouvrir l'espace au tourisme ne sont pas les titres d'un roman de Jules Verne, mais les objectifs de demain. En matière spatiale, nous ne sommes plus dans l'imaginaire de la littérature de science-fiction. Nous sommes entrés dans l'ère de l'accessible, du possible.

Regard tourné vers le ciel, nos yeux fixent l'invisible devenu accessible. Osons le spatial. Osons, nous y investir. A nous d'imaginer, de façonner, de construire notre propre Tell d'Asmar.

# L'exploration et l'explorateur

Frank De Winne – Été 2017

*Astronaute belge*

## L'exploration et l'explorateur

Il n'est pas facile de définir ce qu'est l'exploration. Selon moi, explorer c'est découvrir une destination de façon permanente ou semi-permanente avec une présence physique sur place, qui peut être robotique ou humaine. Dans ce cadre, une mission comme le télescope spatial Hubble est plutôt une entreprise scientifique que d'exploration. Il nous ramène en effet de superbes images des étoiles mais il ne se trouve pas sur place, et il n'y a donc pas d'exploration en tant que telle. Par contre, les efforts des différentes agences spatiales vers Mars s'apparentent bien plus à de l'exploration. Une mission comme Rosetta, qui a recueilli des données sur le noyau d'une comète, est entre les deux. Il y a bien une présence physique, mais pas de vision sur le long terme pour continuer à explorer les comètes, et encore moins celle-là en particulier.

La dimension sensorielle est également importante. Les hommes sont bien entendu les mieux placés pour rendre compte de cette expérience sensorielle eux-mêmes. Un astronaute qui revient de l'espace pourra aller à la rencontre des gens afin de transmettre son ressenti par rapport à ce qu'il a vécu. Également, un ingénieur qui a travaillé sur une sonde spatiale pourra transmettre son émotion lors de l'atterrissage de celle-ci.

Cela n'implique pas pour autant qu'il faille mettre de côté l'exploration robotique. La sonde Huygens qui a atterri sur Titan, un satellite de Saturne, était équipée d'un microphone qui a enregistré les sons de l'atmosphère. C'est donc une mission d'exploration puisqu'il y avait la présence physique du robot qui nous a ramené non seulement des images mais aussi des sons auxquels nous pouvons nous rattacher avec nos propres sens. Opposer l'exploration robotique et l'exploration humaine est un débat stérile : les deux sont complémentaires. Les robots sont essentiels pour découvrir de nouveaux endroits, apprendre à les connaître et les caractériser. Aussi, dans certains cas il est tout simplement impossible d'envoyer des êtres humains car l'environnement est trop hostile. A terme, toutefois, il faut que l'exploration se fasse avec des astronautes.

L'explorateur, c'est celui qui participe à ces programmes. Il ne s'agit donc pas uniquement de l'astronaute, mais bien de toutes les personnes impliquées, depuis l'ingénieur qui développe les systèmes d'atterrissages jusqu'au scientifique qui utilise les données enregistrées.

Même si l'industrie spatiale compte beaucoup d'explorateurs, je suis convaincu que ce besoin de découverte fait simplement partie de la nature humaine. Laissez un enfant dans une pièce avec quatre murs et une porte presque fermée, il ne mettra pas longtemps à l'ouvrir – même s'il ne sait pas encore marcher. C'est de l'exploration ! Les enfants sont tous des explorateurs. Les êtres humains naissent curieux, leur nature profonde est de chercher à découvrir ce qui se trouve de l'autre côté de la porte. Ce n'est que plus tard qu'ils s'en éloignent par peur de la difficulté, du risque, ou de l'inconnu.

En Europe il y a quatre objectifs généraux par rapport à l'exploration spatiale. D'abord l'innovation : développer de nouveaux systèmes et trouver des solutions à des problèmes inédits nous permet d'avoir un retour sur investissement. Ensuite il y a la science : à chaque fois que l'humanité a acquis de

nouvelles connaissances elle a fini par les exploiter pour améliorer la vie sur Terre. Une autre dimension importante est la coopération internationale : les programmes spatiaux sont ambitieux et ils requièrent donc de mettre en commun les ressources, ce qui permet de montrer que des Etats savent collaborer même s'ils entretiennent des conflits dans d'autres domaines (e.g. militaire, économique, diplomatique, etc.). Ainsi la Station Spatiale Internationale réunit les Etats-Unis, la Russie, l'Europe, le Japon, et le Canada. D'autres collaborations pourraient très bien se mettre en place dans le futur avec par exemple la Chine ou l'Inde. Enfin, le dernier objectif est l'inspiration. L'exploration spatiale permet de montrer aux jeunes ce qui peut être accompli en travaillant dur et en s'attachant à une vision. Cela les inspire à faire de leur mieux !

### Où explorer ?

Trois destinations sont en ligne de mire pour l'Europe : l'orbite basse autour de la Terre, la Lune, et Mars. L'orbite basse est acquise depuis le vol de Gagarine et exploitée de façon permanente, aujourd'hui avec la Station Spatiale Internationale et demain peut-être avec des entreprises privées. Le prochain objectif est la Lune. La Lune a été explorée brièvement lors du programme Apollo, mais c'était dans le cadre d'une course, pour planter un drapeau, sans réelle ambition à long terme. Il faut donc y retourner pour voir ce qui peut y être fait de façon permanente : de la science, peut-être de l'exploitation de ressources ? Ensuite viendra l'objectif ultime, Mars. Entre ces trois destinations, il y a une ligne continue.

Je suis certain de voir de mon vivant l'établissement d'une exploration durable de la Lune. Nous y consacrons une petite partie de notre travail, ici au Centre Européen des Astronautes. Nous nous interrogeons sur les besoins d'une base lunaire : comment produire l'électricité ? Comment se protéger des radiations ? Comment réguler l'atmosphère ? C'est une activité neuve et nous sommes donc à un niveau de maturité technologique de base, avec des études conceptuelles. Comme c'est un domaine nouveau, nous faisons appel à de nombreuses disciplines desquelles nous avons beaucoup à apprendre. Par exemple le secteur des énergies propres en sait plus que nous concernant la production, le stockage, et l'économie d'électricité. Les équipes qui travaillent sur la fabrication additive (c'est-à-dire l'impression 3D) peuvent nous aider à construire des habitats en utilisant des ressources locales comme le régolithe lunaire. Puisque l'on parle de présence à long terme, les bases ne peuvent plus être envisagées comme des laboratoires mais bien comme des bâtiments à vivre, ce qui requiert l'intervention d'architectes. Plus généralement, lorsque l'on parle d'électronique ce n'est plus le secteur du spatial qui est à la pointe, mais bien l'industrie des smartphones ou des jeux vidéo, qui ont des marchés beaucoup plus grands. Enormément de compétences sont nécessaires pour mener à bien l'exploration spatiale, pas seulement des ingénieurs et scientifiques.

Après la Lune, il y aura Mars. C'est une aventure qui demandera énormément de ressources. Cela prendra un peu plus de temps, surtout si l'initiative vient uniquement du secteur public. Néanmoins, peut-être que le secteur privé va également s'y mettre ? De nombreuses initiatives éclosent, non seulement par rapport à Mars mais aussi pour ce qui concerne le contact de potentiels extra-terrestres, comme ce projet de sondes interstellaires porté par Stephen Hawking. Je ne pense pas que le secteur privé ait plus ou moins de légitimité que le secteur public à mener l'exploration de nouveaux mondes. Certains peuvent y voir un problème à cause des valeurs qu'ils véhiculent, mais de toute façon ces mêmes valeurs changent d'une région à l'autre du monde. Les Etats-Unis, par exemple, véhiculent une forte ambition de leadership. Est-ce le message que nous voulons transmettre ?

Par ailleurs, l'espace n'est pas la seule frontière à explorer. Il y a aussi par exemple les océans, où il y a encore beaucoup de découvertes à réaliser. En élargissant la définition qui a été donnée de l'exploration, de nombreuses autres entreprises apparaissent. Il y a par exemple l'accélérateur de

particule du CERN, à Genève, qui explore l'infiniment petit. Dans ce cas, toutefois, les sens ne sont pas mis à contribution et il n'y a pas de présence physique.

### Les obstacles

Les 15ème, 16ème, 17ème siècles en Europe sont ceux de l'âge d'or des explorateurs avec de grands noms comme Vasco de Gama, Ferdinand Magellan ou James Cook. On peut toutefois remonter encore plus loin, par exemple avec l'exploration de la Méditerranée par les Phéniciens. Aujourd'hui, la situation a bien changé. La société contemporaine accepte de moins en moins le risque. Au moindre problème, on cherche les coupables et on discute de nouvelles règles à mettre en place pour éviter que le problème se reproduise. Chercher à diminuer le risque est une bonne chose, mais il ne faut pas que cela en devienne paralysant.

Gardons à l'esprit que le risque est une partie inhérente de l'exploration spatiale. L'espace est un environnement très hostile et il y a une grande part d'inconnu, qui comporte donc des dangers imprévisibles. Le risque d'échec pour le premier vol habité dans l'espace, Gagarine le 12 avril 1961, a été estimé à 50%. Pour le programme Apollo il était de 10%. Sur 12 missions habitées il y eu un échec total, Apollo 1, qui a entraîné la mort de trois astronautes, et le sauvetage in extremis de la mission Apollo 13. Pour la navette spatiale, le risque était d'à peu près 1,25%. Sur 135 vols habités en orbite, il y eu deux accidents dramatiques avec les conséquences que l'on connaît.

Or, même depuis ces missions, notre attitude face au risque s'est durcie. Si les règles de sécurité que nous avons aujourd'hui avaient été appliquées à l'époque du programme Apollo, nous n'aurions jamais été sur la Lune. Cette aversion du risque émane plus du niveau politique que de ceux qui font l'exploration spatiale. Les explorateurs, eux, sont conscients que ne pas réussir fait partie du métier quand on réalise des projets très ambitieux à la pointe de la technologie. Dès lors, les agences publiques sont capables d'accomplir de grandes choses mais n'y sont plus autorisées, par peur de l'échec. Il ne s'agit pas, bien entendu, de négliger les risques, mais plutôt de définir un niveau acceptable pour la société et qui permette en même temps d'accomplir de grandes choses. Si nous voulons retourner sur la Lune ou aller sur Mars, le monde politique doit réapprendre à accepter un certain niveau de risque, car cela ne se fera pas sans pertes humaines.

Cette constatation n'est pas seulement valable pour les vols habités, mais également pour l'exploration robotique. C'était par exemple visible lors de la troisième tentative infructueuse de récupération de fusée par SpaceX. La presse européenne prenait un angle très dramatique et les gros titres américains étaient assez mitigés, mais Elon Musk, le CEO de la compagnie, était beaucoup plus optimiste en disant sur les réseaux sociaux que le prochain vol aurait de bonnes chances de réussir. L'avenir lui a d'ailleurs donné raison. Il y a donc une grande différence d'attitude !

L'autre obstacle important de l'exploration spatiale est le coût qui lui est associé. Le budget de l'Agence Spatiale Européenne et de ses partenaires institutionnels était en 2016 de 5,25 milliards d'euros, dont 365,1 millions d'euros pour les vols habités. Celui de son équivalent aux Etats-Unis, la NASA, est pour la même année de 18,5 milliards de dollars, dont 8,51 milliards de dollar consacré aux vols habités. Nous sommes donc à la traîne en termes d'investissement. Or, l'objectif du traité de Lisbonne était de faire de l'Europe une économie basée sur la connaissance, avec 3% du budget de chaque gouvernement investi dans la recherche et développement. Je constate qu'on en est encore très loin. Je pense que l'Europe peut investir beaucoup plus pour créer de l'innovation, de l'emploi de haute qualité, et inspirer la nouvelle génération.

Ceci dit, il faut rester cohérent et réaliste. Il y a d'autres besoins sur Terre qui ne peuvent pas attendre alors que la Lune et Mars seront, elles, encore là pendant des millénaires entiers.



### Et le romantisme de l'exploration ?

L'exploration spatiale est pour le moment portée en grande partie par des scientifiques et des ingénieurs. Le scientifique pose des questions, l'ingénieur y répond. Avant d'établir une base sur la Lune, par exemple, le scientifique va se demander comment caractériser la radiation à la surface. Il fait de la recherche, définit l'environnement, son effet sur l'être humain, etc. Ensuite, utilisant ces résultats, l'ingénieur trouve une solution en se demandant comment se protéger de ces radiations. La science sert donc l'exploration, qui en retour va la nourrir.

Même si la plupart des ingénieurs et scientifiques qui travaillent dans le spatial sont poussés par leurs rêves ils n'ont pas le même pouvoir de partager leur expérience que des artistes. La dimension de ressenti, de sensoriel, de raconté, de partagé que j'évoquais il y a quelques paragraphes, et qui est propre à ma définition de l'exploration, pourra sans doute être encore mieux remplie par un poète ou un écrivain.

Aujourd'hui, un retour sur investissement en termes de science et technologie est demandé des astronautes. C'est pourquoi la plupart d'entre eux ont une solide formation de scientifique ou d'ingénieur. Si l'accès à l'espace devient moins coûteux, peut-être qu'un Ministère de la Culture achètera une place pour un artiste, en espérant avoir un retour sur investissement en termes culturels ? Cela vaudrait certainement la peine !

## **Celui qui part, celui qui reste...**

Quelques réflexions sur le rôle du juriste dans l'exploration spatiale

Jean-François Mayence

*Conseiller juridique*

*Dispersés à des milliers de kilomètres de leur origine kenyane,  
nos corps durent s'adapter aux parallèles, méridiens, cyclones,  
banquises et déserts de la Terre entière.  
Par ces traversées de l'espace du monde, par cette expérience première,  
nos corps portent en eux, stocké, ce temps, interminable,  
de sorties et de passages.  
Or, nous demandons à ceux des spationautes de réussir  
en quelques mois ce que nos ancêtres parachevèrent en ces cent mille ans.  
La longue marche des ères sans autre souvenir que ceux de nos tissus se réduit,  
ce matin, aux quelques secondes que dure l'arrachement à la pesanteur.*

Michel Serres, discours à l'occasion du 40ème anniversaire du CNES, Paris 2001

Quand on y songe, explorer est un acte à la fois instinctif et contre-nature pour l'être humain. C'est découvrir l'univers inconnu et, par là-même, se mettre en péril. C'est étendre son domaine de pouvoir, aussi minime fut-il, tout en abandonnant la sécurité et le confort de son habitat.

*Explorer: une liberté historique*

Rien d'étonnant donc à ce que les juristes, femmes et hommes de la permanence, soient particulièrement frileux et désarmés à l'idée de concevoir le droit en terra incognita. Quels repères, quelles références peuvent y être espéré(e)s ? Quelles constantes peuvent y être tenues pour vraies ? L'homme est-il toujours homme dans ce milieu essentiellement hostile ? Ses réactions sont-elles prévisibles ? Son bon sens fondateur résiste-t-il à l'épreuve ? Le droit existe-t-il encore dans l'immensité du néant ? Le droit survit-il à la solitude forcée de notre odyssee à travers l'espace ?

Les traités des Nations Unies ont répondu par l'affirmative en consacrant, l'un après l'autre, les principes directeurs de l'activité humaine au-delà de la sphère terrestre. L'explorateur reste soumis aux préceptes fondamentaux de notre civilisation globale, voire de nos réglementations les plus ponctuelles. Certains verront là une forme de droit naturel, d'autres les contingences prosaïques liées aux réalités du voyage. Car l'explorateur, au contraire du pionnier, a vocation au retour. Après avoir évolué hors de notre monde, il doit, tel Christophe Colomb devant Isabelle de Castille, rendre compte au pouvoir procureur, ramener la connaissance acquise de son périple au long cours, narrer l'aventure et surtout, concrétiser le rêve. Le retour au foyer a rappelé les grands navigateurs aux formalités bureaucratiques les plus matérielles : quarantaines, déclarations d'absence, factures en souffrance ou même formalités douanières (les formulaires d'importation d'échantillons lunaires remplis par la NASA au terme de quelques missions Apollo sont là pour en témoigner).

**GENERAL DECLARATION**  
(Outward/Inward)  
AGRICULTURE, CUSTOMS, IMMIGRATION, AND PUBLIC HEALTH

Owner or Operator ..... NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION

Marks of Nationality and Registration ..... U.S.A. Flight No. APOLLO 11 Date JULY 24, 1969

Departure from ..... MOON (Place and Country) Arrival at ..... HONOLULU, HAWAII, U.S.A. (Place and Country)

**FLIGHT ROUTING**  
(“Place” Column always to list origin, every en-route stop and destination)

PLACE	TOTAL NUMBER OF CREW	NUMBER OF PASSENGERS ON THIS STAGE	CARGO
CAPE KENNEDY	COMMANDER NEIL A. ARMSTRONG		
MOON	<i>Neil Armstrong</i>	Departure Place: Embarking ..... NIL Through on same flight ..... NIL	MOON ROCK AND MOON DUST SAMPLES ..... Cargo Manifests Attached
JULY 24, 1969 HONOLULU	COLONEL EDWIN E. ALDRIN, JR. <i>Edwin E. Aldrin, Jr.</i>	Arrival Place: Disembarking ..... NIL Through on same flight ..... NIL	
	<i>Michael Collins</i> LT. COLONEL MICHAEL COLLINS		

**Declaration of Health**  
Persons on board known to be suffering from illness other than airsickness or the effects of accidents, as well as those cases of illness disembarked during the flight:  
NONE

Any other condition on board which may lead to the spread of disease:  
TO BE DETERMINED

Details of each disinsecting or sanitary treatment (place, date, time, method) during the flight. If no disinsecting has been carried out during the flight give details of most recent disinsecting:

Signed, if required .....  
Crew Member Concerned

For official use only  
HONOLULU AIRPORT  
Honolulu, Hawaii  
ENTERED  
*Ernest S. Mura*  
Customs Inspector

I declare that all statements and particulars contained in this General Declaration, and in any supplementary forms required to be presented with this General Declaration are complete, exact and true to the best of my knowledge and that all through passengers will continue/have continued on the flight.

*Déclaration "douanière" de retour d'échantillons de sol lunaire par la NASA  
(NASA 1969)*

Malgré l'appréhension naturelle des juristes, le droit a joué son rôle dans l'aventure spatiale. D'abord, en faisant de l'exploration de l'espace une liberté reconnue à toutes les nations. Ensuite, en faisant de sorte que ces dernières puissent profiter des découvertes faites par les pionniers. Le cadre juridique s'est construit au fur et à mesure de l'histoire spatiale, du début des années 1960 à la fin des années 1970, par l'adoption, au sein des Nations Unies, de cinq traités internationaux voués aux activités spatiales. Le premier, le Traité sur l'Espace, du 27 janvier 1967, fait office de texte fondateur. S'en sont suivis quatre autres traités, dont l'Accord sur la Lune du 18 décembre 1979, particulièrement orienté vers les activités d'exploration.

Explorer est d'abord une liberté, mais une liberté conditionnée. Dans un monde où tout investissement se doit d'être matériellement rentable, exiger de l'exploration spatiale qu'elle bénéficie à tous et non pas uniquement à ceux qui la mènent, n'est pas anodin. L'exigence d'une exploration dans l'intérêt commun, y compris des pays les moins favorisés, implique qu'on ne puisse laisser aux seules règles du marché le soin d'assurer l'accès aux bienfaits de l'exploration spatiale. Il s'agit ni plus ni moins de faire des fruits de cette activité un « bien commun global », une ressource universelle immédiatement disponible.

Le Traité sur l'Espace empêche que l'exploration ne soit l'occasion de s'appropriier l'espace extra-atmosphérique, en tout ou en partie. Ce principe est aujourd'hui fragilisé par des initiatives nationales qui visent à concéder des droits exclusifs et privatifs sur certaines ressources extra-terrestres. Explorer n'est point conquérir. L'explorateur prend soin de réduire au maximum son impact sur l'objet de sa découverte. Il cherche à observer, à comprendre, à apprendre, là où le conquérant cherche à soumettre. Cette différence est liée à la vocation du colonisateur qui est de demeurer sur les lieux, de se les approprier. Celle de l'explorateur est de retourner chez lui pour partager ses découvertes.

#### *L'explorateur, ambassadeur de l'humanité*

Le Traité de l'Espace reconnaît la qualité d'envoyés de l'humanité aux astronautes. Cette qualité est à la fois extrinsèque (elle définit le statut de l'explorateur spatial vis-à-vis d'éventuelles formes de vie dont il ferait la rencontre au cours de son voyage) et intrinsèque (elle protège l'astronaute contre des considérations triviales liées à sa nationalité dans le contexte géopolitique). L'astronaute est présumé agir pour le bien de l'humanité entière et doit être traité en conséquence (cette considération n'est pas innocente lorsque l'on se rappelle que les astronautes ont été pendant longtemps, et jusqu'il y a peu, sélectionnés parmi le personnel militaire).



Ce statut d'envoyé de l'humanité trouve sa substance dans un accord particulier, datant de 1968. Sans aller jusqu'à conférer aux hommes de l'espace une protection diplomatique, cet accord consacre les obligations des Etats à leur égard. Il est à noter qu'un tel statut est demeuré unique en droit international. Ni les explorateurs marins, ni les arpenteurs de l'Antarctique, ni les Casques bleus, ni les médecins ou travailleurs dévoués aux peuples victimes de conflits ou de catastrophes naturelles, n'ont bénéficié d'un statut similaire.

Si explorer, c'est partir pour mieux revenir, ce va-et-vient est aussi synonyme de préoccupations environnementales et sanitaires. Le Traité de l'Espace attire l'attention des Etats sur la nécessité d'éviter toute contamination mutuelle des milieux respectifs : contamination de la Terre par des substances ou des organismes (hypothétiques) d'origine extra-terrestre et contamination d'autres planètes par des substances ou des organismes d'origine terrestre. Cette préoccupation peut sembler fort théorique en l'absence de toute forme avérée de vie étrangère à notre planète. Elle a cependant un intérêt très concret ; d'abord en mettant en œuvre le principe de précaution dans les activités d'exploration spatiale, ensuite en maintenant, autant que possible, les milieux extra-terrestres vierges de toute « pollution » pour les besoins des observations scientifiques. L'abstention de contamination mutuelle s'étend en outre à toute modification qui affecterait le milieu ambiant.

Si le Traité sur l'Espace s'attache à assurer le bénéfice de l'exploration spatiale pour toutes les nations, l'Accord sur la Lune et les autres corps célestes étend l'attention des gouvernements sur les intérêts des générations futures. L'exploration entre ainsi dans sa dimension universelle comme génératrice de progrès et d'évolution scientifique, technologique, économique et sociétale. Son impact n'est plus uniquement vu en termes géopolitiques, mais également en termes historiques.

### *L'explorateur, un être coupé du monde*

Livré à lui-même, hors de son environnement naturel et face au péril, l'explorateur prend conscience de la valeur de la vie et, tout à la fois, de sa vocation à se sacrifier, à abandonner jusqu'à son existence pour servir une cause qui le dépasse. L'exploration se conjugue à la première personne du pluriel. Le « je » n'est que l'instrument du « nous » : l'individu devient l'interface sublime entre la beauté de la révélation et le salut de l'humanité, entre la grandeur indéfinissable du Cosmos et l'ultime repère concevable à cet instant : la vie. Cette difficulté de repérage est d'ailleurs l'une des questions qui s'imposent au juriste comme au sociologue. L'humain dans l'espace conserve-t-il son échelle de valeurs ? L'expérience du vide cosmique ne doit-elle pas être regardée comme traumatisante en ce qu'elle affecte notre perception de notre importance relative et, de ce fait, de ce qui est moralement permis ou requis ? La norme juridique perd-elle sa cohérence dans ce contexte étranger à toute référence ?

Comment convaincre deux astronautes en route pour Mars sans attente de retour qu'ils demeurent soumis aux lois humaines terrestres et qu'ils ne peuvent s'entretuer au gré de leur antipathie ou de leurs frustrations ? Quelles contraintes peuvent prévenir le retour à un comportement instinctif, à la satisfaction immédiate des besoins ou des sentiments ? On répondra sans doute que la barrière morale, le besoin objectif de l'autre, la peur de la solitude jouent à cet égard un rôle déterminant. Mais on en revient là à des normes auto-générées, intrinsèques à l'individu, qui ne dépendent que de son bon vouloir. S'agit-il encore de droit, c'est-à-dire de règles dont la valeur est acceptée par chaque individu comme essentielle à la survie sociale et, en définitive, à celle de l'espèce ? Si l'on définit le droit comme un système normatif d'où naît et se consolide l'ordre social, on conçoit aisément la force du droit dans une société complexe, mais simultanément sa fragilité dans une relation sociale réduite à sa plus simple expression, c'est-à-dire une relation isolée entre deux individus. La solitude de l'explorateur est susceptible de conduire à un effacement progressif de la norme sociale. Ce phénomène pourrait – mais cela reste à démontrer – s'accompagner d'un renforcement de la norme spirituelle, éventuellement dans des proportions qui mènent à une dérive irrationnelle. « *Je suis le plus puissant du groupe. De par ma puissance, je suis seul. Si je suis seul, je suis le maître. Le maître a droit de vie et de mort. Le maître est Dieu. Je suis Dieu.* » De tels phénomènes ont pu être observés au cours de l'histoire maritime, comme ce fut le cas lors de l'épisode sanglant du massacre des survivants du Batavia par Jeronimus Cornelisz, en 1629, au large des côtes australiennes.



*Massacre des survivants du Batavia sur Beacon Island  
(gravure de 1647, extraite de Ongeluckige voyage van't schip Batavia)*

Affirmer que chacun de nous est un tyran en puissance serait, bien heureusement, exagérer. Livré à lui-même, l'humain est capable autant de prouesses héroïques que de violence sauvage. Mais la question est pertinente. Même si recruter sur Internet des (pseudo-)candidats à un aller simple sur Mars relève plus de l'événement communicationnel que du projet spatial, une telle initiative n'en pose pas moins la question de la dimension psycho-sociale de l'expérience. Chaque personnalité, tantôt dominante, tantôt récessive, trouve sa place au sein de la communauté. Le caractère dominant n'implique pas nécessairement la soif de pouvoir, tout comme le caractère récessif n'indique pas forcément une allégeance inconditionnelle aux lois. La psychologie sociale décrira la complexité de ces interactions et c'est sur cette base que le juriste pourra envisager, avec intelligence, les normes les plus adaptées aux situations susceptibles d'être rencontrées par l'explorateur. Une chose est déjà certaine : notre équilibre mental est fonction d'un grand nombre de paramètres, dont celui de l'environnement social. L'être humain a tout intérêt à travailler en équipe, à développer ses capacités de résilience, d'adaptabilité, vis-à-vis tant de ses semblables que des situations auxquelles il est confronté. L'exploration est un travail collectif, mené en tirant au mieux parti des compétences et des qualités de chacun. Il est donc fondamental de la confier à des individus qui sont à même de collaborer ensemble, capables de s'affirmer sainement lorsque cela est utile et d'accepter l'autorité lorsque celle-ci se justifie. Il s'agit en fin de compte de ramener la quête à sa finalité première et de jouer les contrepoids face aux dérives intéressées ou irrationnelles. Il y a donc une impérieuse nécessité de gérer l'égo, qui constitue la clé pour l'élaboration d'un cadre juridique, social et psychologique approprié à ce type d'activités.



### *Le péril venu d'ailleurs*

Le danger vient de l'inconnu et ce que l'on explore l'est par définition. Le législateur international l'a réitéré dans les dispositions de l'Accord sur la Lune de 1979. L'Accord impose à tout Etat partie d'informer sans délai le Secrétaire Général des Nations Unies, le public et la communauté scientifique de tout phénomène qu'il observerait dans l'espace ou sur un corps céleste et qui représenterait un danger pour la vie humaine. Nous voici replongés dans les meilleurs épisodes de Star Trek ou dans les frissons glauques de H.P. Lovecraft. Quoique la réalité rappelle plutôt L'Etoile mystérieuse, d'Hergé, puisque le péril venu de l'espace reste avant tout associé aux objets géocroiseurs, c'est-à-dire aux astéroïdes susceptibles d'entrer en collision avec la Terre. Une autre hypothèse est envisagée par cette disposition de l'Accord : celle de la découverte de vie extra-terrestre.



*Explorer n'est pas nécessairement synonyme de déplacement: cela commence par l'usage de nos sens, quelquefois amplifiés par la technologie.*

*photo (c) ESA*

Si la NASA ne s'est jamais montrée réticente à communiquer sur la découverte d'éventuels signes de vie sur d'autres planètes (Mars en l'occurrence), parfois avec un peu trop d'empressement, cette publicité s'est toujours faite dans le cadre scientifique sans rapport avec la transparence prescrite par l'Accord de 1979. Et pour cause : les Etats-Unis n'ont jamais ratifié ce traité avant-gardiste. L'Accord sur la Lune continue d'être boudé par la communauté internationale alors qu'il est le seul traité où figure explicitement l'obligation de partager la découverte d'une vie extra-terrestre ou le péril de la collision avec un astéroïde. Le rejet de ce texte est d'autant plus regrettable que l'Accord offre un cadre sur mesure à l'exploration spatiale, notamment en prévoyant un partage périodique des résultats des investigations. Tout comme il ne fallait pas confondre exploration et colonisation par le passé, il faut



aujourd'hui distinguer exploration et prospection. La frontière peut se révéler fort ténue, comme l'illustre le phénomène de la bio-prospection à des fins industrielles en Antarctique. Qu'on le veuille ou non, l'explorateur est ambassadeur de tous les intérêts, en particulier de ceux qui financent son action.

La vocation de juriste implique une curiosité bienveillante envers l'objet de chaque loi. Le droit ne porte pas sur des principes abstraits ; il porte sur la réalité du monde. Et l'homme de loi doit s'attacher à comprendre ne fut-ce qu'une part minime, mais utile, de l'activité humaine qu'il traite. Avec l'exploration spatiale, le juriste va au-delà de sa mission habituelle : lui aussi se met à explorer le droit dans ses limites les plus improbables et à l'aune de sa perpétuelle genèse, dans cette poussière d'étoiles d'où est née la vie.

# Habitabilité dans le système solaire et ailleurs.

Véronique Dehant

*Géophysicienne*

## Introduction

Dans ce chapitre nous traitons de l'habitabilité des planètes et des lunes dans le système solaire. Ensuite nous exploitons cette notion pour donner les grandes lignes des caractéristiques des planètes habitables parmi les exoplanètes.

Qu'est-ce que l'habitabilité ? La zone d'habitabilité autour d'une planète ?

Nous définissons l'habitabilité par l'ensemble des conditions nécessaires et suffisantes pour qu'une vie active puisse exister, même si elle n'existe pas. Sur Wikipédia, on trouve que c'est la mesure de la capacité d'un corps astronomique (planète ou satellite) de développer et d'accueillir la vie.

La seule vie que l'on connaisse est celle qui existe sur Terre ; elle est notre seule référence à l'heure actuelle. Les conditions qui permettent d'avoir de la vie sur Terre sont d'avoir :

- une source d'énergie (énergie solaire, énergie volcanique, énergie de marée, radioactivité naturelle...) et donc une possibilité d'entropie,
- de l'eau liquide stable, et
- C, H, N, O, P, S, acides aminés... des nutriments (le Carbone est le premier constituant nécessaire pour les matériaux organiques).

Certaines caractéristiques de notre Terre pourrait de plus faire partie des critères d'habitabilité. Il s'agit, en plus de l'existence de l'eau liquide en abondance à la surface de la Terre, de

- l'existence d'un champ magnétique,
- de tectonique des plaques,
- de volcanisme,
- d'une atmosphère,
- d'une certaine pesanteur,
- d'un cycle du carbone et d'un cycle de l'eau,
- d'un satellite naturel, la Lune, qui stabilise l'orientation de la Terre, et
- d'impacts de météorites et de comètes qui non seulement, comme les scientifiques semblent le penser, ont pu engendrer une extinction massive et à grande échelle des espèces animales comme les dinosaures, mais aussi apportent des volatiles et produisent un certain échappement de l'atmosphère, important pour l'évolution de celle-ci.

On se demande donc à quel point ces éléments jouent un rôle dans l'habitabilité de la Terre et même des autres planètes telluriques.

En fait, la présence d'eau liquide est certainement le facteur le plus important à la surface d'une planète pour son habitabilité, mais cette présence d'eau liquide est elle-même liée aux autres paramètres mentionnés ci-dessus. Pour comprendre certains des paramètres les plus importants comme la présence d'une atmosphère, il suffit de se reporter à la figure ci-dessous.

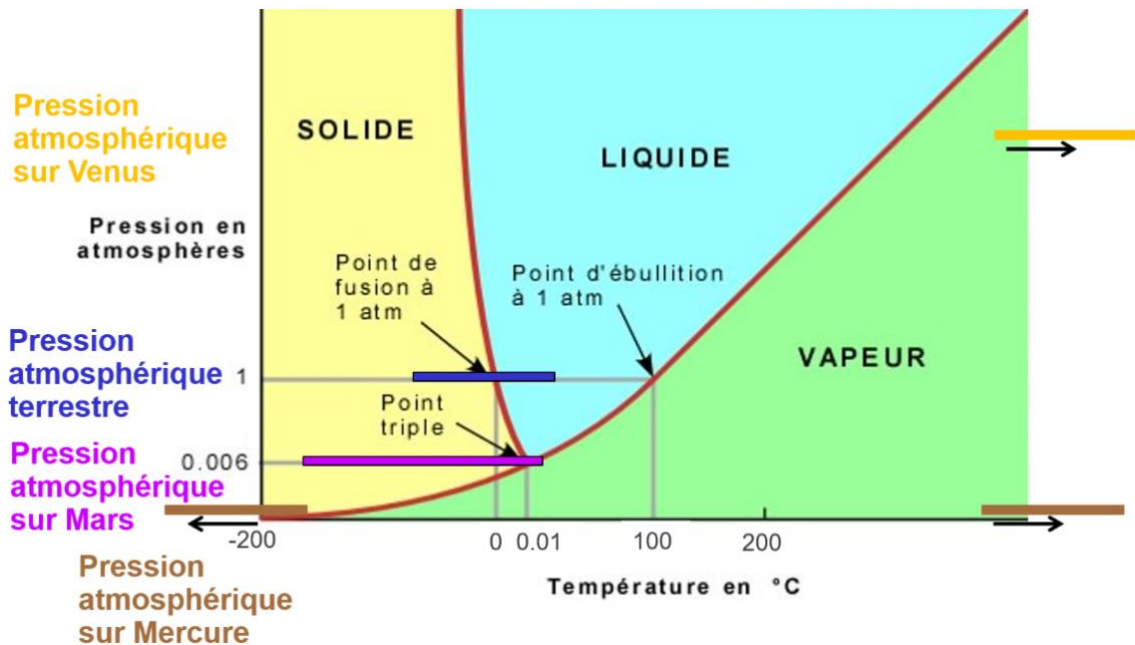


Figure 1: Phases de l'eau pour différentes températures et pressions. Les températures et pressions des différentes planètes telluriques.

La Figure 1 montre les températures et pressions de la Terre, Mars, Vénus et Mercure. Seule la Terre à présent peut maintenir de l'eau liquide en surface. Ni Vénus, avec une atmosphère 92 fois plus importante que celle de la Terre et des températures de l'ordre de 450°C, ni Mercure, sans atmosphère et donc avec des températures extrêmement froides la nuit (de l'ordre de -180°C) et extrêmement chaude le jour (de l'ordre de 420°C), ne sont pas habitables. La pression à la surface de Mars à l'heure actuelle est d'environ 7 mbar, soit environ 100 fois moins que sur Terre. Etant, en plus, plus loin du Soleil, Mars ne possède pas d'eau liquide stable à sa surface. Cependant, on peut déjà mentionner ici que Mars montre actuellement des signes de présence d'eau liquide à sa surface dans son passé (voir Section Habitabilité de Mars).

Les astronomes ont alors défini la zone d'habitabilité autour d'une étoile (voir Figure 2). Il s'agit d'une zone théorique où l'eau peut rester sous forme liquide à la surface d'une planète ayant une atmosphère à pression semblable à celle de la Terre.

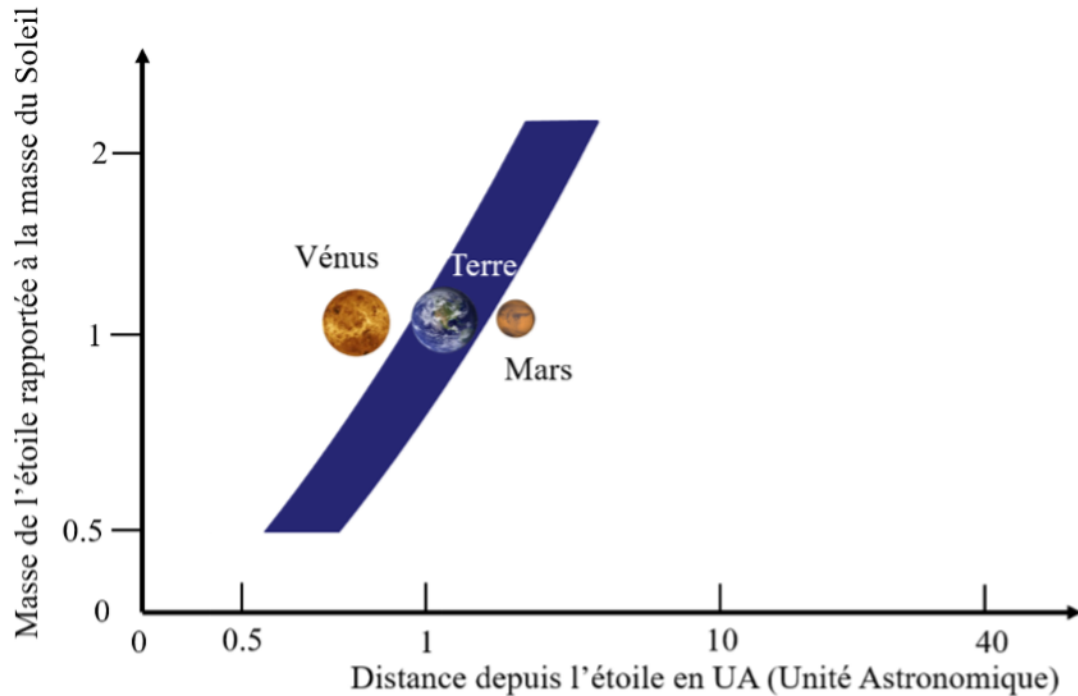


Figure 2: Zone d'habitabilité autour des étoiles. En abscisse, la distance à l'étoile et en ordonnée, la masse de l'étoile.

### Habitabilité de Mars

La planète Mars a été observée récemment en détails par un certain nombre de sondes spatiales américaines et Européennes :

- Mars Global Surveyor (NASA, 1997)
- Mars Odyssey (NASA, 2001)
- Mars Exploration Rovers (NASA, 2003)
- Mars Express (ESA, 2003)
- Mars Reconnaissance Orbiter (NASA, 2005)
- Phoenix (NASA, 2007)
- Mars Science Laboratory (NASA, 2011)
- Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN, NASA, 2013)
- ExoMars Trace Gas Mission Orbiter (ESA, 2016)

Chacune de ces sondes ont glané un ensemble de résultats desquels nous avons acquis la conviction que Mars a eu des épisodes humides au tout début de l'existence du système solaire et qu'elle est actuellement extrêmement sèche. Autrement dit, Mars avait dans son passé une atmosphère (épisodique ou sur un certain laps de temps au tout début du système solaire) suffisante pour avoir de

l'eau liquide à sa surface. Pour s'en convaincre, il suffit de surfer sur les sites web des agences spatiales américaine et européenne (voir Figure 3).

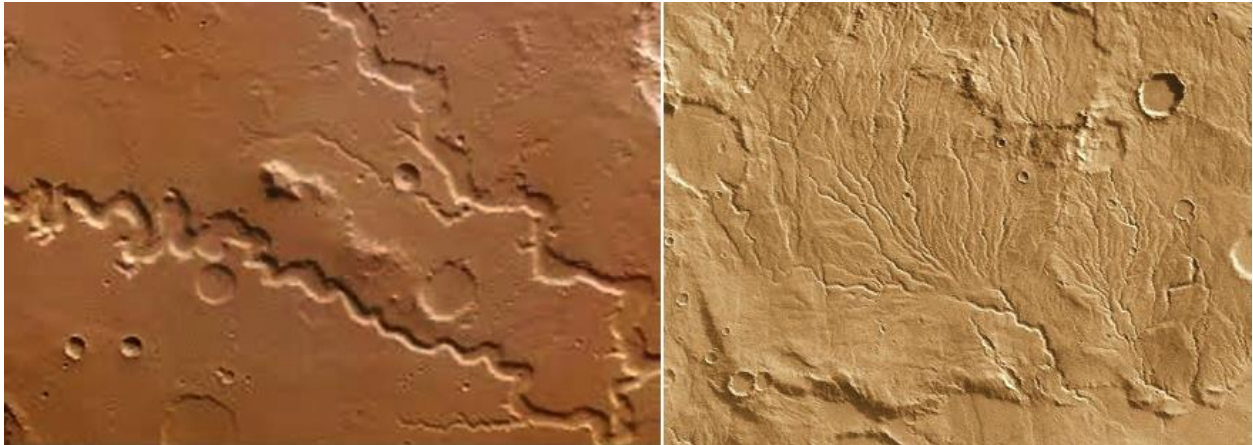


Figure 3: Images en provenance de la caméra haute-résolution de MarsExpress (© ESA et DLR).

#### Qu'en est-il des lunes du système solaire ?

On peut encore étendre la notion d'habitabilité en se référant à la découverte d'existence d'organismes vivants dans le fond des océans sur Terre. Dans le système solaire, autour des planètes géantes gazeuses, il y a une multitude de lunes glacées toutes plus belles les unes que les autres. Ces lunes possèdent pour la plupart d'entre elles, un océan interne sous la surface glacée...

On trouve autour de Jupiter, les quatre lunes Galiléennes, Io, Europe (Figure 4), Ganymède et Callisto. Io étant très proche de Jupiter, elle subit des forces de marées gigantesques, ce qui la rend extrêmement chaude. Elle ne possède pas de surface gelée. Par contre Europe, Ganymède et Callisto sont des lunes gelées. Comme, plus on pénètre à l'intérieur d'une lune ou d'une planète, plus il fait chaud, on peut trouver de l'eau liquide en dessous de la croûte de glace... Ces océans internes découverts à l'intérieur de certaines lunes gelées du système solaire sont d'autant plus intéressants qu'ils peuvent être en contact avec la roche (des nutriments) ... C'est le cas de Ganymède par exemple.

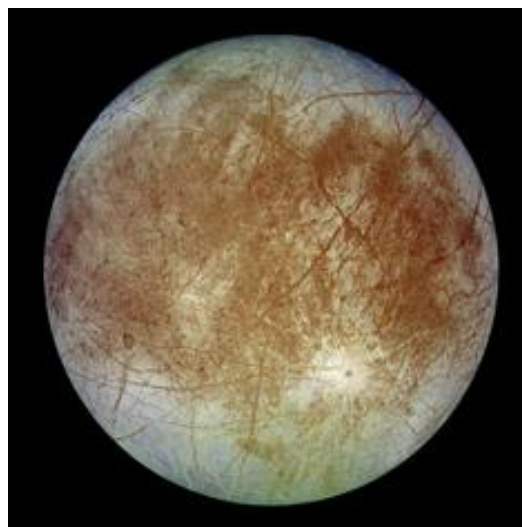
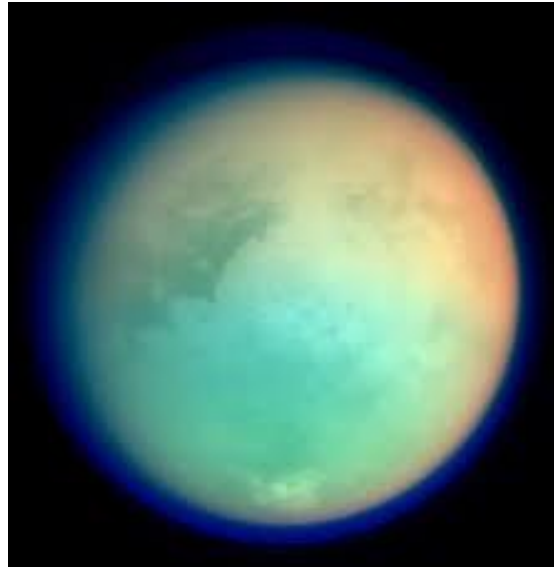


Figure 4: Lune de Jupiter, Europa (© NASA).

Lorsqu'on sait que la température peut être importante à l'intérieur des lunes, dans les océans internes, on a vite fait l'analogie avec les cheminées hydrothermales qu'on trouve dans l'Atlantique. Autour de cette évacuation de la chaleur interne sur Terre, on a découvert une vie sous-marine luxuriante.

Autour de Saturne, comme nous l'a montré la sonde américaine Cassini, les scientifiques ont découvert un grand nombre de lunes dont certaines sont très intéressantes pour l'habitabilité. C'est le cas de Titan (Figure 5) et d'Encelade (Figure 6). On a d'ailleurs observé des panaches d'eau sortant des griffures du tigre d'Encelade (Figure 7).



*Figure 5: Lune de Saturne, Titan (© NASA).*



*Figure 6: Lune de Saturne, Encelade (© NASA).*



Figure 7: Griffures du tigre d'Encelade et panache d'eau (© NASA).

### Evolution des planètes

Pour mieux comprendre l'habitabilité d'une planète, en dehors de l'existence de vie proche de ces sources thermales, il faut se replacer dans le contexte de l'existence d'une atmosphère (on se réfère à la Figure 1) et de l'évolution de la planète.

Au début de son existence, une planète accumule de la chaleur suite aux impacts liés à sa formation. La chaleur des éléments radioactifs qui la constituent s'ajoute à cette chaleur initiale. Ensuite la planète (ou la lune) se refroidit lentement au cours du temps. Pour ce faire, la planète évacue cette chaleur soit par conduction, soit par convection (comme l'eau qui bout dans la casserole). Dans ce dernier cas, le transport de chaleur se fait via un ensemble de mouvements verticaux et horizontaux. Ce phénomène physique très courant se produit dans de nombreux systèmes physiques (la casserole d'eau qui bout, l'atmosphère, les étoiles, le noyau (quand il est liquide) et le manteau des planètes...).

Une planète tellurique se différencie au début de son évolution, la rendant constituée principalement d'un noyau ferreux et d'un manteau silicaté (voir Figure 8).

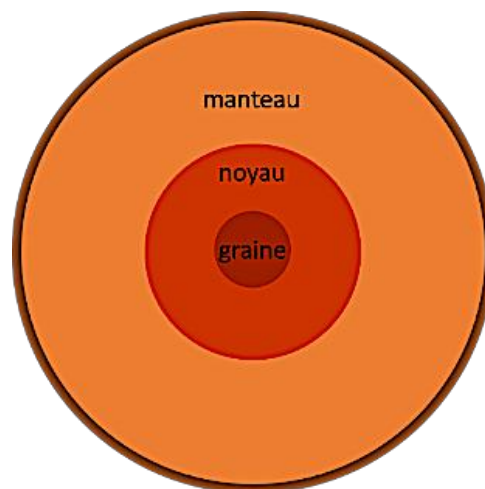


Figure 8: Intérieur d'une planète tellurique.



Le noyau, constitué d'un mélange de fer, en se refroidissant, peut se solidifier pour former une graine. Avec le temps, le noyau deviendra complètement solide. L'état physique du noyau dépend de la température interne (et donc des étapes temporelles de son évolution) et des pressions qui règnent à l'intérieur de la planète (et donc de ses dimensions).

Le noyau liquide constitué de fer conducteur, lorsqu'il est animé d'un mouvement, engendre un champ magnétique que l'on détecte en surface. C'est le cas de la Terre et de Mercure. Vénus et Mars ont probablement également un noyau partiellement ou entièrement liquide, mais les mouvements qui l'animent ne sont pas suffisamment forts, voire inexistants, pour engendrer un champ magnétique. On voit des traces dans les terrains très anciens de Mars de l'existence d'un champ magnétique dans le passé de Mars. Celui-ci s'est éteint il y a environ quatre milliards d'années. A l'époque, la chaleur initiale s'est évacuée par convection dans le noyau et le manteau. Mais la planète s'est probablement suffisamment refroidie pour stopper la convection dans le noyau.

### Qu'en est-il alors de l'atmosphère des planètes telluriques ?

L'évolution des planètes telluriques possédant une atmosphère ne peut être dissociée de l'évolution de cette dernière. C'est elle qui gère la température de surface, importante condition pour la convection sous-jacente par ailleurs.

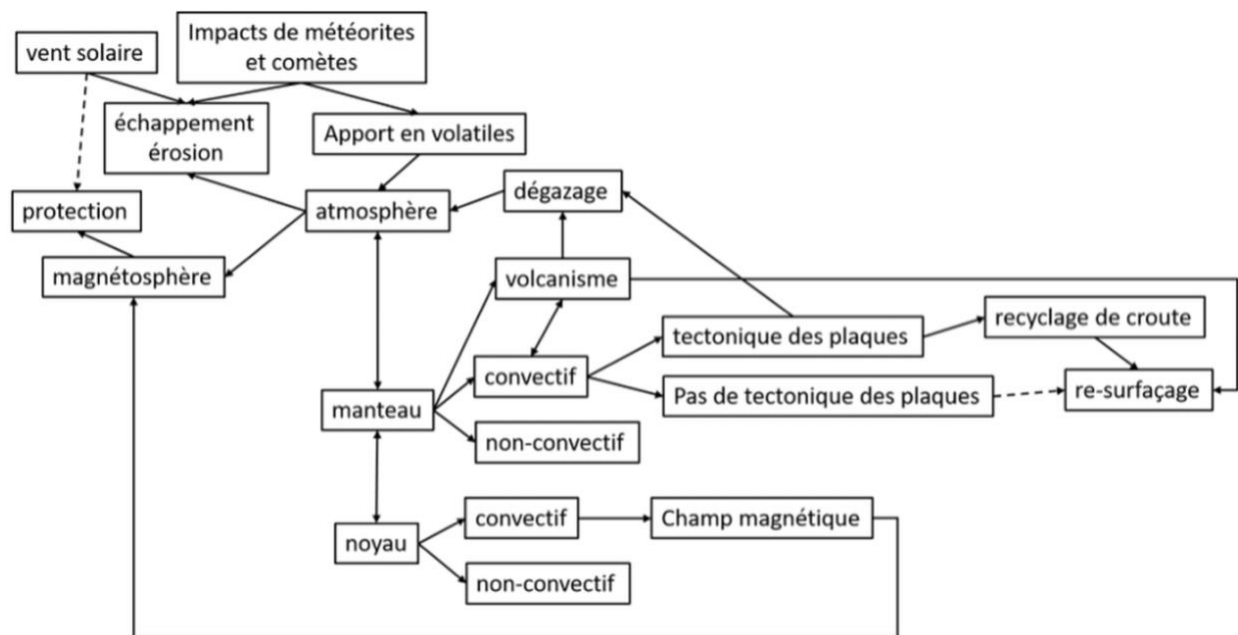


Figure 9: Schéma des facteurs qui entrent dans l'habitabilité d'une planète.

Comme le montre la Figure 9 le champ magnétique joue un rôle de protection de l'atmosphère contre le vent solaire qui l'érode. La constitution d'une atmosphère dépend de l'état de dégazage (l'atmosphère est reconstituée par dégazage volcanique ou non à partir du manteau) et de l'apport en volatiles via les impacts des comètes et des météorites. Ces dernières peuvent également éroder en partie l'atmosphère. Le rôle de la tectonique des plaques peut également être important car il permet un recyclage du carbone et de l'eau éventuelle, ce qui change les propriétés de convection et du volcanisme, et donc le dégazage lui-même.

La modélisation de l'échappement atmosphérique comporte principalement deux aspects différents. Tout d'abord, il y a l'échappement hydrodynamique, qui se produit lorsque l'apport énergétique du Soleil est suffisamment grand pour permettre aux composants plus légers de l'atmosphère (l'hydrogène principalement, mais aussi l'oxygène ou même le CO<sub>2</sub>) de s'échapper vers l'espace et d'être ainsi soustrait de l'atmosphère. L'échappement atmosphérique peut également se produire par des procédés non-thermiques impliquant notamment un écoulement de matière ionosphérique chargée. L'intensité du flux stellaire/solaire a un effet important sur l'échappement non-thermique. Mais un rôle extrêmement important est aussi joué par le champ magnétique qui protège l'atmosphère de l'érosion par le vent solaire comme on l'a déjà mentionné (voir Figure 9).

Pour l'atmosphère primitive, c'est l'échappement hydrodynamique qui est dominant, tandis que pour l'évolution ultérieure de l'atmosphère, c'est plutôt l'échappement non-thermique qui domine, comme le repiquage d'ions par le vent solaire, l'échappement d'ions via l'ionosphère... mais cette composante dépend également de l'existence ou non d'un champ magnétique. Il faut cependant noter qu'à cause de l'efficacité de l'intensité du flux solaire initiale, on pense de plus que la protection du champ magnétique ne pouvait empêcher qu'une petite fraction de l'échappement.

L'échappement hydrodynamique n'est pas affecté par l'intensité du flux solaire, car son effet couvre les espèces neutres. En outre, à cette époque, l'apport d'énergie du Soleil aurait été suffisamment élevé pour conduire à l'expansion de l'atmosphère bien au-dessus de ses altitudes actuelles et, éventuellement, bien au-dessus des altitudes où l'atmosphère est protégée par le champ magnétique.

Les mesures du taux d'échappement atmosphérique actuel autour des planètes telluriques sont d'une importance primordiale pour mieux le comprendre de phénomène. Ces mesures ont d'ailleurs récemment montré que la quantité de matériau planétaire échappé qui retourne dans l'atmosphère sous l'effet d'un champ magnétique planétaire est actuellement révisée à la baisse, ce qui augmente encore le taux d'échappement.

On voit donc que l'existence d'une atmosphère et son épaisseur dépendent de conditions liées à l'intérieur de la planète ainsi qu'à l'étoile et de leurs évolutions respectives.

### L'insolation

L'existence d'une atmosphère et de l'effet de serre associé sont les conditions qui permettent ou non à l'eau liquide d'exister à la surface d'une planète. Mais il faut encore considérer la distance à l'astre et l'orientation de la planète pour obtenir l'insolation. Sur Terre on sait que nous avons des changements climatiques importants suite à de petites variations de l'orientation de la Terre de quelques degrés ! Nous avons la chance d'avoir une lune qui stabilise l'orientation de la Terre dans l'espace à ce niveau. Mais ce n'est pas le cas pour les autres planètes. Mars est actuellement penchée comme la Terre (environ 25° d'obliquité) mais son orientation peut varier de 0 à 180° avec un pic de probabilité à 45°. Venus possède un axe de rotation qui pointe à environ 180° de la perpendiculaire à l'écliptique (plan des orbites des planètes autour du Soleil). Mercure quant à elle est proche de 0° d'inclinaison. L'existence d'une inclinaison comme celle de la Terre et de Mars crée des saisons... Mais Mars a vécu d'autres inclinaisons dans son passé, changeant les conditions climatiques...

### Conclusion

Nous avons la chance sur Terre d'avoir une atmosphère construite en fonction du temps et où même la vie elle-même a joué un grand rôle (oxygénation de l'atmosphère terrestre). Malgré les changements climatiques sur les longues échelles de temps et les effets des impacts de météorites, la vie existe. Qu'en est-il des autres planètes ou lunes du système solaire ? Venus et Mercure sont trop chaudes (et Mercure

est de plus trop froide durant ses nuits) pour avoir de l'eau liquide en surface. Mars à l'heure actuelle ne possède pas d'atmosphère suffisante pour avoir de l'eau liquide stable à sa surface, ce qui élimine les possibilités de vie active à la surface de Mars à l'heure actuelle. Cependant, dans son passé, on sait que Mars a eu des épisodes où l'eau a coulé à flots ! La question de l'existence de la vie (qui serait actuellement fossilisée) reste donc entière.

Les lunes du système solaire sont également intéressantes pour les questions d'habitabilité car les océans internes qui existent sous les croûtes gelées de certaines d'entre-elles peuvent être en contact avec le manteau silicaté de la lune et donc avec des nutriments.

Au vu de cette remarque sur les lunes du système solaire, la vie en dehors du système solaire pourrait exister en dehors des zones d'habitabilité définies par les astronomes à cause de l'existence possible de mondes de glace et d'océans internes. Cependant pour chercher des planètes habitables, il est préférable de se concentrer sur la zone d'habitabilité et sur la composition des atmosphères de ces exoplanètes pour y découvrir des planètes habitables.

### Références

Dehant V., "Habiter sur Mars ?", Publ. Acad. Royale Belgique, Académie en poche, 96 pages, janvier 2012.

Dehant V., "Habiter sur une lune du système solaire ?", Publ. Acad. Royale Belgique, Académie en poche, 141 pages, septembre 2015.

## Mars 2034

Vladimir Pletser

*Candidat Astronaute belge*

*Février 2034*

Quatre mois que nous sommes en route. Nous ne distinguons plus la Terre comme une boule mais comme un point qui rétrécit. Par contre, notre objectif, nous le voyons de plus en plus précisément. Cette mission s'annonce périlleuse mais excitante : pour la première fois dans l'histoire de l'humanité, un équipage de six êtres humains est en route vers une autre planète, notre voisine Mars.



*Vue de Mars prise par la sonde Rosetta en route vers Titan. (Photo : ESA)  
On reconnaît les calottes polaires de glace d'eau et de CO2 et la couleur  
rougeâtre due à l'oxyde de fer, la rouille à la surface de Mars.*

Le voyage, quoique éprouvant, se passe bien. L'impesanteur que nous connaissons à bord de notre vaisseau commence à avoir ses effets. Les muscles de nos jambes et de nos bras s'atrophient légèrement. Ça se voit. Il en est de même pour nos os qui perdent leur calcium. Ça, ça ne se voit pas mais c'est connu. Heureusement, nous avons une mini centrifugeuse dans notre module d'habitation, pas très grande, mais suffisante pour nous donner entre un tiers et un demi g d'accélération, ou g est l'accélération sur Terre. Le système est ingénieux, puisqu'il nous permet également de nous exercer.

Nous sommes couchés seul ou à deux, la tête vers le centre de la centrifugeuse et nous pédalons, ce qui fait la tourner sur des roulements à billes. Simple mais efficace. Nous y passons chacun à notre tour, une à deux heures par jour.

Par contre, les radiations, là, pas encore de solutions miracles. Le lancement s'est fait au début d'une période calme du soleil, sans trop d'éruptions solaires. Dans le cas d'une alerte d'éruption solaire, nous devons nous réfugier dans le safe haven, la pièce isolée avec des murs en plomb épais et autour desquels les ingénieurs ont placé nos réservoirs d'eau. Cela nous est arrivé trois fois lors de notre voyage. Ce n'est pas très amusant de rester enfermés à six dans cette petite pièce de moins de 2 m<sup>2</sup>, chacun sur sa couchette avec son ordinateur portable. On arrivait encore à travailler et on mangeait les rations de secours, mais ceci nous a permis de diminuer notre exposition à ces rayonnements intenses.

Ce n'est pas simple de penser à tout pour un voyage de trois ans vers une autre planète, mais heureusement l'aventure et la recherche avaient déjà commencé depuis bien longtemps, bien avant notre décollage.

*Juin 2034*

Mars n'est plus trop loin. Après presque huit mois de voyage, nous arriverons dans quelques jours. Finalement, tout s'est bien passé pendant ce voyage. Oh bien sûr, il y a eu des mini-crisis entre nous, des accrochages et des engueulades, mais rien de grave, c'est normal et comme chacun y mettait du sien, tout s'est bien passé. Il faut dire que notre équipage international est au top. Six personnes, mais tous et toutes des spécialistes dans leurs domaines et dans d'autres également. Notre Commandante, Constantina Yksvokloist, est russe, pilote et également ingénieure en télécommunications. L'EXO, pour *Executive Officier*, Trebor Nirbuz, de la NASA est un pilote hors-pair et un excellent ingénieur nucléaire également. L'ingénieur de bord, Selrahc Leknarf, notre McGiver qui répare tout, des toilettes aux connexions d'ordinateurs, est Sud-Africain, ingénieur bien sûr et docteur en physique. Notre toubib chinoise, Eel Lacsap est médecin et chirurgienne bien évidemment mais elle a aussi un doctorat en biologie et biotechnologie. Ma collègue scientifique indienne, Aroc Leith est biologiste et également médecin. Et puis moi-même, Rimidalv Restelp, je suis docteur en physique et ingénieur en mécanique. Grâce à nos doubles formations, nous pouvons nous substituer les uns aux autres et nous aider mutuellement dans les différentes tâches techniques et scientifiques, et aussi ménagères. Pff, la vaisselle sans machine à laver, ça fait ringard, mais c'était nécessaire pour sauver de la masse à bord. Mais bon on y passe tous à notre tour. Ah oui, une vieille tradition qui remonte à l'époque des premières simulations martiennes à la MDRS (*Mars Desert Research Station*) et à FMARS (*Flashline Mars Arctic Research Station*): c'est celui qui fait la vaisselle, le DGO, *Director of Galley Operations*, qui choisit la musique. Et là, c'est varié, et pas que du disco...

Je suis bien content que dans notre équipage international, presque toutes les nationalités des pays impliqués dans l'exploration spatiale soient représentées et qu'il y ait autant de femmes que d'hommes. Heureusement que nous n'avons pas suivi les recommandations des spécialistes russes de n'avoir que des équipages masculins.

*27 juin 2034*

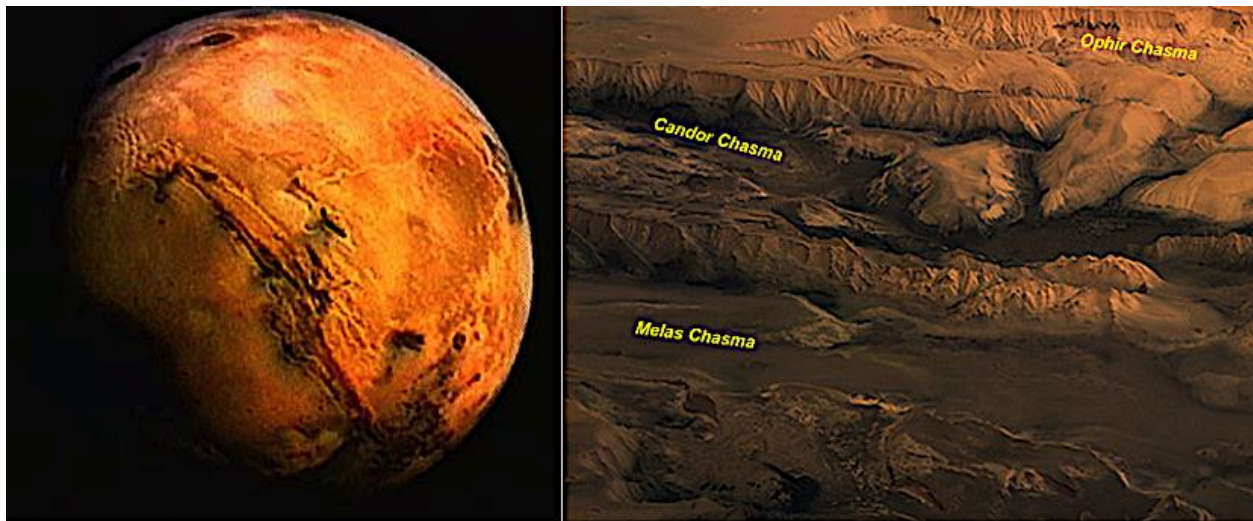
Nous sommes proches de la mise en orbite autour de Mars. Après huit mois d'impesanteur, à part les quelques périodes régulières d'accélération de quelques dixièmes de g, ce sera la première fois que nous sentirons à nouveau une accélération continue, une décélération en fait lors de l'allumage des moteurs de freinage. Nous nous y sommes bien préparés, mais malgré tout, je pense que ce sera un choc physiologique et psychologique. Physiologique parce qu'il faut que le cœur arrive à encaisser de

pomper a nouveau contre cette forme de pesanteur. Et psychologique aussi, puisque nous arrivons et pénétrons enfin dans l'atmosphère tenue de Mars.

Mais tout devrait bien aller puisque, pendant notre voyage, en plus de notre charge de travail normal, nous avons suivi un programme intensif d'exercices physiques, sur le tapis roulant, sur la bicyclette ergométrique centrifuge et sur la machine à squats. C'est incroyable comment les ingénieurs et les scientifiques ont réussi à construire et à intégrer tous ces instruments en aussi peu de place. Tout cet entraînement, sous le contrôle et le suivi strict de notre médecin de bord, Eel Lacsap, est important pour combattre les effets débilissants de l'impesanteur sur les os et les muscles. Rendez-vous bien compte : sans ces exercices réguliers et quotidiens, notre corps ne pourrait pas se réadapter à la pesanteur même réduite comme celle de Mars, qui est à peine de 38% de la pesanteur terrestre. Sans cela, nous subirions des fractures multiples et nos muscles ayant perdu de leur tonus puisque n'étant plus sollicités suffisamment, seraient incapables de supporter notre propre poids.

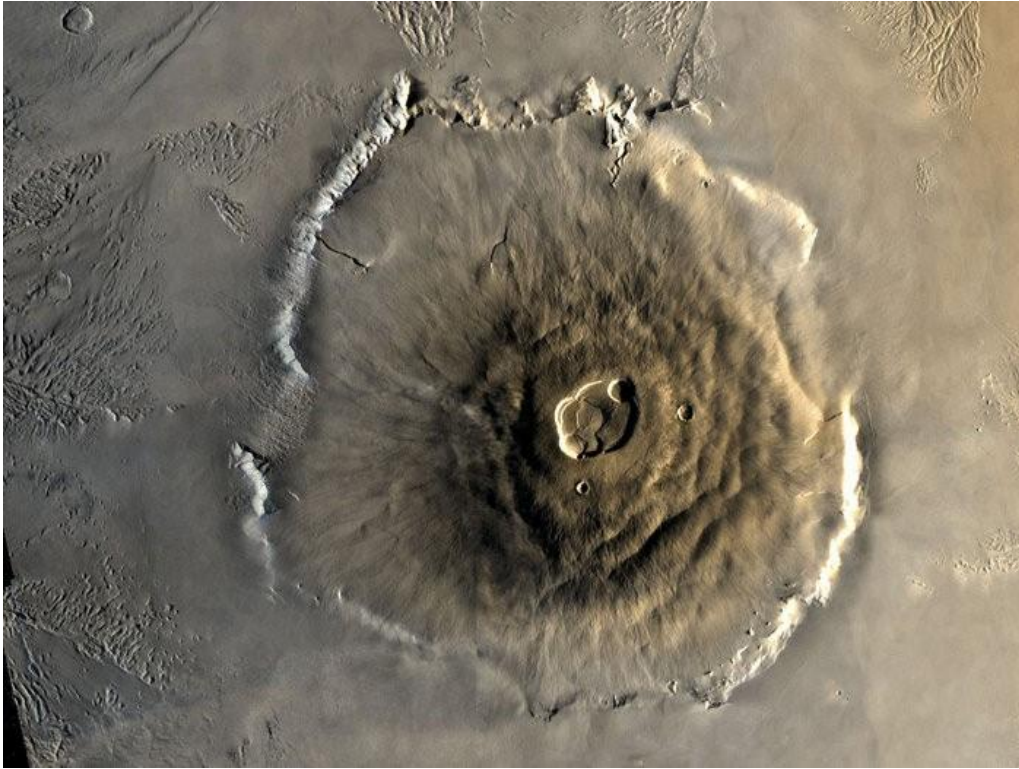
28 juin 2034

Ça y est ! C'est fait et ça s'est bien passé. Nous sommes en orbite autour de Mars, et la vue est époustouflante. A partir de quelques 300 à 400 km d'altitude, nous pouvons observer le défilement du paysage martien sous nos yeux. Fabuleux ! Il n'y a pas d'autres mots. Pour la première fois dans l'histoire de l'humanité et de l'univers, des êtres humains regardent de près une autre planète. Comme c'est beau ! On peut voir tellement de détails. L'énorme canyon qu'est *Valles Marineris* (4000 km de long, alors que le plus grand canyon sur Terre, le Grand Canyon aux USA, fait moins de 150 km) est la structure géologique qui surprend le plus. On observe également toutes les autres vallées qui se jettent dans cette *Valles Marineris*, comme *Candor Chasma*, *Ophir Chasma*, *Melas Chasma*, etc.



Mars : à gauche, vue de Mars et du canyon *Valles Marineris* (4000 km de long !) ; à droite : partie centrale (300 x 600 km) avec *Candor*, *Melas* et *Ophir Chasmas* (Crédit : Mars Express, ESA)

Un autre endroit frappant à la surface de Mars est le Mont Olympe, le plus grand volcan (éteint) du système solaire, haut de 25 km d'altitude, alors que la plus haute montagne sur Terre, le Mont Everest, fait moins de 8 850 m. Mars est réellement une planète extraordinaire et pleine de contrastes. Des plaines immenses, des calottes polaires assez étendues, des différences de température de plus de 150 degrés C, une atmosphère très peu dense et pas de champ magnétique, ou très faible. Un nouveau monde à découvrir et à explorer.



*Le Mont Olympe, le plus grand volcan du Système solaire (Photo : USGS/NASA)*

Nous nous préparons à cette nouvelle partie de notre mission, la phase orbitale autour de Mars. Pendant longtemps, les ingénieurs et les responsables de mission pensaient que les premières missions habitées atterriraient directement sur Mars. On s'est rendu compte qu'il valait mieux passer par une phase orbitale, c'est-à-dire se satelliser en orbite autour de Mars et observer la planète de haut avant de s'y poser. Et c'est le programme des mois qui viennent. Nous atterrirons avec un des modules de notre vaisseau spatial qui comporte l'Habitat martien et les différents laboratoires et autres annexes nécessaires à notre vie sur place. Tout l'équipage est excité par cette perspective de pouvoir fouler la surface martienne. Nous sortirons chacun à notre tour, deux par deux pendant les expéditions extravéhiculaires comme nous les appelons, ou EVA en anglais (prononcez *Hévéhaa*) pour *Extra-Vehicular Activities*. Ces sorties dureront quelques heures au début et puis quelques jours avec du matériel de plus en plus important. Nous aurons aussi à notre disposition un véhicule, une sorte de jeep martienne, et beaucoup d'instruments scientifiques. Car le but de notre expédition est bien sûr scientifique, cartographier le sol et le sous-sol de Mars, ainsi que de prélever et analyser des échantillons de sol, de glace et d'atmosphère. Mais, le but scientifique le plus important de notre mission est d'étudier les possibilités passées ou même présentes de la vie sur Mars.

Fabuleux de pouvoir faire ça par soi-même et de pouvoir ainsi compléter le travail extraordinaire qui a déjà été fait par les sondes et rovers automatiques au cours des dernières décennies. C'est d'ailleurs un très vieux débat de l'exploration spatiale depuis les toutes premières missions dans les années 50 : est-ce qu'il vaut mieux lancer des robots ou des hommes dans l'espace ? Et bien, il n'y a pas réellement d'opposition entre les deux démarches, puisqu'elles sont complémentaires. Les robots font très bien leur travail pour des tâches longues et répétitives : ils apportent des réponses aux questions pour lesquelles ils sont programmés, mais ils ne pourront jamais poser par eux-mêmes une nouvelle question. Les êtres humains, par contre, ont des facultés cognitives qui leur permettent de s'adapter aux



nouveaux environnements et de pouvoir faire preuve de curiosité et de dévier, quand il le faut, des procédures établies. Par exemple, de choisir de ramasser tel échantillon plutôt que tel autre, et de faire preuve d'initiative dans des situations inattendues.

Bon, donc heureusement que nous sommes là et nous devons nous préparer pour la première descente sur Mars. Ce seront notre Commandante, Constantina Yksvokloist, et notre ingénieur de bord Selrahc Leknarf qui seront les premiers êtres humains sur Mars. Et le premier homme à fouler le sol de Mars sera une femme. Oui, c'est bien Constantina qui marchera la première sur Mars. C'est normal d'ailleurs qu'après Neil Armstrong sur la Lune en 1969, ce soit le tour d'une femme, notre Commandante de bord.

*24 décembre 2034*

Voilà près de six mois que nous sommes sur Mars. Nous avons maintenant une base, un Habitat qui renferme nos labos, et nous avons laissé notre train orbital de modules qui est devenu la première station spatiale en orbite autour de Mars.

Nous sommes tous sortis en EVA sur Mars plusieurs fois depuis ces six mois. La dernière sortie EVA que nous avons faite, la 19ème depuis que nous sommes arrivés sur Mars, s'est passée difficilement. Nous avons été pris dans une tempête de poussière martienne. Rien de bien extraordinaire, car cela arrive assez fréquemment, sauf que cette fois-ci, la visibilité s'est dégradée à un point tel que nous nous sommes perdus et nous avons dû trouver refuge dans une de ces grottes naturelles.

De plus le moral de l'équipage n'est pas au beau fixe. Oh, rien de bien grave mais nous devons songer bientôt à remballer tout notre équipement. Et, bien que nous ayons déjà engrangé beaucoup de résultats scientifiques en géologie et sur l'atmosphère, malheureusement pas encore de signe de quoi que ce soit de vivant, pas de traces de vie présente ou passée. D'où, on commence à se poser des questions. Avons-nous sous-estimé quelque chose ? Nous sommes-nous trompés sur le type d'instruments à emporter ou sur les méthodes à employer ? Sommes-nous, la seule forme de vie dans l'univers ou pas ?

Extrait du log book d'Aroc Leiht, biologiste.

*24 décembre 2034, 5:00*

Aujourd'hui, la journée commence tôt parce que nous avons à effectuer une assez longue sortie extravéhiculaire ou EVA. Le plan est de collecter des échantillons de sol et de roches de plusieurs endroits pour continuer notre recherche de la vie sur Mars. Nous sommes ici depuis plus de six mois et nous n'avons encore rien découvert, malgré des centaines d'échantillons ramassés en différents endroits de la surface martienne. Ce serait à désespérer, mais nous ne perdons pas courage. On y arrivera. Aujourd'hui pourrait être une journée chanceuse. Nous nous dirigeons vers un lieu d'échantillonnage qui a été choisi après que le radar embarqué sur le train de modules orbital, pardon notre station spatiale orbitale martienne, ait découvert de la glace sous la surface à une profondeur accessible, des conditions idéales pour la vie telle que nous la connaissons sur Terre.

*24 décembre 2034, 15:00*

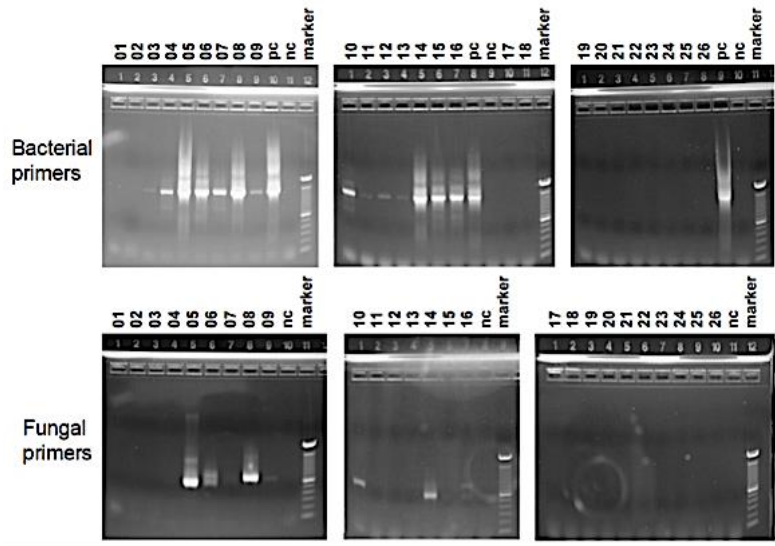
L'EVA fut assez difficile et nous a demandé beaucoup d'énergie. Nous avons été pris dans une tempête de poussière et nous avons dû nous réfugier pour deux heures dans un tube de lave. J'en ai profité pour recueillir quelques échantillons de poussières au sol et sur les parois. L'échantillonnage ne fut pas facile. Au total, nous avons pu collecter dix échantillons. Vu les conditions, c'est déjà un exploit. Finalement, la météo s'est améliorée, et nous avons pu rejoindre le Hab et le labo.



*Deux participants à la mission MDRS 5 en 2002 en sortie EVA pendant une tempête de sable (Photos : The Mars Society)*

*24 décembre 2034, 21:00*

Une fois au labo, j'ai immédiatement catalogué tous les échantillons collectés et commencé l'analyse biologique. La première chose que j'ai faite était de démarrer l'instrument bio-analyseur martien que nous utilisons pour extraire les biomolécules potentielles des échantillons de sol et de roches. Une première série d'expériences est maintenant en cours utilisant la Réaction en Chaîne par Polymérase, ou Polymerase Chain Reaction (PCR) en anglais, une technique bien établie qui permet d'amplifier une ou plusieurs copies d'un morceau d'ADN, un acide nucléique utilisé par tous les organismes vivants sur Terre pour le stockage à long terme de l'information génétique.



*Images d'expériences PCR réalisée a MDRS (Credit: extrait de C.S. Thiel, P. Ehrenfreund, B. Foing, V. Pletser, O. Ullrich "PCR-based analysis of microbial communities during the EuroGeoMars campaign at Mars Desert Research Station, Utah", Int. Journal of Astrobiology, 10, 177-190, 2011.*

[http://journals.cambridge.org/repo\\_A82FegRf](http://journals.cambridge.org/repo_A82FegRf)

[http://journals.cambridge.org/action/displayAbstract\\_S1473550411000073](http://journals.cambridge.org/action/displayAbstract_S1473550411000073)

24 décembre 2034, 25 décembre 2034

01:00

La première moitié des analyses expérimentales est terminée. J'attends avec impatience les résultats de l'électrophorèse. Est-ce que nous détecterons de la vie martienne aujourd'hui ?

24 décembre 2034, 02:30

Incroyable. C'est fantastique... J'ai un signal positif pour l'échantillon numéro 5 ! Je viens de détecter de l'ADN, plus que vraisemblablement de micro-organismes extra-terrestres. Quel type d'organisme ? Bactérie ? C'est trop tôt pour le dire. Je vais travailler toute la nuit pour commencer la procédure de séquençage ADN sur l'instrument bio-analyseur martien. Il faut absolument être certain de l'origine de cet ADN. Est-ce que c'est quelque chose de connu ? Ou semblable à une forme de micro-organisme sur terre ? Ces résultats pourraient être une découverte capitale ! Il semble que nous avons détecté pour la première fois que nous ne sommes pas seuls ici. Il y a de la vie sur Mars !

## Voyager dans l'espace

Yaël Nazé

*Astrophysicienne*

Voyager dans l'espace... A priori, en lisant cela, vous pensez certainement aux fusées et aux astronautes, et je pourrais utiliser ces quelques pages pour vous raconter comment l'imagination humaine a envisagé de tels voyages puis comment elle l'a mis en pratique. Je vous parlerais de plomberie, de mélanges chimiques, de gyroscopes, de trajectoires optimisées, d'obstacles insurmontables et d'objectifs atteints. Mais je l'ai déjà fait par ailleurs en détail <sup>1</sup>, alors je vous invite à une promenade un peu différente...

Sortez. Oui, sortez. Et si les nuages ne gâchent pas la vue, jetez un œil vers le ciel nocturne. Dans cette époque aux écrans multiples, osez lever les yeux vers cette voûte céleste constellée, de préférence loin des villes et lampadaires. Vous percevrez alors une émotion intense et primitive vous parcourir les veines et l'esprit ; vous vous sentirez aspiré vers ces soleils lointains, envoûté par ces lumières brillant de mille feux. Cette « *valse mélancolique et langoureux vertige* » s'avère un sentiment partagé par tous les humains à toutes les époques, à l'origine du développement de l'astronomie dès la préhistoire. Ce ciel étoilé constitue en fait notre première (et finalement unique !) rencontre avec un monde véritablement étranger, dans tous les sens du terme. Et alors que vos repères s'effondrent, l'angoisse peut vous étreindre, quoique souvent, la curiosité domine. Et c'est là que tout commence, dans cette volonté d'en savoir plus, dans ce ballet des pupilles entre les astres, dans ce trajet de planète en planète au télescope. Bien sûr, un tel voyage spatial s'effectue sans retenue... mais avec quelques contraintes car au fil des âges, nous avons obtenu plus de détails sur cet univers extérieur. Avec en outre une sévère limitation : le voyage ne peut encore être effectué qu'en imagination – on attend le croiseur interstellaire qui nous permettrait d'enfin quitter notre planète et ses abords. Mais n'est-ce pas ainsi que débute toute excursion ? Et puis, l'anticipation de la promenade n'est-elle parfois pas plus forte que son accomplissement ? Alors partons.

Dans un ciel de jais, un nuage s'effondre. Il chauffe avec douceur, se fragmente, et brille par mille vortex qui se densifient. De ses cœurs gazeux naîtront des étoiles, mais elles ne sont encore que des cocons indistincts. Si on s'en approche, on découvrira une forme rappelant une soucoupe volante : un disque entourant une sphère centrale. Dans ce disque, la matière se rue vers la condensation centrale, inexorablement attirée par sa masse imposante. Elle parvient à l'équateur du nourrisson stellaire, le faisant grossir. Mais il résiste, car sa structure changeante a du mal à s'habituer à sa nouvelle situation. Alors vous le voyez rejeter violemment un peu de matière, et s'ajuster de nouveau. Autour, petit à petit, le disque se modifie lui aussi, générant de petites condensations au départ de roches et de glaces, qui sont parfois rejointes par du gaz. Le poupon stellaire lutte, éructe, nettoie son environnement immédiat, mais ne se débarrasse pas vraiment de ces petites compagnes. Et lorsqu'il se transforme en étoile, elles deviennent planètes.

Le ciel a quitté l'ébène pour un moucheté brillant. Bas, haut, gauche droite, devant, derrière : ici, ces mots n'existent pas. Il n'y a qu'un ailleurs. Le vertige vous guette, mais la surprise vous rattrape : ce ciel n'est pas familier. Les astres sont nombreux, si proches les uns des autres. Certains sont même « tout contre » : il s'agit de couples, trios, ou quatuors – la norme céleste, en fait. Si vous suivez la valse de ces partenaires, vous remarquerez qu'être accompagné n'est pas bénin. Que du contraire. La surface stellaire d'un astre se plisse et l'intérieur se mélange, à cause des marées provoquées par le compagnon.

Sa substance stellaire se soulève et s'arrache, provoquant un transfert de matière vers son voisin. Et s'ils sont magnétiques, les partenaires proches vont se connecter, au sens propre, modulant leur activité avec la longitude stellaire ; s'ils sont massifs, leurs souffles entrent en collision, générant un choc puissant capable d'émettre de la lumière de haute énergie. Enfin, tel couple se rapproche, se tâte, puis fusionne en un célibataire imposteur.

Mais la configuration change à vue d'œil. Les étoiles en mouvement incessant se frôlent, éjectant au passage un compagnon, échangeant les partenaires, ou créant des couples d'objets autrefois solitaires. Les astres les plus gros meurent, et les autres se séparent petit à petit : l'amas natal se dissout, les jumeaux stellaires se séparent à jamais. Et notre Soleil se languit de ses compagnons perdus.

Choisissez l'un de ces astres. Rapprochez-vous. Survolez sa surface. Sur une lueur insoutenable, bleue, blanche, ou rouge, il y a des taches sombres et inquiétantes, ainsi que des éjections rapides plus ou moins fréquentes et denses. Soudain, l'étoile semble frémir, et la voilà qui enfle. Sa surface rougie ploie sous de gros bouillons toujours renouvelés. Une éjection de matière, un moment de calme, et voici déjà la fin. Un cœur qui se noie dans sa compacité, une enveloppe délaissée violemment, puis le calme revient.

Entre les astres, le gaz hésite, multiforme. Un brouillard diffus, tantôt extrêmement chaud, tantôt plutôt froid, envahit les espaces. De petits nuages gardent une forme définie, et se plaisent à interagir avec les étoiles. Leur lumière violacée les chauffe, et des filaments brillants naissent. Des formes improbables se dessinent : tête de cheval, continent terrestre, ou encore piliers pseudo-divins. Le front d'ionisation pénètre de plus en plus profondément, et l'onde de choc qui le précède peut pousser le nuage à s'effondrer, générant une nouvelle génération stellaire. Des poupons qui luttent, perdent parfois, puis finissent par rendre leur matière au bien commun,ensemencée d'éléments lourds. Alors le cycle recommence. Ce gaz constitue en effet l'alpha et l'oméga stellaire, l'origine des astres et leur destin, l'espoir des générations passées et le poids des descendances à venir.

Il est difficile de détourner les yeux, tant ce continuel ballet retient le regard, mais il faut s'éloigner pourtant, prendre du recul. Vous verrez alors gaz et étoiles s'organiser, et former une structure-hôte baptisée galaxie. Il s'agit d'un groupement aux contours indistincts. Quelles que soient vos préférences, vous y trouverez donc certainement de quoi flatter votre esthétique : grandioses arcs spiraux ou multitudes de bras spiralés, gros sphéroïdes sans contraste ou petites informes avec frénésie stellaire localisée. Certaines se collisionnent, comme deux mains s'entrelacent, se déformant sous l'impact amical. D'autres se disloquent, s'étirant jusqu'à la rupture, pour participer à la construction d'une géante. D'aucunes, enfin, subissent la colère avide de leur cœur actif, prompt à attirer ce qui passe à sa portée mais trop gourmand pour tout absorber, soufflant le surplus dans une tempête qui défigure son hôte. Le plus grisant est de tourner autour de ces objets, pour mieux découvrir leurs transformations singulières – un privilège réservé aux voyageurs...

Ébloui, vous décidez de pousser plus loin encore. Les galaxies se réduisent à un murmure lumineux, tandis que le cosmos vous apparaît dans sa grandeur même. Une éponge. Oui, des filaments bien fournis entrecoupés de béances mal dégrossies. Soudain, le paysage s'avère étrange. Il vous semble qu'il manque quelque chose dans le portrait, et de noires pensées vous assaillent. Quoi de plus normal : énergie ou matière sombres, les questions sont encore nombreuses. Mais cela ne vous arrête pas, bien sûr, et la balade continue. L'éponge semble se dissoudre, et bientôt il ne reste que d'un bruit de grumeaux. Fin du voyage, on ne voit plus au-delà. Il reste alors à revenir en avant, en résumant l'histoire de l'Univers...

E                    N  
 V                    O  
 E                    O  
 R                    O  
 Y  
 T  
 SO                H                ME  
                   I  
                   N  
                   G

Quoi

Tout et son contraire,  
un peu plus de l'un.

Opaque comme la vie,  
l'œil incréé n'y voit rien  
alors que tout y est.

La lumière naît,  
d'un effritement multiple ;  
on tombe dans la résurrection,  
on renaît dans l'oubli.

Comment

La constitution hésite,  
Puis déborde.

La lumière fuit,  
les âges sombres commencent,  
et les moites attirances aveugles.

La fin est pensivement multiple :  
étirement, rebond ou dilution –  
ce n'est que songe oublié,  
non-instinct d'intelligences dépassées.

Yaël Nazé (ULg-FNRS)

\*\*\*

1. Voir « *Voyager dans l'espace* », CNRS éditions (2013) – disponible en version conférence, filmé à Rennes (XXXX) et Liège (XXXX).

## Les évènements du 7 avril 2008

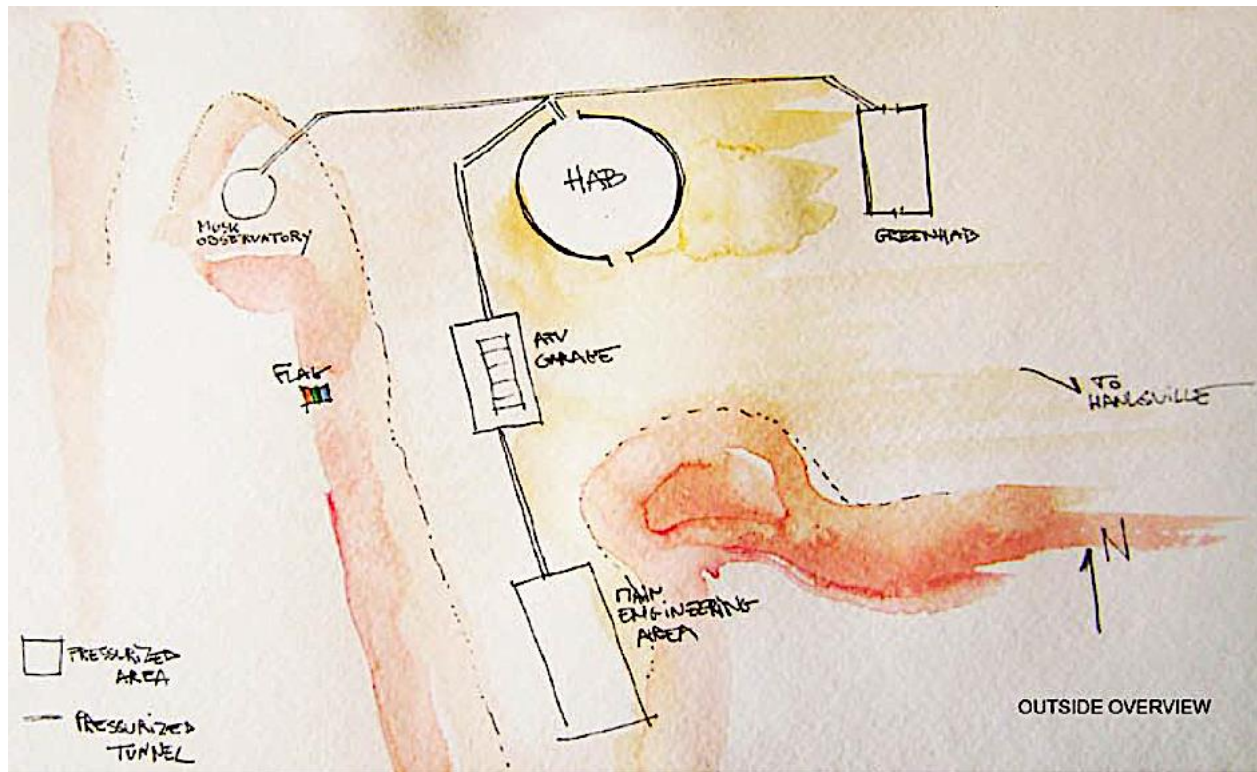
Guerric de Crombrugge

*Ingénieur aérospatial*

Quelque part au beau milieu de l'Utah, à la jonction entre les routes 24 et 95, se situe le petit village de Hanksville. Un peu plus de deux cents âmes y mènent une existence paisible, loin du chahut du monde. C'est la vie aride du Grand Ouest américain moderne comme on ne peut se la figurer correctement que dans les films d'auteur. De splendides canyons brûlent sous le soleil pendant que de rares humains vivent à l'abri dans leurs gigantesques véhicules tout-terrains climatisés. L'unique station-service, creusée dans la montagne à la manière des troglodytes, sert de point central au hameau. On y vend de la bière froide, des munitions pour le gros gibier, des CDs de Johnny Cash, ainsi que des t-shirt XXL sur lesquels on peut lire « *Where the Hell is Hanksville ?* ».

En quittant la ville par le Nord-Ouest, l'observateur attentif pourra repérer sur sa droite un chemin cahoteux s'évanouissant dans le désert. S'il a le courage de le suivre, malgré les nombreux panneaux d'interdiction, il traversera pendant quelques kilomètres des paysages quasi vierges de toute trace de civilisation. Il aura l'intuition d'être entré dans un territoire hors de l'espace et du temps, réservé à quelques initiés. Il déambulera ainsi dans ce décor apocalyptique, fait de formations géologiques dont il n'avait auparavant pas la moindre idée : de grandes falaises ocre, des montagnes rocheuses à l'horizon, de gros rochers stratifiés de teintes allant du rose pâle à l'orange vif, et plus encore. Surtout, il remarquera l'absence de végétation, si ce n'est pour quelques courageux arbustes accrochés à de modestes filets d'eau qui se font passer pour des ruisseaux. Peu à peu, à mesure qu'il pénétrera plus en avant dans cette nature rude et sauvage, il se sentira transporté dans un autre monde. Enfin, il comprendra que dans son errance il a, comme par magie, pris un raccourci pour la planète rouge, Mars. Ce doit être le cas, puisqu'il vient de tomber nez à nez avec une base spatiale.

Nous voici arrivés à la *Mars Desert Research Station*, aussi connue par son acronyme, MDRS. Bien loin des vaisseaux aseptisés de la science-fiction populaire, celle-ci se dresse vaillamment en hommage bricolé aux rêves glorieux d'enthousiastes pionniers. Elle témoigne d'un temps ancien, quand il était encore possible de s'imaginer posant le pied sur Mars, porté par la toute-puissante NASA en célébration grandiose du génie humain et de son insatiable soif d'exploration. Au pinacle de ces vastes ambitions, il y a le plan Mars Direct élaboré par l'iconique Robert Zubrin. Un ticket aller-retour pour quatre astronautes, incluant 18 mois de recherche et exploration sur place, pour la modique somme de 30 milliards de dollars. Ce n'était plus tout à fait l'Eldorado promis par Von Braun, mais l'ivresse des missions Apollo n'était pas complètement éteinte non plus. Zubrin publia d'abord son plan sous forme d'un article scientifique en 1990, puis d'un livre en 1996, jusqu'à finalement fonder la Mars Society en 1998. C'est cette même société, qu'il préside toujours, qui opère la MDRS.



Emplacement des différentes parties de la Mars Desert Reserach Station (MDRS).  
(Crédit : G. de Crombrugge)

Mais tout cela, bien sûr, c'était avant. Avant que l'incessant va-et-vient des successives administrations ne transforme l'enthousiasme en scepticisme, le scepticisme en frustration, et la frustration en épuisement. Avant que d'extravagants entrepreneurs ne s'intéressent à l'espace pour — enfin — en tirer les fruits commerciaux tant attendus. Avant que l'Europe ne se tourne courageusement vers la Lune ; plus proche, plus prometteuse, et, surtout, plus réaliste. Avant que la Chine et l'Inde ne concrétisent leur présence sur la scène internationale avec de solides ambitions. Avant que Mars ne se fasse oublier.

Deux éléments ont achevé de sceller le sarcophage de cette belle aventure. D'une part, il y a l'absurde projet Mars One qui, avec sa communication sensationnaliste et son flagrant manque de rigueur, a décrédibilisé une bonne fois pour toute l'exploration humaine de Mars aux yeux du grand public. D'autre part, il y a les annonces à répétition d'Elon Musk et ses gargantuesques plans de colonisation massive — faudrait-il dire d'invasion ? — bien trop ambitieux que pour être réellement concevables. Le public n'y croit plus, la barre est définitivement mise trop haut sans que les moyens ne suivent, le dossier est clos. Prochain arrêt : la Lune.

Malgré cela, la MDRS ne désemplit pas. Surannée, certes, mais vaillante ; elle tient bon ! A l'heure d'écrire ces lignes, la station a accueilli un total de 181 équipages, tous bénévoles. On s'y rend pour faire de la Science, pour parfaire nos Techniques, pour mieux comprendre l'Homme, mais, avant tout et surtout, pour jouer aux explorateurs. Les noms que certaines de ces équipes se donnent sont le témoignage éclatant d'un romantisme toujours bien vivace : « *Lonestar Highlanders* », « *Mars Without Borders* », ou encore « *Mission Red Planet* ». Car c'est bien de cela qu'il s'agit. La MDRS est finalement cet endroit magique — au sens littéral du terme — où la frontière entre science-fiction et réalité de



terrain s'estompe. Même le plus endurci des pyrthoniens finira par être transporté par la chaleureuse atmosphère de bonhomie volontaire. « Après tout, pourquoi pas ? » se dira-t-il enfin « On va y aller, sur Mars ! ».

Cette atmosphère jusqu'au-boutiste est sans aucun doute catalysée par le bagage culturel que la station a accumulé au fil des ans. Chacun vient y gonfler le fantasme collectif de ses propres espoirs, et ne manque pas d'y laisser l'une ou l'autre trace. Ce peut être aussi simple que l'usure des bâtiments, l'entretien des plantes, des traces de bottes dans le sable, un instrument oublié ou un patch de mission collé sur une porte. A ces marques matérielles s'ajoutent les innombrables souvenirs qui s'y sont construits. Un bric-à-brac intangible, aussi monstrueux par la taille que merveilleux par le contenu.

J'aimerais, pour illustrer cette idée, vous parler du 7 avril 2008. Si mes calculs sont bons, plus de 2 500 journées ont été vécues à bord de la MDRS. Celle dont je vais vous parler est perdue dans cette masse, anonyme. Elle n'a d'autre spécificité que de m'avoir pour témoin, et que je puisse ainsi vous en parler sans trop déformer la réalité.

Nous étions alors cinq membres d'équipage. Il y avait notre commandant de bord, le discret Shing-Yik, alias Boris. Originaire de Hong Kong, il venait de décrocher son master de l'Université du Michigan. Le rôle d'ingénieur de bord était rempli par Elnaz, née à Téhéran, étudiante à l'Université de Toronto, et passionnée d'astronomie. Le scientifique en chef était un allemand du nom de Jan, chercheur à l'Université Nationale de Singapour sur les problématiques liées au vieillissement. Finalement, nous étions deux Belges : Céline et moi-même. Cette fine équipée, assemblée depuis un florilège de candidatures spontanées, illustre bien le patchwork caractéristique de cette formidable entreprise qu'est la MDRS.

Ma journée du 7 avril démarre à 4 heures du matin. J'avais programmé mon réveil à temps pour pouvoir observer une tempête radio. Quelques jours plus tôt, nous avions en effet réparé le radiotélescope de la station. Celui-ci était destiné à l'écoute de Jupiter, le deuxième astre de notre ciel le plus brillant dans les ondes radiométriques. De temps à autres, son émission connaît d'importants sursauts, de véritables tempêtes. A ma connaissance, on ne comprend pas encore bien le mécanisme à leur origine — poétiquement nommée Instabilité Maser Cyclotron. On peut néanmoins prédire avec une relative exactitude quand ils se manifesteront en analysant la configuration de Jupiter et de sa lune volcanique, Io.

Ce matin-là, je reste de longues minutes à écouter patiemment le crépitement d'un petit haut-parleur destiné à convertir le signal radio en ondes sonores. L'aube commence à se lever, sans pour autant que l'on entende le gazouillement matinal des oiseaux, faute de faune. A travers le hublot, c'est la plaine rouge sur des kilomètres.

Au bout d'une demi-heure, je finis par me rendre à l'évidence : mon réveil avait sonné pour rien. Un problème au radiotélescope ? Un souci au logiciel de prédiction événements ? Des conditions météorologiques défavorables ? J'atteins les limites de mon amateurisme — et de ma fatigue — et décide de remettre le mystère à plus tard. La consolation est toutefois de taille : ce que j'entends n'est rien de moins que le bruit de fond cosmologique.

Mon deuxième réveil est à 9 heures. Il règne, chaque matin, une joyeuse ambiance. Même après plus d'une semaine sur place, nous restons subjugués par la beauté des alentours et excités par nos découvertes quotidiennes. Par découverte, j'entends également les découvertes humaines. Bien que portés par le même idéal, nous sommes après tout de parfaits étrangers les uns pour les autres. Il y a beaucoup à apprendre au contact des histoires de chacun.

Et puis, en toute honnêteté, il y a aussi ce délicieux pain fait maison qui rompt la monotonie de la nourriture lyophilisée. Ce matin, on le sert vert ! Un petit malin aura trouvé du colorant au fond d'une armoire.

Avec un rapide coup d'œil aux enregistrements du radiotélescope, je me rends que la tempête radio a bien eu lieu ! J'ai manqué de peu un signal de type L. Un son décrit par les experts comme celui de vagues qui se briseraient sur une plage.

Nous passons notre matinée dans le laboratoire. Jan nous y apprend comment préparer des cultures de bactéries à partir d'échantillons de sol que nous avons récoltés. Nous l'écoutons religieusement pendant qu'il déroule sous nos yeux ébahis les secrets du vivant. Toutes ces opérations n'ont d'autre utilité que d'assouvir notre curiosité intellectuelle. Nous nous appliquons néanmoins à les exécuter avec le sérieux requis quand on s'attelle à une tâche aussi noble et grande que la recherche de la vie sur Mars. Et de la vie, nous en trouvons ! Bien qu'hostile en apparence, et surtout très salé, le sol du désert de l'Utah regorge de petits organismes en tout genre. C'est un véritable hymne à la vie qui se joue dans nos boîtes de pétri.

Quelques heures plus tard, nous nous remettons à table pour le déjeuner. Les discussions vont bon train, principalement autour de l'horreur de la nourriture. Un mal nécessaire afin de rendre l'expérience aussi réaliste que possible. Aujourd'hui ce sont des boîtes de spaghetti « Princess ». Je fais semblant de partager l'indignation générale, mais en réalité cela ne me dérange pas du tout. Mon corps est tellement mobilisé par ce qu'il vit que je suis dans un état d'appétit permanent. Nous discutons aussi du film que nous avons regardé ensemble la veille ; Star Wars. Elnaz n'a pas aimé. Cette fois mon indignation est réelle ! Ainsi se poursuit notre repas, dans l'insouciance de conversations anodines autour de ce qui nous réunit : cet amour inexplicable pour la folle aventure qui pourrait se jouer dans l'espace.

L'après-midi, nous nous mettons en route pour une activité de sortie extravéhiculaire. Nous enfilons nos scaphandres avec une rigueur monacale. Il s'agit ensuite de respecter le protocole de sortie, c'est à dire une petite quarantaine de minutes dans le sas de décompression à attendre que rien ne se passe. Nous utilisons des quads afin de pouvoir parcourir de plus longues distances, avec du matériel parfois très lourd. C'est un réel plaisir que de se balader ainsi.

La veille, nous avons repéré quelques sites pour le prélèvement d'échantillons. Nos critères de sélection sont clairement plus orientés vers les formations géologiques spectaculaires que nous pourrions découvrir que vers des considérations strictement biologiques. D'autant qu'aucun de nous n'a la formation — et encore moins l'expérience de terrain — requise pour ce genre d'activité. Qu'importe !

Au détour d'un canyon, nous croisons d'authentiques cow-boys guidant leurs vaches à travers les étendues sauvages. Nous voilà téléporté en absurdie. Sont-ce des personnages du Grand Ouest qui se sont incrustés sur la planète rouge, faisant fi de toutes les lois de la physique ? Ou seraient-ce plutôt des extra-terrestres qui font une incursion dans un film de Sergio Leone ? Nous avons à peine le temps de nous saluer que nos chemins se séparent. La scène n'a duré qu'un instant mais reste gravée dans nos mémoires : la rencontre inattendue, sur un coin de désert oublié, d'un passé désuet et d'un futur ambitieux — ou serait-ce l'inverse ?

Le soleil se couche et le vent se lève, nous rentrons. Il est grand temps d'écrire nos rapports. J'accompagne Céline dans son tour de maintenance, une tâche essentielle de l'ingénieur de bord. Chacun des systèmes de la station est un assemblage de plusieurs solutions bidouillées avec plus ou moins de succès. Il y a donc une foultitude d'interrupteurs à vérifier, de vannes à ouvrir, et de cadrans à lire. Nous terminons par un entretien des crasseux et bruyant générateurs qui nous alimentent en électricité.

Nous débriefons ensuite de la journée écoulee et préparons celle du lendemain, guidés par Boris. Peu à peu, la conversation bifurque vers le futur de l'humanité. De par ses recherches, Jan est féru d'immortalité et des concepts qui gravitent autour de la singularité. Bien qu'il ne le nomme pas ainsi, je découvrirai plus tard qu'il parlait de transhumanisme. Au plus profond de la nuit, nous avons dérivé jusqu'au Point Omega. Il s'agit d'un hypothétique point final d'unification divine vers lequel tout serait en train de converger. Le nom du concept est de Teilhard de Chardin, qui le tire de l'Apocalypse dans laquelle on peut lire « Je suis l'alpha et l'oméga, le premier et le dernier, le commencement et la fin ». Jan explique avec emballement la possible interprétation physique de ces croyances spirituelles. Nous touchons ici au discours le plus rare, mais aussi le plus précieux ; celui des convictions intimes sur le sens des choses et la nature du monde. Ivres de vertige, pris dans ce kaléidoscope de lois scientifiques et spéculations fantasques, nous allons nous coucher.

Voici le récit de cette journée anonyme, perdue parmi des milliers d'autres. Elle n'aura certainement aucune conséquence significative dans la lourde machinerie qui doit amener l'humanité à poser le pied sur Mars. Comme la journée de la veille et celle du lendemain, c'est une innocente suite d'anecdotes qui ne mériteraient même pas une note de bas de page dans un compte-rendu historique de la MDRS.

A une autre échelle, par contre, c'est une formidable aventure humaine. C'est l'histoire d'un équipage, d'hommes et de femmes de nationalités et de cultures différentes, isolés au milieu d'un océan de poussière rouge, mais soudés autour de leur passion pour l'espace et de leur soif d'aventure. Je n'ai jamais revu Boris, Elnaz et Jan, et j'ai fini par perdre de vue Céline. Mais ensemble, nous avons appris quelque chose que je ne suis pas près d'oublier.

Finalement, c'est de cela que la MDRS est le nom : une chaîne ininterrompue d'anecdotes tout à la fois en marge et au cœur de la grande Histoire. Voilà aussi sans doute de quoi notre exploration du système solaire devrait être faite ; un tissu de nostalgie et de romantisme, à mi-chemin entre une patiente entreprise poétique et une délirante conquête du cosmos.

## La tâche du chercheur

Olivier Chazot

*Ingénieur, Professeur en Dynamique des Fluides*

Cher Docteur Johannus,

Il y a des chemins dans la nature qui ne se suivent qu'au moyen de balises, chacun les trace à travers elles par sa propre marche. C'est l'image qui me vient en répondant à votre dernier message où vous me demandez conseil pour la poursuite d'une carrière dans la recherche scientifique. Vous évoquez notamment votre motivation et plus fondamentalement vous vous interrogez sur l'activité scientifique en elle-même. Qu'est-ce que la recherche ? Qu'est-ce qu'une bonne recherche ? Comment doit-elle s'articuler avec la société ? et avec notre propre vie ? Vous estimez que les critères d'évaluations ou de justifications couramment employés qui en font l'enjeu d'aventures techniques et commerciales avec les jeux de compétitions qu'ils induisent sont souvent mal adaptés pour orienter un scientifique qui voudrait vivre son travail de recherche comme une vocation. Il semble par ailleurs que cette activité soit pour une large part toute tournée vers la production de savoir à profusion, qu'elle récolte sur des champs toujours plus vastes, mais qu'elle s'éloigne de la pensée et soit devenue moins soucieuse de cultiver le terrain où des questions plus profondes pourraient éclore, même timidement. Leurs racines pourtant atteignent ce qui fait fondamentalement notre condition d'homme moderne.

Je ne saurais trop vous remercier pour toutes les réflexions que vous suggérez et l'opportunité ainsi offerte d'échanger sur des sujets plus essentiels. Les occasions sont rares de lever la tête et considérer ce que nous faisons avec perspective.

Cependant je ne répondrais pas directement à ces questions, je voudrais plutôt les suivre. Elles sont toutes pertinentes et peuvent être abordées sous de multiples angles, tous valables, mais il faut les laisser nous accompagner elles ne manqueront pas de se poser encore et toujours, ce ne sont pas des questions que l'on traite une fois pour toutes. Si je m'en écarte un peu d'abord c'est qu'elles ont tendance à nous faire considérer un idéal, or nous avons besoin pour commencer de chercher le réel et de nous y tenir. Toute discussion critique par ailleurs serait dépassée et impropre à définir l'activité scientifique, celle que nous voudrions voir mener comme une œuvre au-delà de nos occupations quotidiennes. Un chercheur s' imagine toujours plongé dans un monde de questions auxquelles il doit trouver ou proposer des réponses, mais ne doit-il pas premièrement entendre ce qui passe à travers elles ? C'est en ce sens que je voudrais échanger avec vous quelques réflexions en considérant notre tâche de chercheur pour évoquer ce que nous sommes appelés à être. Car quel que soit notre environnement, et d'autant plus dans les conditions actuelles où l'utilité et l'efficacité se font de plus en plus saillantes, la recherche nous demande avant tout de nous trouver nous-mêmes.

A la science, on prête attention, on l'interroge sur les sujets les plus divers, on lui demande conseil et on y fait référence. Rares sont les sujets où elle n'est pas convoquée, au premier chef, pour donner ses analyses et ses conclusions. On lui accorde crédit et confiance. Sa voix fait autorité, non qu'elle oblitère le débat mais elle en donne le cadre et le mode. Ses vues dépassionnées et générales sont garantes d'objectivité et de sérieux.

Chacun reconnaît volontiers que la science vient d'un passé des plus solides. Au cours de celui-ci ses hypothèses et conclusions ont été débattues et corrigées à différentes étapes pour toujours retrouver

un chemin ferme et mieux assuré. Nous y voyons une histoire prestigieuse, quelque fois idéalisée avec de grands noms, aux contributions de tous horizons qui en font une œuvre dans le concert de l'effort humain. Force est de constater que nous lui sommes largement redevable du monde dont nous héritons et nous l'associons sans hésiter au progrès. Elle est pour chacun l'image de la construction opiniâtre, des découvertes, des formulations universelles et des questions toujours portées plus loin.

Si elle met en œuvre la raison, elle ne s'y résout pas. Elle nous porte à quelque chose qui la dépasse. Elle vise à construire une image du monde et s'emploie à développer des connaissances pour nous le rendre accessible.

Vous savez aussi que la science reçoit des critiques et se confronte à ses limites. Sa quête incessante de vérité a pu être jugée comme étant plutôt une intention de vérité, ou même un besoin de vérité, qui la rapprocherait d'une croyance. Ainsi la science s'est accaparée le discours sur la réalité en ne laissant souvent que trop peu de place aux ressources de la philosophie. Elle n'a cependant pas contribué à des avancées substantielles quant au problème ontologique et la question du réalisme reste largement ouverte en physique. Etant vu comme une démarche, comme une méthode par laquelle elle excelle, mais n'ayant pas en elle-même les moyens d'une réflexion sur son activité propre on a pu dire que *la science ne pense pas*. Plus critique encore, il a été souligné que si le savoir et la pensée se trouvaient séparés nous serions alors à la merci non seulement de notre technologie mais essentiellement de nos connaissances pratiques. Nous ne serions, dès lors, *plus capables de comprendre ce que pourtant nous serions capables de faire*. En cela apparaît les marques d'une science qui tout en opérant des percées dans la connaissance se coupe par ailleurs d'autres champs d'appréhension du monde. *La science manipule les choses et renonce à les habiter*.

Il nous faut passer à travers ces différentes visions de la science. Elle sera toujours agile, enthousiaste et jamais résignée avec son esprit de conquête et de calcul. Elle visera encore à s'étendre à tous les domaines de l'activité humaine sans pourtant saisir complètement les choses elles-mêmes. Cependant si l'on se borne à ces images c'est que la science n'a pas encore été pour nous une expérience vécue. Car si elle a des succès, ils sont sans doute ceux qu'il nous reste à apprivoiser et si elle désenchante le monde, elle ne désenchante qu'une apparence du monde.

Le chercheur a aussi levé le nez au ciel, il a lui aussi enfoui son regard dans l'espace, peut-être même s'y est-il perdu d'avantage que d'autres. Pour lui, produire une connaissance, c'est vouloir dire le monde, chercher ce qui est réel, comprendre, c'est à dire prendre en soi, accueillir ce qui l'atteint. En cela la science est une entreprise poétique au sens premier du terme : il s'agit de pouvoir parler de la nature et des phénomènes que l'on y rencontre. Quelque chose doit passer du monde en nous. Mais il faut aussi le rendre manifeste, que l'on puisse le reconstruire dans un langage qui le représente et qu'ainsi quelque chose passe de nous au monde. Le chercheur doit pouvoir dire et faire exister la réalité qu'il reçoit.

C'est dans ce modeste mouvement de création que les mathématiques lui sont souvent d'un ressort particulier. Elles lui permettent d'exprimer les harmonies qu'il dégage pour rendre ce monde intelligible ou tout le moins dicible. Car elles fonctionnent en nous comme elles semblent fonctionner hors de nous. Elles lui fournissent un langage, des concepts, des outils et à bien des égards la substance même de ce qu'il construit.

Sur ce vaste chantier, où souvent les échafaudages se confondent avec l'édifice de la nature, le chercheur est un veilleur. Qui donc l'a posté là ? A cette frontière, aux limites de ce qui est connu et inconnu. Et que fait-il ? Un veilleur semble toujours un peu hors de l'action, hors de l'activité, d'autant plus qu'il peut paraître étrange de veiller sur l'inconnu. Là où on ne sait pas encore ce qu'il y a

précisément à voir. C'est qu'il veille pour les hommes, il se tient au plus haut de lui-même, à sa tâche, toujours soucieux d'alimenter la connaissance humaine comme un petit foyer et il voit de loin en loin d'autres lueurs qui vacillent. S'il ne perçoit pas encore ce qu'elles dessinent, il sait qu'elles ne brillent pas pour lui seul et qu'elles sont déjà une expérience solidaire du monde. Quelque fois entend-t-il un appel ? Il est semblable à celui lancé vers la vigie du livre d'Esaïe : « Sentinelle, Sentinelle à quoi en est la nuit ? Et la sentinelle dit : le matin vient et aussi la nuit ». Réponse à l'image du savoir qu'il construit, à la fois faisant face à la clarté qui progresse et à l'énigme du monde qui perdure. Le chercheur est un être en éveil, son attention et sa posture lui donne de recevoir le monde autant qu'il le cherche. Son corps même est à l'œuvre et tous ses sens deviennent vision. La sonde qu'il tend dans cette réalité le renseigne qu'il y a là quelque chose à prendre en compte. Il projette de constituer une objectivité à travers tout ce qu'il apprend, tout ce qu'il note, comme pour faire exister cette frontière sur laquelle il se tient. S'il s'y porte trop en avant la frontière se brouille, car on ne peut trop tirer à soi la réalité du monde au risque de la couper de sa vie propre. Mais si elle nous accueille avec nos constructions c'est que nous nous sommes prudemment avancés dans le gué, là où la connaissance est un lieu de rencontre avec le monde.

Tout cela est exprimé par l'Archer sculpté par Bourdelle, on ne pourrait mieux le dire : voilà notre veilleur ! Allez le voir à nouveau, les grandes œuvres sont des portes à travers lesquelles tout ce qui nous entoure devient une compagnie. Héraclès vise le ciel prenant appui sur des rochers, au bord du lac de Stymphale, qui semblent lui donner le contre point de sa puissance. Il est tout contenu dans son arc et tout en lui est requis pour son geste d'où peut jaillir l'élan qui ira au-delà de lui-même. Il regarde à hauteur d'horizon et nous donne l'assurance qu'il porte déjà en lui la cible mais son arme est sans arme, elle n'a ni corde ni flèche. Elle est pourtant portée à sa pleine puissance. On ne peut manquer de sentir qu'il est entièrement intégré à son effort comme s'il était lui-même la corde. Ses appuis sont réels et il pointe quelque chose qui n'est pas encore visible. Pourtant il le rend présent. Sa tête prend l'aspect cinétique des oiseaux qu'il veut atteindre. Elle est dans l'axe des deux mains qui donnent sa tension à l'arc. Tout s'équilibre dans l'axe de son œil qui rejoint l'objectif comme une flèche. Il tient tendu entre ses bras une force qui le dépasse. Tout en lui est pure visée. Il se place dans les lois du monde où par-delà lui-même la flèche et la cible se fondent.

Ainsi est le chercheur, qui vise hors de soi pour recueillir une expérience du monde en soi et qui tient la connaissance sans cesse en équilibre entre l'action et la pensée. Voilà peut-être tout notre travail. Le reste prendra les couleurs de l'environnement et des circonstances qui seront les vôtres. Il y aura bien des aléas, bien des embuches, l'image symbolique décrite ici semblera disparaître souvent, notamment dans le cadre de la recherche actuelle qui prend la forme de l'expertise et rend si difficile le rôle du chercheur. Cependant demandez-vous sur quels horizons vous veillez ? Quels sont ceux que vous portez en vous ? Laissez cette question trouver sa place dans votre travail. Les autres questions vous suivront où que vous alliez. Mais celle-ci, que vous aurez accueillie, prendra la forme de votre tâche et éclairera peu à peu votre marche. La science comme l'art ne visent rien de visible mais entendent rejoindre le monde et le rendre présent jusqu'en nous. Soyez patient, les lignes qui nous portent vers nous-même se dessinent avec le temps.

Très cordialement,



*Heraklès archer (Sculpture 1909, A. Bourdelle)*

# L'Exploration mathématique en questions

Dominique Lambert

*Docteur en Physique et en Philosophie*

## **Toute exploration d'un espace physique ne se traduit-elle pas par celle d'un monde mathématique ?**

L'exploration physique du monde est liée étroitement à la naissance des mathématiques. La découverte des « nouveaux mondes », par exemple, n'est pas sans lien avec l'émergence d'outils géométriques indispensables pour la navigation. Si la géographie et la cartographie ont des liens intimes avec la géométrie, il en va de même pour l'astronomie. La nécessité de repérer les étoiles et les planètes sur la voûte céleste va entraîner le développement de techniques, comme celle de la projection stéréographique par exemple, qui permet de reporter sur un plan les positions des objets célestes. Pour explorer un monde physique et s'y retrouver, il faut s'en donner une représentation et celle-ci (que l'on devrait écrire « re-présentation ») fait pratiquement toujours naître un espace mathématique. On peut vérifier aisément cela à toutes les époques de notre histoire.

Le monde empirique est d'abord celui de l'étendue spatiale, celui que décrivent les géographes et les explorateurs. Mais ce monde est aussi celui de la lumière et des sons. L'optique est très tôt, et d'abord, une optique « géométrique », où les rayons de lumières ne sont autres que les droites d'un plan ou d'un espace à trois dimensions. Mais, dès le *Timée* de Platon, et avant chez les Pythagoriciens, on voit que la musique fait appel à la théorie des proportions, des moyennes (des « médiétés ») c'est-à-dire à des techniques de section de la ligne. Et les gammes présentent elles-mêmes des symétries et sont susceptibles d'opérations qui rejoignent celles que l'on peut opérer sur une ligne géométrique <sup>1</sup>. Plus tard, l'étude plus générale des signaux sonores, mais pas seulement, reviendra à une exploration d'espace de fonctions, grâce à la théorie des séries de Fourier.

La découverte artistique du monde est aussi liée à celle de nouveaux univers mathématiques. La perspective des peintres de la Renaissance fait émerger la géométrie projective et descriptive. Un des points essentiels de la géométrie projective est le fait que deux droites se coupent toujours. Ceci est amené naturellement par la considération d'un point de fuite qui est celui où se rencontrent et se coupent les lignes représentant, en perspective, des droites parallèles (rails de chemin de fer s'éloignant vers l'horizon, par exemple). La complétion de l'espace usuel des géomètres antiques par des éléments à l'infini (points, droites et courbes diverses à l'infini) est née des nécessités créatives de la représentation picturale. L'espace esthétique ne se distingue pas ou peu de l'espace mathématique qu'il a fait naître.

Elle fait même apparaître la notion d'espace comme tel. En effet, au début de leur discipline, ce que les géomètres étudiaient, c'étaient des objets « dans » un espace, mais non cet espace lui-même. La représentation de ce qui est vu dans des « grilles » (qui deviendront des systèmes de coordonnées, cartésiennes par exemple) fait advenir une méthode d'appréhension de l'espace comme tel. Celui-ci, même vidé de son contenu pourrait-on dire, reste un objet d'étude possible. L'exploration des objets dans un espace laisse la place à une exploration du monde des espaces possibles...

Si on étudie l'histoire plus récente, on s'aperçoit vite que la description du monde de la relativité restreinte, celui dans lequel on peut réconcilier la mécanique et l'électromagnétisme, ne peut se faire qu'en introduisant un nouvel espace : l'espace de Minkowski muni d'une géométrie non-euclidienne



dont les propriétés de symétrie sont décrites par un groupe de transformation appelé le « groupe de Lorentz » ou, plus généralement, celui de « Poincaré » si on lui adjoint les translations spatiales. Se mouvoir dans le monde relativiste, c'est explorer les ressources de cet espace de Minkowski. Comprendre les paradoxes étonnants qui y apparaissent (celui des Jumeaux de Langevin par exemple !) nécessite de saisir la manière dont on se meut et dont on mesure les distances au sein de ce continuum quadridimensionnel, dans cette étoffe d'espace-temps.

Un regard nouveau sur un espace empirique découvert et exploré fait donc naître, de manière concomitante, un espace proprement mathématique. Si bien que l'on ne sait plus si l'on explore un espace abstrait ou naturel, tant les deux sont imbriqués. Pour parler du second, je ne peux faire autrement que de me référer au premier, pour explorer le second, je ne peux rien faire d'autre que de renvoyer au premier.

### **Toute exploration d'un monde mathématique ne se traduit-elle pas par celle d'un univers empirique ou esthétique ?**

Ceci a un corollaire. Si nous explorons un univers mathématique assez riche, il peut se faire que nous explorions, sans le savoir, un univers empirique possible ; univers seulement possible mais non réalisé en acte ou, possible et actualisé, mais cependant non encore découvert. On pourrait même faire la conjecture que toute exploration d'un univers mathématique riche (encore faudrait-il définir ce terme ; par exemple, riche en symétries, en invariants, etc.) doit nécessairement déboucher sur une exploration d'un univers empirique. Remarquons, au passage, que nous ne limitons pas la notion d'exploration empirique à celle de l'espace des réalités naturelles. Celles-ci pouvant être physiques, mais aussi biologiques, car nous ne devons pas oublier qu'il existe en effet, dans le monde vivant, des organismes dont l'étude ne peut se faire sans l'aide d'outils géométriques (capsides des virus, nœuds des brins d'ADN, radiolaires, symétries des fleurs, des pommes de pins, formes de cellules, etc.) <sup>2</sup>, comme l'avait déjà vu très clairement d'Arcy Thompson <sup>3</sup>. Nous ne limitons pas l'univers au monde « naturel », car une exploration d'un monde mathématique riche peut se traduire par celle d'un univers de création artistique, d'un monde esthétique. Pensons aux lithographies d'Escher par exemple ou à des sculptures inspirées par des courbes algébriques. La quartique de Klein <sup>4</sup> en est un bel exemple. La quartique de Kummer <sup>5</sup> en est un autre. Ces deux « figures » de la géométrie algébrique ont des propriétés de symétrie étonnantes et riches en même temps que des liens avec la géométrie projective (géométrie projective finie et plan de Fano pour la première, géométrie projective réelle sur un espace à 4 dimensions pour la seconde). Leur puissance esthétique est indéniable et a inspiré les artistes.

C'est intéressant de voir que l'exploration de mondes abstraits peut conduire à celle de mondes très concrets. On sait que l'intuition de la notion de structure en anthropologie structurale vient de celle des mathématiciens, des « bourbakistes » en particulier, via André Weil <sup>6</sup>. L'exploration de la notion abstraite de structure (en tant que la donnée d'un ensemble sur lequel on peut définir des relations ou des opérations d'un certain type) permet alors celle de l'espace des liens matrimoniaux ou de filiation dans des groupes humains particuliers. De même l'exploration de la variété riemannienne quadridimensionnelle de la relativité générale conduit aux corrections très concrètes et très utiles lorsqu'on veut utiliser efficacement des GPS.

Jusqu'à présent nous avons utilisé le terme d'exploration « mathématique » sans le définir, ni chercher à le caractériser. Explorer l'espace « naturel », « physique » ou même « esthétique » peut se réaliser au moyen de la perception ou d'instruments variés. Que penser de l'exploration d'un espace ou d'un monde mathématique ?

## **Toute exploration d'un monde mathématique ne serait-il pas l'exploration d'une multitude d'autres mondes ?**

Il est utile de se demander ce que peut bien signifier l'exploration d'un « univers » mathématique. Le terme lui-même peut d'emblée faire problème, puisque divers points de vue coexistent quant à la nature de ce genre « d'univers ». Les réalistes accepteront volontiers de dire que l'on peut le découvrir ou l'explorer puisqu'il est déjà-là ! Mais les constructivistes soutiendront, à l'inverse, qu'il ne reçoit son existence que de nos constructions et qu'il ne préexiste pas à celles-ci. Nous pensons que l'exploration du « monde » mathématique est assez proche d'une activité artistique. Il y a de fait quelque chose, dans l'activité mathématique, qui oppose une résistance à nos idées et à nos concepts. Quelque chose de « réel » est de fait à explorer, mais dont le statut ontologique reste difficile à préciser. Cependant, la description de ce « réel », qui se donne à partir de l'intuition, ne peut se faire que par la médiation d'un langage, qui à son tour enrichit et définit les contours de la « chose », de la « réalité » (res) mathématique. L'exploration mathématique est comme celle de la Montagne Sainte Victoire à Aix-en-Provence, par les peintres. Les représentations picturales approchent et constituent en même temps cette « montagne ». Mais l'aspect créatif, « poétique » (au sens étymologique), est probablement encore plus marqué en mathématique, car il y a un véritable mouvement de retour par lequel la représentation d'une réalité dans un langage formel devient elle-même un terrain qui suscite et engendre un élément de réalité nouvelle. L'exploration est donc en même temps découverte et création et une profonde dialectique relie ces deux pôles indissociablement et dynamiquement liés . <sup>7</sup>

La pratique des mathématiques se situe à l'intérieur de systèmes formels ou quasi-formalisés. Les systèmes ou langages formels sont constitués de symboles dont on extrait des expressions bien-formées soumises à des règles précises de syntaxe. A partir d'expressions bien-formées de base, les axiomes, on déduit alors, pas-à-pas, de nouvelles expressions bien-formées, les théorèmes, au moyen de règles de déduction. Les mathématiques ne peuvent se réduire à de simples manipulations de systèmes de formules, car ce qui est intéressant est précisément l'interprétation des formules dans des « mondes » d'objets où ces dernières prennent sens. Ces « mondes » sont ce que l'on nomme les « modèles » des langages formels <sup>8</sup>. En général, un langage formel suffisamment riche possède une infinité de modèles inéquivalents. On peut essayer, par exemple, d'appréhender ce que sont les nombres réels au sein d'une axiomatique précise. Cependant, ce qui est tout à fait étonnant et passionnant c'est que cette axiomatique est susceptible d'être interprétée dans des modèles très variés. Le modèle « standard » (celui qui représente un nombre réel comme un point sur une droite illimitée) ne comporte pas d'infinitésimaux, alors que les modèles « non-standards » en comportent, qui donnent sens à la manière dont Leibniz pratiquait le calcul infinitésimal. Il existe de même des modèles non-standard des nombres naturels qui ne sont pas isomorphes à celui que nous avons appris à l'école primaire. On peut donc dire que, dès qu'on tente de « dire » formellement un concept mathématique, une infinité de mondes correspondent à ce que l'on dit ! Explorer un univers mathématique, c'est donc se mouvoir en même temps dans une multitude de monde différents. On n'explore au fond jamais un seul monde à la fois quand on commence à interpréter les formules issues d'une axiomatique. Les mathématiques, ou plus généralement les sciences formelles, trouvent une partie de leur richesse dans le va-et-vient entre des modèles et aussi dans la construction de traductions qui les relient.

En fait, la sémantique d'un langage ne s'épuise pas dans un seul modèle. Elle se donne dans la collection complète de tous les modèles de ce langage. Il existe un concept mathématique qui permet de décrire d'un coup pourrait-on dire tous les modèles d'un langage et donc tout son contenu sémantique. Il s'agit de la notion de « catégorie des modèles » et de « topos de Grothendieck ». Ces notions sont très intéressantes car, non seulement elles permettent de rassembler en une seule notion toute une collection d'univers qui interprètent ce qui est dit dans un langage, mais elles font voir aussi la structure

« géométrique » de cet « espace des interprétations ». Aujourd'hui, des auteurs comme Laurent Lafforgue ou Olivia Caramello <sup>9</sup> nous ont appris à entrer et à explorer cet univers (les topos de Grothendieck) de mondes, ce « monde de mondes », qui donne sens à un contenu mathématique. On pourrait dire que ce sont eux qui, à la suite de Grothendieck, nous ont montré toute la richesse de l'exploration mathématique en nous apprenant à vivre et à penser dans plusieurs mondes à la fois car, au fond, entrer dans la compréhension d'un contenu formel ce n'est jamais visiter un seul monde. C'est d'ailleurs peut-être cela qui fait la différence entre une exploration « formelle » et une autre, « empirique » ou « esthétique ».

Le langage mathématique par lequel on « dit » le réel formel a donc une double puissance : celle de susciter de nouvelles intuitions qui, à leur tour, enrichiront et modifieront les contours de la réalité existante, mais aussi, et en même temps, celle de produire inévitablement un monde d'interprétations très variées encapsulées dans cette structure appelée le « topos » <sup>10</sup>. De manière fondamentale, ces deux puissances ne sont en fait qu'une seule chose. C'est cet univers d'interprétation du formalisme qui est puissance d'engendrement de nouvelles intuitions. C'est cet univers, ce « monde de mondes », qui rétroagit pourrait-on dire sur la réalité mathématique pour l'enrichir et le former plastiquement. La puissance génératrice de ce « monde de mondes » lui vient de sa capacité à produire de l'intuition « géométrique ». Et c'est justement, comme l'ont bien montré les travaux de Lafforgue et Caramello <sup>11</sup>, la propriété essentielle des topoi que de conférer une sorte d'interprétation « géométrique » aux langages formels. Le topos étant une sorte de généralisation de la notion d'espace (au sens géométrique). C'est en donnant un sens intrinsèquement « géométrique » au formalisme, au langage, que le topos suscite de l'intuition qui rencontre inévitablement celle qui fonde et suscite l'écriture formelle (qui n'est jamais un pur jeu sur des formules !). Le réel mathématique se donne et se constitue plastiquement par la médiation d'une structure qui donne une consistance « géométrique » aux interprétations langagières. Son exploration est ultimement celle d'un topos et non pas celle d'un univers unique. En mathématique, l'exploration est donc en partie (mais pas totalement !) génératrice de ce qui est exploré et la description formelle de l'exploré confronte inévitablement l'explorant à des mondes multiples et captivants, que son langage fait naître au fur et à mesure de son exploration...

\*\*\*

1. Cfr J.-L. Migeot, *Des chiffres et des notes. Quand la science parle à la musique*, Bruxelles, Académie Royale de Belgique, Transversales, 2015.
2. Cfr P. Bourgin, A. Lesne (ed.), *Morphogenèse (l'origine des formes)*, Paris, Belin, 2006.
3. W. D'Arcy Thompson, *On Growth and Form*, Cambridge University Press, 1917, 1942.
4. S. Levy (ed.), *The Eightfold Way. The Beauty of Klein's Quartic Curve*, Cambridge University Press, 1999.
5. R.W.H.T. Hudson, *Kummer's Quartic Surface*, Cambridge University Press, 1905.
6. A. D. Aczel, *Nicolas Bourbaki. Histoire d'un génie des mathématiques qui n'a jamais existé*, Paris, Lattès, 2006, pp. 159-181.
7. Cfr J. Ladrière, *Mathématiques et formalisme*, *Revue des Questions Scientifiques*, 20 octobre 1955, pp. 538-574.

8. Cf. H. Sinaceur, *Corps et Modèles*, Paris, Vrin, 1991. Pour une lecture philosophique de la notion de modèle nous renvoyons à A. Badiou, *Le concept de modèle*, Paris, Fayard, 2007.
9. Nous renvoyons par exemple à : O. Caramello, « The unification of Mathematics via Topos Theory », arXiv :1006.3930v1 (20 June 2010), et à : L. Lafforgue, « La théorie de Caramello : un cadre en construction pour des correspondances du type de celles de Langlands ? », <https://www.laurentlafforgue.org/math/TheorieCaramello.pdf>
10. Cf. J. L. Bell, *Toposes and Local Set Theories. An Introduction*, New York, Dover, 1988.
11. Nous renvoyons ici au livre de Olivia Caramello, *Theories, Sites, Toposes. Relating and studying mathematical theories through topos-theoretic 'bridges'*, Cambridge University Press, 2018.

## Explorations (triptyque)

Stéphanie Roland

Artiste

1.

### Diego Urbina

*Mars-500 est un programme expérimental simulant sur la terre les conditions rencontrées par un équipage lors d'une mission aller et retour vers la planète Mars. Cette expérience s'est déroulée dans une installation isolée du monde extérieur, reproduisant les parties habitables d'un vaisseau spatial, celles d'une navette de débarquement sur Mars ainsi qu'une petite fraction du sol martien.*

*L'objectif du programme Mars-500 est de collecter suffisamment de données, de connaissances et d'expériences pour préparer, un jour, une mission vers Mars. L'étude cherche notamment à déterminer les effets physiologiques et psychologiques sur les membres d'un équipage confiné dans un environnement restreint pendant une longue période. Les effets du stress, la régulation hormonale, les réponses immunitaires, la qualité du sommeil ou bien l'humeur sont, par exemple, des caractéristiques évaluées.*

*Diego Urbina, ingénieur spatial d'origine italo-colombienne, a été sélectionné avec cinq autres participants parmi un grand nombre de candidats de plusieurs pays après avoir passé une série de tests destinés à écarter les personnes ayant des caractéristiques psychologiques incompatibles avec l'épreuve.*

### Communiqué de presse, ESA agence spatiale européenne, 3 mai 2010 (extrait)

Légèrement engourdi par l'air confiné du vaisseau, je mis quelques secondes pour revenir à moi, dans cette cellule de neuf mètres carrés du module EC-150 où je vivais, enfermé depuis quatre cent treize jours, unique endroit de Mars-500 où je me retrouvais parfois seul. Sur mon lit était ouvert Cent ans de solitude de Gabriel García Marquez; à ses côtés, la lampe de chevet était encore allumée; il était onze heures du soir.

J'avais toujours aimé lire.

Pendant, l'intensité de mes lectures sur Mars-500 avait pris un tour tout à fait nouveau pour moi. J'avais décidé avant le début de l'expérience, d'emporter de nombreux livres, par précaution, afin d'occuper mes moments creux, sans toutefois me douter de l'importance cruciale qu'ils auraient durant cette longue expérience. Ils m'amenaient un fragment de réel dont notre expédition était cruellement dépourvue. Le monde extérieur me manquait, tous ces petits détails du quotidien, un chien qui apparaît et aboie, un objet qui vole, une femme qui passe dans la rue. Tous ces événements spontanés qui jalonnent le quotidien, de manière si naturelle qu'on ne les perçoit pas de manière signifiante; alors que je me trouvais allongé sur mon lit construit dans ce faux bois qui était censé nous rappeler l'archétype d'une maison familiale chaleureuse, ces instants-là me manquaient. Le temps de chaque journée se dilatait maintenant infiniment au même rythme que mes correspondances par mail. Chaque communication était reçue avec un décalage de quinze minutes et la communication en temps réel avec ma famille et mes collègues, en dehors du vaisseau, me semblait un lointain souvenir issu d'une civilisation que j'avais quittée il y a longtemps.

J'avais faim et décidai d'aller dans l'espace de stockage me chercher une barre nutritionnelle; je traversai donc tout le module endormi et m'arrêtai un instant dans les serres, tristes tropiques plongés dans une lumière artificielle aveuglante; par contraste, le reste de la pièce semblait plongé dans la pénombre. L'atmosphère silencieuse de cette serre ainsi que le léger bruit de ruissellement dans les tuyaux renforça le côté inquiétant de cette partie de la navette.

Après avoir mangé mon sésame, je rentrai dans ma chambre et me replongeai dans mon livre. Dans ce passage, José Arcadio Buendía, un patriarche fondateur, accompagné des hommes de son village, explorait inlassablement leur région subtropicale afin de trouver une terre pour installer leur village, un nouveau lieu de vie fertile et plein de promesses, qui s'appellerait Macondo. Ce récit me plongea dans mon environnement d'enfance, la Colombie que j'ai quittée depuis maintenant dix-sept ans. La végétation luxuriante de mon village d'enfance me revint instantanément et son parfum chargé m'emporta dans un monde parallèle, étouffant, familier.

(...)

*« Pendant une semaine, presque sans échanger une parole, ils progressèrent en somnambules dans un monde de désolation, à peine éclairés par la faible réverbération d'insectes phosphorescents, et les poumons oppressés par une suffocante odeur de sang.*

*Ils ne pouvaient revenir en arrière car le chemin qu'ils ouvraient se refermait aussitôt sur leurs pas, étouffé par une végétation nouvelle, qu'ils voyaient presque pousser sous leurs yeux. « N'importe, disait José Arcadio Buendía. L'essentiel est de ne jamais perdre le sens de l'orientation. » Se fiant toujours à la boussole, il continua à guider ses hommes en direction du nord invisible, jusqu'à ce qu'ils réussirent à sortir de cette contrée enchantée. Ce fut par une nuit épaisse, sans étoiles, mais les ténèbres étaient imprégnées d'un air pur, nouveau. »*

(...)

## II.

### José Arcadio Buendía

*« José Arcadio Buendía passa les longs mois de la saison des pluies cloîtré dans un cabinet qu'il aménagea au fin fond de la maison afin que personne ne vint le déranger dans ses expériences. Ayant complètement délaissé les obligations domestiques, il passa des nuits entières dans la cour, à surveiller le cheminement des astres, et il manqua d'attraper une insolation en voulant établir une méthode exacte pour repérer quand il était midi. Quand il se fut rompu à l'usage et au maniement de ses instruments, il acquit une certaine connaissance de l'espace qui lui permit de naviguer sur des mers inconnues, d'explorer des territoires vierges, de rencontrer des créatures extraordinaires, sans même avoir besoin de quitter son cabinet de travail. »*

### Cent ans de solitude, Gabriel Garcia Marquez (extrait)

Durant une nuit moite et silencieusement étouffante, typique de Macondo, j'observais le parcours de l'étoile Arcturus et faisais un relevé consciencieux de son chemin dans le ciel. Même après de nombreux essais, cette expérience était pour l'instant tout à fait infructueuse et donnait une multitude de tracés différents. Je commençais à me poser des questions, d'innombrables expérimentations supplémentaires seraient encore nécessaires et j'attendais qu'arrive enfin ce petit miracle qui m'obsédait depuis si longtemps.

Astrolabes dorés, morceaux de fer, lentilles sépulcrales, fioles, lunettes en bois, atlas, livres ténébreux aux couvertures abîmées jonchaient le sol de mon atelier; ce grand capharnaüm semblait refléter ma propre pensée, chaotique, éparpillée et terriblement énergétique. En déplaçant une grande caisse de matériaux métalliques et des fioles, un daguerréotype tomba à terre; je l'examinai, je n'avais aucun souvenir de sa provenance mais son image me bouleversa sans que j'en comprenne vraiment la raison.

Placé sous un bon angle, je vis un très beau paysage de neige et de glace, encerclé par une forme ovale et organique que je ne pus distinguer immédiatement; il me semblait que le photographe avait pris ce cliché de l'intérieur d'un glacier, courageux aventurier, encerclé par la pénombre. Mes yeux voyagèrent sur les nombreuses aspérités de la grotte et ses stalactites; leurs formes coupantes et menaçantes rythmaient cet intérieur obscur, cathédrale gothique construite dans un autre monde, et déséquilibraient une vue extérieure et lointaine prisonnière du calot glacier, image dans l'image, qui attira mon attention. Au loin, un bateau noir semblait figé sur une glace étincelante. On pouvait distinguer à ses côtés, une zone de fumée très floue, contrecoup d'une explosion dont se dégageaient quelques silhouettes lointaines et fantomatiques.

Lorsque les gitans avaient amené pour la première fois de la glace à Macondo, je me rappelai la sensation surprenante de celle-ci au toucher, cette brûlure surprenante et dure m'avait alors fait sursauter; nous avions payé les gitans de nombreuses fois, dans le but de renouveler sans fin cette sensation déconcertante. Ce daguerréotype était si fragile que j'eus l'impression qu'il aurait pu s'effacer à tout moment, au gré de la lumière; ce monde figé serait alors perdu pour tous. Un léger vertige me gagna à cette idée.

### III.

Henri de Trimardian

*Mes Compatriotes,*

*Volant assurer à notre Patrie bien-aimée, les fruits de l'œuvre que depuis de longues années, nous poursuivons en Antarctique, avec le concours généreux et dévoué de beaucoup de nos citoyens,*

*Convaincu de contribuer ainsi à assurer à notre pays, si il le veut, les débouchés indispensables à son commerce et à son industrie,*

*nous sommes dans la joie d'accueillir le grand explorateur Henry de Trimardian qui revient d'Antarctique après avoir accompli une noble mission; il a triomphé d'une difficile expédition, dans ces terres glacées. Son expédition a été bloquée au milieu des glaces, dans des contrées peu hospitalières pour l'homme. Il a dirigé, d'une main de maître, tout son équipage et son expédition a permis de nombreuses découvertes scientifiques. Il a découvert des terres dont nous pourrions exploiter les nombreuses ressources naturelles, ce qui permettra de continuer d'assurer la prospérité à tout le royaume, et donc le bien-être pour tous.*

*De ce fait, j'ai l'immense plaisir de lui remettre une médaille d'honneur pour ses bons et loyaux services à la patrie.*

*Je vous en remercie.*

Discours Léopold II de Belgique, Octobre 1901 (extrait)

Une grand vague de lassitude m'envahit; cette nuit polaire me semblait si longue que mon rythme de sommeil s'était modifié. Souvent, une sensation de vide intense m'englobait vers quatre heures du matin; un brouillard se constituait devant ma rétine et diluait progressivement mes souvenirs, mon passé et mon futur, alors qu'une barrière invisible se construisait autour de moi pour couper tout lien

matériel avec l'espace de la cabine. Je me sentais déconnecté du monde et de moi-même, flotter à la manière d'un corps isolé dans une atmosphère vide et lugubre; des éclats de panique m'envahissaient comme autant d'assaillants imaginaires, pendant que ces déchirures avec le réel bloquaient toute pensée rationnelle qui aurait pu m'assurer un sentiment de réconfort. Ce dernier arrivait enfin à un moment donné sans plus de raisons que la crise n'avait eu de cause précise; de longs fourmillements dans les jambes me signalaient la fin des hostilités pendant ces nuits interminables dans ma cabine.

Inquiet, je n'avais pas fermé l'œil ces derniers jours. Notre navire était bloqué dans les glaces depuis des mois; l'équipage comptait en dernier recours sur moi pour trouver une solution que je ne connaissais pas encore et qui nous libérerait enfin de cette prison polaire. Personne ne s'était jamais aventuré aussi loin dans cette région du monde, je ne savais donc pas ce qui nous arriverait et si il serait possible de se dégager un jour. La cruelle réalité de cette exploration m'apparut soudain, brute et dramatique, fort différente de l'idéal qui m'avait animé avant ses débuts. J'entendais, ces jours-ci, de nouveaux bruits ambiants que je ne connaissais pas et qui s'ajoutaient aux plaintes malades constantes des glaces qui entouraient notre vaisseau. Je savais d'expérience que cet état second m'amènerait rapidement à voir des hallucinations sur lesquelles je n'aurais plus de contrôle.

Pendant plusieurs semaines, notre équipage doté de ses dernières forces scia de nombreux mètres de glaces et des kilogrammes de tonite furent disposées tout au long de notre tracé sur la glace. Alors que nous nous éloignons de ce tracé, un silence méditatif précédait ces successions d'explosions sur la glace; ce feu d'artifice polaire me plongeait, vu mon manque de sommeil, dans un état second qui naviguait entre pessimisme et euphorie foudroyante. Après avoir essayé de nombreux dessins de découpe de la glace, enfin un canal se créa; une très fine fissure présagea un espoir de quitter enfin ces glaces impassibles.

Exténué, je remontai le soir dans le salon commun du navire, j'allumai le gramophone, un morceau d'orgue de J.S. Bach dont je ne me rappelle plus le titre débuta et le temps s'arrêta alors instantanément. Ces durs mois de frustrations, d'échecs, trop longs pour une seule personne se firent oublier dans ce moment de beauté intense et violente. Tant de douleurs et de difficultés m'avaient fait oublier la magie de l'environnement exceptionnel dans lequel je me trouvais. Ce choc fit instantanément naître des larmes sur mon visage si abîmé, que je ne voulais pas que les autres membres de l'équipage me voient; je décidai alors de retourner dans ma cabine.

Je passai d'abord par le ponton, très calme en fin de journée, où je me laissais dériver en regardant le ciel étoilé, quand je vis soudain une petite étoile rouge qui attira mon attention. Elle était grande, presque de la taille d'une planète; elle brillait et m'illuminait complètement. Son immense rayon rouge m'engloba progressivement, je fermais les yeux doucement et l'hymne sonore de Bach continua à me hanter. Instinctivement, je savais que je trouvais enfin ce que je cherchais depuis des années, alors un sentiment intense de bien-être m'envahit. Comme un mystère dont j'aurais pleinement accepté les fondements sans condition aucune, j'abandonnai tout pour continuer ce voyage intérieur.