

La conquête de l'Espace

De la fusée à l'anti-gravité

Essai

Et en plus, c'est (peut-être) vrai ! ¹

Le 15 juin 2026



Pierre Marx

"La théorie, c'est quand on sait tout et que rien ne fonctionne. La pratique, c'est quand tout fonctionne et personne ne sait pourquoi. Ici nous avons réuni théorie et pratique : rien ne fonctionne et personne ne sait pourquoi."

Albert Einstein ²

¹ C'est ce que dit mon épouse lorsqu'elle est à bout d'arguments. Après un temps de sidération, j'ai pris conscience de son utilité pour couper court à nombre de discussions oiseuses avec certains de mes contemporains. Désormais, je conseille fortement la formule à mes interlocuteurs. Et, en plus, c'est vrai !

² Généralement attribuée à Einstein, il n'y a cependant pas de preuve formelle qu'il soit l'auteur de cette citation.

Sommaire

Avant-propos

On m'excusera de dire des banalités mais la vie est rarement un long fleuve tranquille et quand on prend de l'âge, on se retourne (trop) souvent sur son passé, collection d'événements heureux et malheureux, ceux bien sûr dont on a gardé le souvenir. Beaucoup le ressasse au point de lasser leur entourage et d'apparaître comme nostalgiques de leur époque, désormais révolue.

Arrivé par chance à un âge avancé (je suis né en 1940), j'ai donc ressenti le besoin d'un bilan. Plutôt que d'en faire un travers, j'ai préféré l'écrire. Je précise que ce qui suit n'aborde en aucune manière ma vie privée.

Mais tout cela n'est pas très positif. C'est pourquoi je veux croire que le sablier du temps qui passe représente le passé, le présent et l'avenir et, partant, je termine par une "vision" forcément subjective mais que je partage peu ou prou avec un certain nombre de prospectivistes et qui ne me semble pas improbable, bien qu'elle fasse plutôt peur.



Mais attention ! Je ne suis pas un "long-termiste" (comme Elon Musk, par exemple) qui préconise de sacrifier le bien-vivre d'aujourd'hui au profit d'actions susceptibles d'améliorer le sort de l'humanité dans le futur, souvent très lointain, et donc impossible à prévoir.

Cet essai ne reflète que mes centres d'intérêt, lesquels ne sont pas très répandus (euphémisme). A notre époque où beaucoup réinventent l'eau chaude, c'est peut-être sa justification. De mon point de vue, celle-ci est double:

- J'assume l'idée (que je pense étayée) qu'on saura un jour modifier localement la gravitation.
- Et qu'en attendant, coloniser l'Espace est une issue plausible pour l'humanité, proposition pas si courante si on la veut crédible.

Cet essai est destiné à la jeunesse, du moins celle qui n'est pas obnubilée par le court terme. C'est elle qui construit notre avenir et pas les *has been* comme moi.

Enfin, j'ai conscience de sa technicité mais j'espère être compris par tout-un-chacun et pas seulement de physiciens et d'ingénieurs. Et qu'on ne craigne pas de me critiquer !

Présentation

Cet essai traite essentiellement quatre thématiques (pas dans l'ordre) :

- Le contrôle de la gravitation avec, d'une part comme auteur de deux articles publiés par la Fondation Louis de Broglie, d'autre part comme membre de la commission Sigma2 de la 3AF, chargée de l'étude des PAN.
- L'accès à l'Espace avec les lanceurs de satellites (ma carrière au CNES où j'étais ingénieur à la Direction des Lanceurs),
- Habiter l'Espace (comme concepteur de la cité spatiale APOGEIOS, en binôme avec Olivier Boisard (1^{er} prix d'architecture spatiale décerné par la fondation Jacques Rougerie),
- Un scénario plausible pour le futur, bâti sur le changement climatique et le tsunami de l'IA et de la robotique.

Nota: Dans ce qui suit, comme on pourra le constater, je fais souvent référence aux articles de Wikipedia, l'encyclopédie en ligne que je soutiens (très modestement) en raison de sa qualité et de son accessibilité. Aujourd'hui, confrontée à l'IA, sa vie est en jeu. Je lui souhaite de surmonter cette énorme mutation.

Prologue

Je fais partie des utopistes qui pensent qu'un jour on saura contrôler localement le niveau de gravitation autrement que par l'inertie (la chute libre, entre autre, qui permet le 0-g).

Je n'en suis pas arrivé là par la SF et les performances sidérales et sidérantes de ses vaisseaux intergalactiques mais au terme d'un vécu de l'adolescence à la vieillesse. Après avoir fabriqué des propulseurs à poudre dans la cave de la maison familiale et les avoir testés dans un champ, inconscient des risques que je prenais (et de la réglementation aérienne ³), j'ai, par la suite, fait toute ma carrière dans les lanceurs de satellites (Europa, Diamant, Ariane et même l'icône soviétique Soyuz), d'abord en tant qu'ingénieur d'essais en vol puis, pour les deux derniers, leur conception / amélioration. Que du bonheur !

Un jour, j'ai assisté, à l'air libre et pas très loin (impossible aujourd'hui), à un tir au banc d'un moteur fusée de plusieurs tonnes de poussée ⁴. "Le tonnerre de Zeus et les forges de Vulcain" ! Beaucoup plus tard, j'ai vécu en direct l'échec du 1^{er} lancement d'Ariane 5 ⁵ et de son retentissement. Dur, dur...mais "*on apprend de ses échecs, pas de ses succès*" ⁶.

Mais à l'époque du "New Space" ⁷ dont je ne suis qu'un spectateur, vu mon âge, il est bien difficile d'y lire l'avenir à long terme du spatial. L'espace n'est plus un secteur à part ⁸. Toute la *high tech* et la finance d'aujourd'hui ⁹ semblent vouloir s'en emparer. En particulier, l'IA et la robotique. C'est un peu la jungle!

Le "New Space"

Nouvelle ère du spatial caractérisée principalement par l'arrivée de capitaux privés (capital-risque) motivés par les technologies numériques, la commercialisation de services et par de nouveaux acteurs (startups) dont certains sans réelle expérience dans ce métier difficile.

Voir le livre de Xavier Pasco "*Le nouvel âge spatial*" - CNRS EDITIONS - Paris 2017, 191 p.

Par ailleurs, la dichotomie entre le "Back to Earth" ¹⁰ et les scénarios futuristes d'exploration / installation semblent tourner à l'avantage du premier, du moins pour le moment. Il faut sauver la Terre,

³ Laquelle m'a valu un rappel à l'ordre de la sécurité aérienne, au demeurant plutôt pédagogique et compréhensif.

⁴ Ce moteur était à l'origine des moteurs Viking qui ont propulsé les deux premiers étages d'Ariane 1 à Ariane 4. Très fiables, ils ont été produit par la SEP à plus de 1100 exemplaires.

⁵ Mon enfant mais elle eut beaucoup de pères ! Ajoutons qu'après une enfance difficile, Ariane 5 a dominé le marché avec plus de 100 lancements sans échec.

⁶ Bram Stoker (1847 – 1912), auteur irlandais du fameux roman "Dracula".

⁸ En 1966, je venais d'être embauché comme ingénieur d'essais du lanceur Europa quand quelqu'un de ma famille m'a demandé d'un ton incrédule si on gagnait sa vie dans cette activité bizarre.

⁹ l'aérospatiale, les biotechnologies, les technologies de l'information et de la communication, les nanotechnologies et la robotique (source Wikipedia).

¹⁰ Politique spatiale favorisant les services rendus à la Terre en matière d'information et de sécurité, civiles et militaires.

son climat et sa diversité pour qu'elle reste habitable et en paix. Quoique prétende Elon Musk ¹¹, pas envie de s'exiler sur Mars ou ailleurs !

Et pourtant, il faut bien des rêveurs. Qu'on me pardonne d'en être.

¹¹ Il veut peupler Mars grâce à des milliers et des milliers de vols de Starship, son vaisseau géant, capable de transporter 100 "colons". C'est, dit-il, la raison et le but de son implication dans le spatial.

Chapitre 1 – L'accès à l'Espace

1. Les lanceurs de satellites ¹²

Hommage

Tout ce qui est dit dans ce paragraphe, je le dois à ceux qui m'ont permis mon métier. Je le dois d'abord à ceux qui ont construit l'Europe spatiale et plus spécialement aux Pères de la saga Ariane. Beaucoup d'autres m'ont appris, notamment les acteurs de terrain, du compagnon, cheville ouvrière, au patron organisateur et prévoyant, en passant par l'ingénieur et le technicien, eux qui font tomber en marche les mécaniques récalcitrantes.

Ce qui suit n'est qu'une vision personnelle résultant de mon expérience de la conception des lanceurs et de la pratique de leur lancement. Elle n'évoque ici que quelques aspects techniques, sans parler de tous les autres, tout aussi essentiels : politiques, organisationnels, industriels, budgétaires, calendaires, commerciaux et médiatiques. En somme, le propre des grands programmes ¹³...

1.1 Des engins très spéciaux

Les lanceurs de satellites sont des machines infernales en raison principalement d'un dimensionnement des structures absolument inacceptable pour toute autre construction ¹⁴ et de charges mécaniques et thermiques considérables à l'allumage des moteurs, au décollage et en vol (transsonique, pression dynamique max, séparations des étages et de la coiffe) avec, notamment, des niveaux vibratoires ¹⁵ (dont le niveau de bruit) dont on n'a pas idée. Tout l'art de l'ingénieur est de marier les deux ("maîtriser les extrêmes" disait la SEP) mais au prix du "consommable" sauf éventuellement pour le 1er étage ¹⁶.

Des structures très légères

Le dimensionnement d'une structure comme un réservoir d'ergol ou une coiffe n'est pas que géométrique (forme, dimensions...) mais aussi mécanique pour encaisser les efforts au sol et en vol (accélérations, pression aérodynamique, chocs, pressurisation pour les réservoirs d'ergols et les enveloppes de propergol solide) avec une marge de sécurité très faible pour minimiser sa masse.

Le terme "industrie aérospatiale" peut porter à croire qu'un avion et un lanceur ont de nombreux points communs. C'est plutôt le contraire :

¹² Voir, pour résumer, l'article très accessible et bien documenté de Wikipedia sur Ariane 6.

¹³ Coût de développement du lanceur européen Ariane 6 : environ 4 Md€.

¹⁴ Sauf pour les bouteilles d'eau plate en plastique PET : 30 g pour 1,5 l (indice constructif 2%). Mais elles ne sont pas pressurisées !

¹⁵ La BF dont "l'effet Pogo", destructeur du lanceur et la HF dont les instabilités de combustion, destructrice des moteurs.

¹⁶ L'indéniable maîtrise technique des retours spectaculaires du 1^{er} étage du Falcon 9 de SpaceX et de sa réutilisation n'entraîne pas la preuve de son intérêt économique, du moins pour les faibles cadences de lancement.

- Un lanceur accélère en permanence pour atteindre les vitesses orbitales alors qu'un avion de ligne est optimisé pour les vols de croisière (altitude et vitesse constantes),
- Contrairement aux avions qui brûle du kérosène avec l'oxygène de l'air qu'il aspire, un lanceur embarque le comburant pour pouvoir fonctionner dans le vide.
- La durée de vie d'un avion de ligne est de plusieurs décennies, celle d'un lanceur, de quelques dizaines de minutes.
- Un long-courrier est en l'air plus de la moitié du temps. Un lanceur passe beaucoup plus de temps sur sa table qu'en vol.
- Un moteur-fusée est déclaré qualifié s'il fonctionne au banc d'essai, disons 10 fois son temps de vol, soit quelques milliers de secondes et quelques démarrages. Un moteur d'avion est généralement reconstruit deux à trois fois avant d'être retiré du service, soit environ après 12 000 cycles de vol pour la première reconstruction, 8 000 pour la seconde et 4 000 avant sa fin de vie.
- Par contre, les avions et les lanceurs utilisent, dans de nombreux cas, les mêmes matériaux (aciers spéciaux, alliages d'aluminium, titane, fibre de verre, de kevlar, de carbone,..).
- Enfin, un avion de ligne est produit à un grand nombre d'exemplaires. Les lanceurs aussi mais c'est parce qu'ils sont consommables ! Certains peuvent changer la donne. C'est déjà le cas avec le 1^{er} étage du Falcon 9 de la société Space X d'Elon Musk. Bientôt celui du lanceur léger "Maia" en cours de développement.

La mise en œuvre des lanceurs, appelée "campagne de lancement", s'effectue sur une "base de lancement", située pour éviter de survoler des zones densément habitées donc, si possible, un océan ou un désert. La campagne commence par la réception des étages, de la coiffe et du(des) satellite(s) (CU) suivie de l'érection du lanceur sur la table de lancement (assemblage des étages et intégration de la CU et de la coiffe qui l'abrite. Elle s'achève par la "chronologie de lancement" où l'on remplit notamment les réservoirs des étages à ergols liquides. Elle s'achève par les quelques minutes de la "séquence de lancement" avec au dernier moment, le "décompte final" de quelques secondes égrenées par le DO (Directeur des Opérations). Allumage des moteurs à "zéro time". S'ensuit, si tout va bien, le décollage et le vol jusqu'à la mise en orbite et le largage de la CU bien loin de la base : une grand-messe plus le stress ! A noter les extravagantes propositions de certains, heureusement sans lendemain, d'utiliser les aéroports civils ou militaires comme bases de lancement ou d'en créer dans des zones à grande densité de population ¹⁷ !

Tout cela a un coût et il est élevé. A celui de la production d'étages neufs s'ajoutent celui des opérations ¹⁸, des services de la base de lancement, des assurances et la marge de l'opérateur. Par ailleurs et bien que le spatial soit une exigeante école de la rigueur, le succès n'est pas toujours au rendez-vous et un échec peut coûter des centaines de millions de dollars ¹⁹.

D'une manière générale, deux paramètres sont à la base des coûts dits "récurrents" :

¹⁷ Sans citer de noms, il est venu à l'idée de faire des lancements dans le sud-ouest de la France avec survol de la Méditerranée !

¹⁸ Transport des étages et de la coiffe vers la base de lancement, campagne de lancement, suivi de la trajectoire, sauvegarde au sol et en vol.

¹⁹ Le taux de réussite (satellisation sur la bonne orbite et livraison de la charge utile dans les conditions requises) dépasse aujourd'hui 99 % pour un lanceur préalablement qualifié en vol et donc déclaré bon pour le service.

- La cadence de lancement qui conditionne la part des frais fixes dans le bilan économique global. A 10 lancements / an, cette part est importante. Elle est évidemment beaucoup plus faible à 100²⁰.
- L'effet d'échelle qui détermine le coût de lancement du kg de charge utile sur une orbite de référence. Un lancement sur orbite basse à 100 M\$ d'une CU de 20 T, c'est 5 k\$/kg. Celui d'un micro-lanceur à 10 M\$ d'une CU de 200 kg, c'est 10 fois plus.

1.2 Problématique

Outre leur coût élevé, les lanceurs imposent à leur charge utile des contraintes dont elles se passeraient bien :

- Leur performance limitée entraîne une "chasse au kilo", source importante de coût (miniaturisation, matériaux high-tech, marges de dimensionnement réduites...)
- De même, l'obligation de rentrer dans la coiffe qui les protège pendant la traversée de l'atmosphère implique, autre source de coût, le déploiement en orbite des éléments trop encombrants tels les panneaux solaires et les grandes antennes.
- Qui plus est, elles se trouvent placées pendant les quelques minutes du lancement dans un environnement vibratoire (acoustique et basse fréquence) extrêmement sévère auquel s'ajoute les chocs des séparations des étages et de la coiffe. Il s'ensuit un surdimensionnement de leurs structures et de leurs équipements, devenu inutile une fois en orbite.
- La plupart sont faits pour lancer les SL d'application, lesquels constituent le marché des lancements dit "commercial"²¹. Les missions scientifiques s'en accommodent mais pas les grands ensembles comme l'ISS²² qui doivent être construits par "modules", lancés séparément puis assemblés en orbite. Les lanceurs géants, comme le SLS ("Space Launch System") de la NASA et de Boeing, sont une alternative mais posent le problème de leur très faible cadence d'utilisation, s'agissant de moyens dédiés. Le lanceur super-lourd Starship d'Elon Musk, créé pour coloniser la planète Mars pourrait s'avérer une exception si cette utopie prend corps (cf. § 2.2).²³.

²⁰ C'est à peu près la cadence des Falcon-9 de SpaceX pour, entre autres, la mise en place de la constellation Starlink. Mais le 1^{er} étage étant réutilisé, le bilan économique n'est pas le même. Entre perte de performance (réserve d'ergols si retour à la base), récupération loin de la base (dans le cas contraire), remise en état de vol et moindre production d'étages neufs, il n'est pas certain que ce soit rentable. Il semble toutefois que ce soit l'avenir.

²¹ Essentiellement télécoms, observation de la terre (dont météo), positionnement (GPS, Galileo ..), tous moyens à usage civil et/ou militaire. Une partie d'entre eux sont institutionnels et ne relèvent pas d'une logique purement commerciale. Il en est ainsi, pour les européens, de "la préférence Ariane" mais elle n'est pas toujours respectée.

²² Pour "International Space Station". Elle tourne autour de la terre en ~ 1h 30 à ~ 400 km d'altitude. Sa masse est ~ 420 T et ses dimensions (hors tout) : L ~ 110 m, l ~ 74 m, H ~ 30 m.

²³ On parle de 2 à 4 Md\$ le lancement d'un SLS ! Starship, le bi-étage géant de SpaceX en cours de développement, devrait "casser les coûts" de lancement s'il s'avère entièrement réutilisable comme c'est son objectif.

RAMS

Acronyme pour **R**eliability, **A**vailability, **M**aintainability, **S**afety, soit fiabilité, disponibilité, maintenabilité, sécurité.

Ces 4 lettres caractérisent la "sûreté de fonctionnement" d'un système spatial, notamment, d'un lanceur. C'est un élément absolument essentiel, d'une part évidemment pour les vols habités, mais aussi pour les satellites commerciaux (perte coûteuse) et les CU scientifiques (one shot) :

- La fiabilité traduit la probabilité de panne d'un équipement ou d'un système. On l'améliore en garantissant celle de ses composants, en le qualifiant aux limites de son domaine de fonctionnement, en le contrôlant avant et après installation à bord et, bien sûr, au fil de son utilisation (fiabilité démontrée).
- La disponibilité est l'aptitude d'un équipement à fonctionner, en toute circonstance et sans délai, dans son domaine de qualification.
- La maintenabilité est la facilité, comme son nom l'indique, de maintenir en bon état, de réparer ou de changer un équipement.
- La sécurité doit limiter autant que se peut le risque d'atteinte aux biens et aux personnes au sol, notamment en cas de panne. Dans le cas des vols habités, c'est un "design driver" majeur, la vie des astronautes étant en jeu.

A noter que, contrairement à un propos souvent entendu, la sécurité n'est pas synonyme de fiabilité mais en est le complément.

La conquête spatiale est malheureusement jalonnée d'accidents au sol et en vol, certains très graves, voire cauchemardesques (mort d'astronautes, chute d'éléments sur une zone habitée). C'est pourquoi les RAMS sont une priorité.

Dans le secteur aérospatial comme dans d'autres, l'expérience acquise a considérablement amélioré les choses. Cela dit, la sûreté de fonctionnement n'est pas seulement une question de technique mais une véritable culture malheureusement pas toujours prise en compte par les "costkillers".

Nota : RAMS est aussi l'acronyme anglais pour "Risk Assessment and Method Statement", document à caractère légal utilisé dans l'industrie sur les lieux de travail. Ce document doit expliquer la méthodologie de la tâche à accomplir ainsi que les risques et dangers encourus.

1.3 Pour finir

La gravité terrestre joue un rôle essentiel qu'on ne sait vaincre qu'avec la propulsion chimique, seule capable de fournir une poussée supérieure au poids du lanceur mais aussi en "empilant" deux ou trois "étages propulsifs", pour se débarrasser en vol de masses devenues inutiles (réservoirs vides entre autres). Il faut atteindre les vitesses orbitales, soit 8 km/s pour une orbite basse (LEO), 10 pour l'orbite de transfert géostationnaire (GTO), 11 pour s'échapper de l'attraction terrestre (libération)²⁴.

²⁴ Guère au-delà, la propulsion chimique ne suffit plus. D'autres moyens sont nécessaires, notamment l'assistance gravitationnelle (ballet autour d'autres planètes pour accélérer à l'aide de leur champ de gravitation). C'est un peu long mais c'est gratuit !

L'orbite géostationnaire (GEO)

est une orbite circulaire d'altitude 36000 km et située dans le plan de l'équateur. Sa période est de 24 h de sorte qu'un satellite placé sur cette orbite apparaît fixe à un observateur terrestre d'où son utilisation comme relais de télécom. Le lanceur place le SL sur une orbite elliptique à bas périgée (~ 200 km) et d'apogée 36000 km, orbite dite de transfert (GTO). Arrivé à l'apogée, une impulsion supplémentaire fournie par la CU ou par réallumage du dernier étage permet la circularisation.

Un autre volet du transport spatial est celui des vols habités permettant la présence humaine dans l'espace. Aujourd'hui limitée à l'orbite basse (l'ISS), bientôt peut-être sur la Lune, voire sur Mars, elle préfigure pour ses promoteurs une forme de colonisation de l'espace (voir chapitre 2).

Malgré toutes ces contraintes ou plutôt grâce à elles, concevoir et créer un lanceur, le qualifier en vol et l'exploiter est un métier fantastique. Et permettre l'accès à l'espace, c'est pouvoir explorer le système solaire, observer l'univers dans tout le spectre ²⁵ et rendre aux Terriens de nombreux services, inimaginables il y a quelques décennies. Ce n'est pas rien.

²⁵ De l'infrarouge à l'ultraviolet sans le filtre de l'atmosphère.

2. Notre univers

Il est intéressant de situer notre "conquête spatiale", dans le paysage que nous décrit l'astronomie d'aujourd'hui. En effet, les ordres de grandeur qui le caractérisent donnent un peu le tournis, voire des migraines chez les plus fragiles. Dans tous les cas, une belle leçon d'humilité.

Pas question ici d'un cours d'astrophysique / cosmologie. Je ne suis pas du métier ²⁶.

2.1 Ce qui paraît acquis

Modèle cosmologique

C'est une représentation mathématique de l'univers censée rendre compte de l'observation des corps célestes. Chaque progrès significatif dans l'observation (par exemple avec l'observatoire spatial "James Webb") oblige à questionner le modèle le plus consensuel du moment, voire à le remettre en cause. Le plus en vogue aujourd'hui est le modèle Λ CDM apparu à la fin des années 1990.

Les modèles cosmologiques relèvent tous de la Relativité Générale d'Einstein (RG) ²⁷ sauf à l'origine supposée de l'univers, le fameux "Big Bang", où intervient la mécanique quantique (MQ), par ailleurs incompatible avec la RG.

Il est probablement un peu simpliste de considérer l'univers comme un "gaz parfait de galaxies". En réalité, les étoiles s'organisent en galaxies, qui forment à leur tour des groupes de galaxies, des amas de galaxies, des superamas, des nappes, des murs et des filaments, séparés par d'immenses vides, créant ainsi une vaste structure semblable à de la mousse ^[59], parfois appelée « toile cosmique » (source Wikipedia).

Quelques données :

- Age de l'univers ²⁸: 13,8 milliards d'A-L ²⁹.
- Nombre estimé de galaxies : entre 100 et 200 milliards, possiblement jusqu'à 2000 milliards, voire beaucoup plus.
- Nombre moyen d'étoiles dans une galaxie : quelques centaines de milliards. Entre deux et quatre pour la Voie Lactée (notre galaxie).
- Une à deux planètes en moyenne par étoile (estimation actuelle). Au total, pas loin du nombre d'Avogadro ³⁰ !
- Le Soleil, notre étoile, est situé à $\sim 26\,000$ A-L du centre de la Voie Lactée où se trouve le trou noir super-massif Sagittarius A* (4,3 millions de masses solaires). Il tourne autour à une vitesse d'environ 230 km/s, soit un tour en 225 à 250 millions d'années.
- Alpha du Centaure est l'étoile la plus proche de notre soleil. En fait, un ensemble de trois étoiles, situé à 4,3 A-L du soleil. La plus proche (Proxima Centauri) a une planète (découverte en 2016)

²⁶ Le peu que j'en sais vient essentiellement de deux ouvrages :

- Landau et Lifchitz *Théorie des Champs* - Editions MIR - Moscou 1970.
 - Rich J.A. *Cours et Exercices de cosmologie* - traduction de Jean-Louis Basdevant - Editions Vuibert- 2010.

²⁷ Bien que certains pensent qu'il faut peut-être la modifier. Bon courage !

²⁸ Temps qui nous sépare du "Big Bang", instant supposé de la phase dense et chaude de l'univers.

²⁹ Une A-L (Année-Lumière) = distance parcourue à la vitesse $c \sim 300\,000$ km/s de la lumière en un an, soit $\sim 9\,500$ milliards de km. A noter que la valeur de c est depuis 1983 une unité de base. Par définition $c = 299\,792\,458$ m/s.

Proxima Centauri b" de la taille de la Terre située dans la zone habitable ³¹, ce qui ne signifie pas qu'elle est habitée.

Les exoplanètes

sont des planètes tournant autour d'autres étoiles et n'appartenant donc pas au système solaire. La première a été découverte en 1995 (Michel Mayor et Didier Queloz, prix Nobel 2019), Depuis, ça n'arrête pas (En février 2026, on en connaît plus de 8000). Les progrès extraordinaires de l'observation des étoiles proches et de la modélisation laissent supposer l'existence ou la formation de planètes, notamment telluriques, partout dans notre galaxie.

L'expansion de l'univers

a été découverte au début du XX^e siècle (Lemaître, Hubble,...) et le fait qu'elle s'accélère, à la fin (1998) par deux équipes internationales menées respectivement par Saul Perlmutter (Supernova Cosmology Project), par Adam Riess et Brian P. Schmidt (High-Z supernovae search), tous trois prix Nobel 2011. Avant, on pensait que l'univers ralentissait son expansion du fait de l'attraction mutuelle de ses composantes. Enfin des mesures récentes semblent montrer que cette accélération diminue au cours du temps, contredisant l'hypothèse d'une "constante cosmologique" dans le modèle actuel d'univers.

2.2 Quelques mystères actuels (parmi d'autres)

Malgré d'extraordinaires progrès depuis Georges Lemaître (1927 pour la théorie) et Edwin Hubble (1929 pour l'observation) ³², l'univers reste plein de mystères ³³. Ainsi son énergie totale dont on ne connaît que celle de la matière et de la lumière, soit seulement 5% ! Deux autres formes inconnues sont supposées expliquer leurs effets gravitationnels constatés : 25% de "matière noire" (dark matter) baignant les galaxies et 70 % "d'énergie sombre" (dark energy), répulsive, baignant tout l'univers et cause de son expansion accélérée.

Si cette dernière existe vraiment, elle serait la preuve que la gravitation peut être répulsive (encourageant pour ma thèse !).

Quelques autres :

- 2 valeurs inconciliables de la constante de Hubble : 67 ou 73 km/s/Mpc ? (pc = abréviation de parsec = 3,26 AL = 206265 UA ou 30 900 milliards de km environ.)
- Relativité Générale (RG) / Mécanique Quantique (MQ) complémentaires et incompatibles
- Apparition de la vie : ailleurs ? sous quelles formes ? sommes-nous seuls ?
- 26 constantes de valeur ultra- précise pour accorder le modèle d'univers actuel aux observations
- Multivers ? Il se pourrait qu'il y ait un nombre infini d'univers "bulles" sans connexions les uns avec les autres.

³¹ Région de l'espace où les conditions sont favorables à l'apparition de la vie telle que nous la connaissons sur Terre, notamment de l'eau à l'état liquide.

³² A leur époque, on pensait qu'il n'y avait qu'une seule galaxie : la nôtre (la voie lactée). De plus, ils ont montré que l'univers était en expansion (loi de Hubble). Même Einstein n'y croyait pas !

- Futur de l'univers indéterminé
- "Avant" le Big Bang : est-ce au moins une question pertinente ?

2.3 Sommes-nous seuls dans l'univers ?

La vie est-elle apparue ailleurs que sur Terre ? C'est probable, surtout depuis la découverte de milliers d'exoplanètes. Une sur cinq pourrait accueillir une forme de vie, même élémentaire. Elle est activement recherchée dans le système solaire, principalement sur Mars, sans succès pour le moment. Mais aussi, comment est-elle apparue sur notre planète ? ³⁴.

Quant à l'existence de "civilisations extraterrestres", c'est une des questions les plus prégnantes de notre époque. C'est un sujet aux multiples aspects, scientifiques, technologiques, philosophiques et même spirituels, trop vaste pour être exposé ici.

La littérature ne manque pas³⁵. Voir par exemple l'article "Sommes-nous seuls dans l'univers ?" du professeur Trinh Xuan Thuan qu'on trouve sur le site de l'Université de Genève. Il ne mentionne toutefois pas le sujet des OVNI, pardon ! des PAN ⁱ, pourtant impossible à éluder. Il intéresse beaucoup les états-majors militaires ³⁶ et les agences spatiales, moins les scientifiques qui arguent que les observations ne sont pas reproductibles ou ne respectent pas la rigueur qui s'impose ³⁷. *A contrario*, de trop nombreux "ufologues" se complaisent dans des croyances infondées, notamment celle de visiteurs extraterrestres. C'est dire que le chemin est étroit !

L'acronyme OVNI, pour "Objet Volant Non Identifié" est la traduction du terme anglais "Unidentified Flying Object" (UFO).

Dans la plupart des cas, les observations ne supposent pas la présence d'un objet matériel. Le terme "Phénomène Aérospatial Non Identifié" (PAN) est donc plus approprié. En 2022, les USA ont changé pour "Unidentified Anomalous Phenomena" (UAP).

³⁴ Les plus anciennes traces de vie sur Terre remonteraient à 3,8 milliards d'années. Le genre "Homo" à 2,8 millions d'années et " Homo sapiens" (notre espèce) à 300 000 ans.

³⁵ A signaler l'ouvrage "*La vie à portée de main*" de Christophe Galfard (Albin Michel, Paris, 2025). Un vrai roman !

³⁶ Notamment la NASA et le DoD qui ont récemment déclassifié leurs archives. Enfin, celles qui ne prêtent pas trop à conséquence.

³⁷ Cette situation est toutefois en train d'évoluer.

L'équation de Drake (extrait de l'article Wikipedia)

Proposée par l'astronome américain Frank Drake en 1961, le nombre probable N de civilisations dans notre galaxie serait égal au produit des sept paramètres suivants:

- R^* nombre d'étoiles qui se forment annuellement dans notre galaxie
- f_p part des étoiles dotées de planètes
- n_e nombre de planètes potentiellement propices à la vie par étoile
- f_i est la part de ces planètes où la vie apparaît effectivement
- f_i est la part de ces planètes où apparaît la vie intelligente
- f_c est la part de ces planètes capables et désireuses de communiquer
- L est la durée de vie moyenne d'une civilisation, en années

Si $N > 1$, nous ne sommes probablement pas seuls. Si N est suffisamment grand, nous pourrions entrer en contact avec les civilisations extraterrestres les plus proches (une distance de x années-lumière implique un temps d'acheminement des signaux de x années).

Toutefois, l'estimation de ces paramètres est tellement incertaine que le résultat peut varier entre 0 et quasiment l' ∞ . Le principal objet de cette équation est de déterminer ces facteurs où sont concernées les sciences telles que l'exobiologie, la futurobiologie, l'astrosociologie, ainsi que le projet SETI.

Le programme SETI (voir l'article de Wikipedia)

Acronyme de "Search for Extra-Terrestrial Intelligence" ("Recherche d'intelligence extraterrestre"). Fondé en 1960 par l'astronome Frank Drake, ce programme désigne divers projets scientifiques presque tous basés sur l'écoute de signaux électromagnétiques en provenance de notre galaxie. Sans aucun résultat jusqu'à maintenant, aucune "alerte" n'ayant résisté à l'examen.

L'objectif de SETI est de détecter l'existence de civilisations extraterrestres avancées, présentes dans d'autres systèmes solaires. SETI repose sur plusieurs principes :

- Existence dans notre galaxie à une distance compatible avec les techniques d'observation utilisées,
- Emissions suffisamment puissantes pour être détectées, correspondant éventuellement à des tentatives de prise de contact,
- Emissions dans des bandes spectrales non perturbées par le milieu galactique et pouvant traverser l'atmosphère terrestre.

L'étude des PAN s'est surtout développée aux USA. Mais la France n'est pas en reste :

- COMETA. Cette association, constituée principalement d'experts de l'IHEDN et présidée par le général Denis Letty, a produit en 1999, à l'issue de 3 ans de travaux, le fameux rapport éponyme ³⁸, préfacé par André Lebeau (†), ancien Président du CNES, et avançant "l'hypothèse extraterrestre" comme la plus probable ou la plus crédible.

³⁸ COMETA, Les OVNI et la Défense - À quoi doit-on se préparer ?, Paris, Éditions du Rocher, 2003

- GEPAN - GEIPAN. En 1977, Yves Sillard (†), alors Directeur Général du CNES, a créé ³⁹ le "Groupe d'Etudes sur les PAN" (GEPAN), rebaptisé en 2005 "Groupe d'Etudes et d'Informations sur les PAN" (GEIPAN). Yves Sillard supportait l'hypothèse extraterrestre du phénomène PAN.
- Sous le titre "*Phénomènes aérospatiaux non identifiés - un défi à la science*" (le cherche midi – 2007), Yves Sillard a dirigé un ouvrage collectif auquel j'ai participé.
- Du coup, considéré (à tort) comme un expert des PAN, j'ai intégré en 2009 la commission technique "Sigma" de la 3AF ⁴⁰, réorientée en 2013 sous le nom de "Sigma2" (voir son site) et présidée par Luc Dini, Directeur chez Thalès (voir son site) . Multidisciplinaire, elle collabore avec le GEIPAN du CNES.

Pour ce qui concerne le petit pourcentage d'observations à la fois irréfutables et inexplicables, je ne vois qu'une hypothèse qui coche toutes les cases : celle d'engins extraterrestres et, j'ajoute, s'affranchissant de la gravitation et capables de voyager dans l'espace-temps. Il arrive que la SF soit visionnaire ! Cela dit, ce n'est qu'une hypothèse ! Et elle n'est pas franchement partagée ! Mais attention ! Je n'ai pas d'arguments sur la nature de ces "aliens" . Qu'on ne me parle pas de petits hommes verts !

2.3 Le warp-drive

Il ressort de ce qui précède que la "conquête" de l'espace se limite aujourd'hui à du cabotage au sein du système solaire. L'artefact encore en vie le plus éloigné du soleil est la sonde américaine "Voyager 1" lancée en 1977 et actuellement à 25 milliards de km du soleil. A son allure (16,6 km/s), il lui faudrait près de 80000 ans pour atteindre Alpha du Centaure, l'étoile la plus proche de notre soleil ! Par comparaison, dans le système solaire, il faut 6 mois pour rejoindre Mars et près de 2 ans juste pour survoler Jupiter.

Or, cette situation n'est pas près de changer (voir annexe 1) :

- La propulsion chimique a atteint ses limites ⁴¹.
- Les modes de propulsion électrique peuvent prendre le relais une fois en orbite mais ce n'est pas vraiment spectaculaire.
- Idem pour les catapultes ou canons électromagnétiques, utilisables dans le vide
- La propulsion nucléo-thermique, étudiée depuis des lustres, pourrait un peu améliorer les choses mais sa mise œuvre est problématique.
- On peut espérer franchir un grand pas avec la fusion nucléaire, si on parvient un jour à la contrôler, mais elle ne changera pas vraiment la donne.
- Certains rêvent de pousser une voile extra- légère avec un faisceau laser. Pas vraiment évident.

³⁹ Avec Claude Poher, éminent ingénieur en recherche spatiale et **astrophysicien**. Auteur d'une théorie (controversée) de la gravitation, dite des "Universons".

⁴⁰ Association Aéronautique et Astronautique de France: société savante au service des professionnels français de l'aéronautique et de l'espace.

⁴¹ Sait-on que les moteurs-fusées sont pratiquement les seuls à quasiment atteindre le rendement de Carnot (limite théorique des machines thermiques) ?

Bref, au regard de l'immensité de l'univers, la propulsion par réaction est très loin d'être adaptée. C'est pourquoi on peut penser à modifier localement la géométrie de l'espace-temps C'est ce qu'a proposé le physicien Miguel Alcubierre ⁴² en 1994. Le principe de fonctionnement, appelé "warp-drive", consiste à créer une "bulle de distorsion" autour du vaisseau en "contractant l'espace devant lui et en le dilatant derrière" (sic).

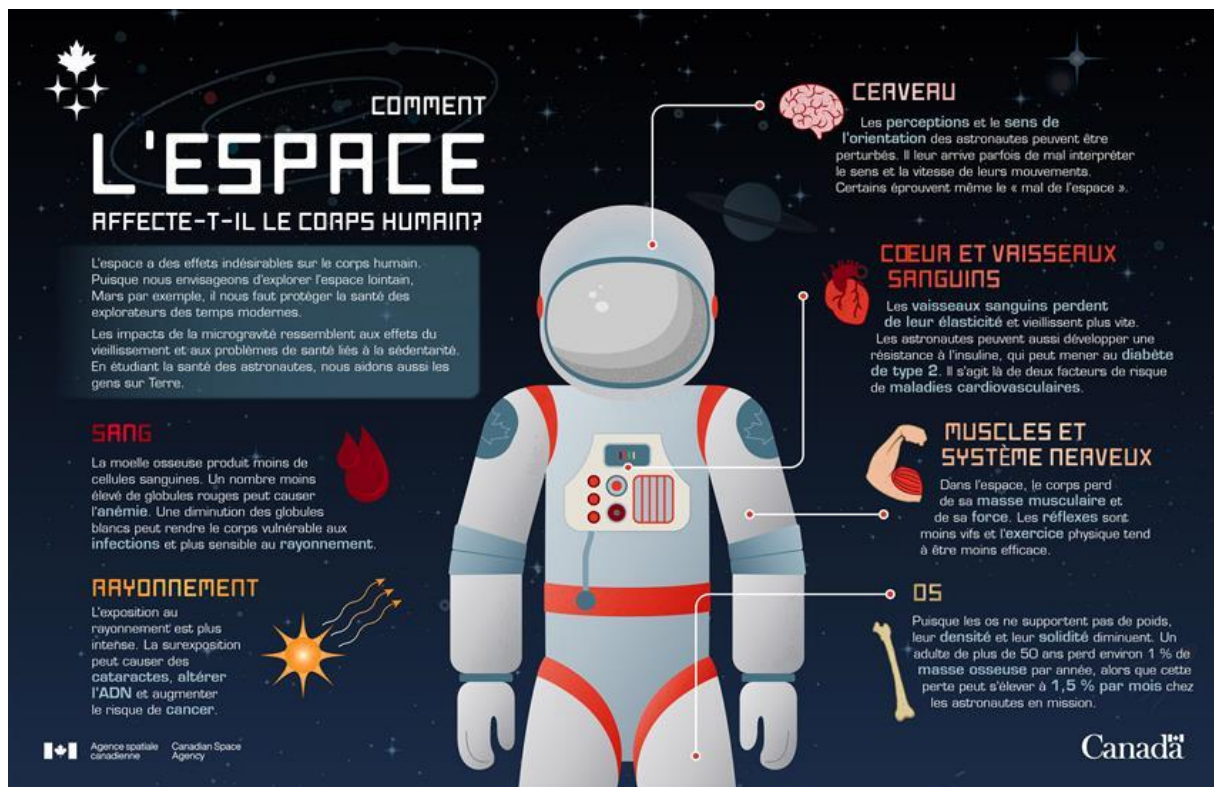
Ainsi, le vaisseau ne se déplace pas réellement plus vite que la lumière, mais surfe sur une vague d'espace-temps déformé. Cette approche ingénieuse contourne élégamment les limitations imposées par la relativité d'Einstein. Du vrai Star Trek ! Mais aussi de quoi peut-être expliquer ces cas de PAN insaisissables, évoqués précédemment.



Vaisseau à propulsion Alcubierre (Illustration Wikipedia)

⁴² Physicien mexicain actuellement directeur de l'Institut des sciences nucléaires de l' Université nationale autonome du Mexique (UNAM).

2.4 L'homme dans l'espace



Tiré du site de l'agence spatiale canadienne

Et si un jour, c'était nous, les "Spatiens" ! Ce n'est pas improbable. On a marché sur la Lune (programme Apollo des années 61 à 72) et on s'apprête à y retourner (programmes Artemis) ⁴³. Des équipages tournent autour de la Terre à bord de l'ISS depuis 1998. Sans parler des Chinois (sur la Lune en 2029 ?) Cela dit, on raconte beaucoup de bêtises comme, par exemple, Elon Musk, la rockstar du "New Space" qui veut coloniser la planète Mars ⁴⁴. Il n'a peut-être pas tort si cela peut susciter des vocations mais l'entreprise est, à mon humble avis, totalement irréaliste. La réalité est beaucoup plus prosaïque. L'homme "ordinaire" n'est simplement pas fait pour vivre en dehors de la Terre. Il faut l'installer dans une "bulle" qui le protège des rayonnements ionisants, l'isole du vide en lui permettant de respirer et l'empêche de brûler ou de congeler selon qu'il est exposé au soleil ou à l'ombre.

Il faut aussi qu'il s'alimente, soit en produisant *in situ*, ce qui pour l'instant n'est pas acquis, soit être ravitaillé par la Terre comme c'est le cas pour l'ISS.

Mais tout cela ne suffit pas :

- Son squelette, ses muscles, son cerveau, son métabolisme en général sont faits pour une pesanteur à 1-g. Au bout de 6 mois de 0-g dans l'ISS, il faut mettre un astronaute sur un brancard quand on le

⁴³ Si toutefois le programme survit aux aléas politiques que connaissent les US. Les grands programmes sans utilité à court terme n'ont plus bonne presse.

⁴⁴ Notamment en en refaisant "une petite Terre" (voir le jeu "Terraforming Mars").

recupère à son retour sur Terre. Même en pesanteur réduite ⁴⁵. Alors que deviendraient ceux qui devraient y vivre sans retour ?

- Cette bulle, qu'on l'appelle comme on veut, est une prison. Le Terrien moyen dispose d'un espace vital sans commune mesure avec celui qu'offrirait un bunker sur la Lune ou sur Mars. Incarcérés et sans échappatoire, les Spatiens, du moins ceux qui auraient connu la Terre, auront bien du mal à vivre ensemble !

GCR / SPE

Les GCR (Galactic Cosmic Rays), particules hyper-véloces et rayonnements ionisants, venant de tout l'univers et les SPE (Solar Particle Event) lors d'éruptions solaires, sont extrêmement dangereuses. La protection qu'apporte le champ magnétique terrestre qui piège une grande partie de ces particules à partir de 1000 km d'altitude, ne joue donc que pour les orbites d'altitude inférieure. C'est le cas de l'ISS.

A noter que la Lune et Mars n'ont ni champ magnétique ni atmosphère dense et n'offrent donc aucune protection aux astronautes.

2.5 L'exploration : un quasi-abus de langage

Elle repose sur le paradigme qui donne pour évident que l'homme doit poser le pied ⁴⁶ partout où il le peut : sur la Lune, sur Mars, sur des astéroïdes, voire sur certains satellites des planètes géantes. L'espace en tant que nouveau continent (the new frontier ⁴⁷) ne peut donc accueillir que des "explorateurs".

Mais les missions habitées ont peu à voir avec l'exploration de territoires inconnus. Soigneusement préparé, le site d'accueil est connu et les ressources nécessaires mises en place au préalable. Le fait est que le "design driver" d'une mission est avant tout la sécurité des astronautes aux dépens d'une activité scientifique souvent présentée comme irremplaçable (observation, interprétation et adaptation *in situ*)⁴⁸. Dans les faits, la réalité est que les robots sont beaucoup mieux adaptés :

- ils peuvent aller (presque) partout et très loin, coûtent considérablement moins cher et sont opérationnels bien plus longtemps ⁴⁹. A budget égal, les territoires explorés sont beaucoup plus vastes et variés que ceux que limitent l'environnement, la durée du voyage et le rayon d'action supportables par des équipages.
- Leur perte accidentelle n'est pas longtemps traumatisante et d'ailleurs, on ne les ramène pas.

⁴⁵ 1/6 de g sur la Lune, 1/3 de g sur Mars.

⁴⁶ Surtout là où la main de l'homme n'a jamais mis le pied !

⁴⁷ Voir le discours du Président des USA, John. Fitzgerald Kennedy, le 15 juillet 1960.

⁴⁸ Une des difficultés des missions robotiques martiennes est le délai de transmission de l'info allant de quelques minutes (planètes en conjonction) à plus de 20 minutes, (planètes en opposition).

⁴⁹ Pas question de prolonger le séjour d'astronautes sur Mars à quelque prétexte que ce soit. Par contre, en 2025, le rover Curiosity , qui s'est posé sur Mars le 6 août 2012 , opère toujours alors que sa mission ne devait durer que 2 ans.

- Leur mission n'est pas dictée par la sécurité exigée pour les missions habitées mais par des objectifs scientifiques souvent très ambitieux et des contraintes technologiques.
- Ce n'est pas le sens de l'Histoire. Le robot remplace ou plutôt prolonge l'homme chaque fois que sa présence *in situ* est trop difficile, trop risquée, voire impossible (le fond des océans, les volcans, le cœur des centrales nucléaires et maintenant les champs de bataille !). Et la tendance s'accélère ! Le temps est proche où les robots domestiques seront nos compagnons au quotidien ⁱⁱ sans parler des véhicules autonomes.
- Enfin, et ce n'est pas le moindre, n'est pas astronaute qui veut. En témoignent le processus de sélection et l'entraînement avant les vols. L'Espace est réservé à une élite (même si quelques "touristes" fortunés peuvent prétendre en faire partie) et cela n'est pas près de changer, surtout s'il faut beaucoup s'éloigner de la Terre.



Rover martien de la [NASA](#).

De nombreux scientifiques ne cautionnent pas les vols habités en raison de leur rapport coût / bénéfice jugé extravagant, comparé aux missions robotiques. Ils se trompent toutefois s'ils pensent qu'ils utiliseraient mieux les budgets alloués aux missions habitées car ils n'en disposeraient pas pour autant. "L'Homme dans l'espace" est l'apanage des "politiques" qui le jugent d'abord sous l'angle de la vitrine qu'il offre à leur pays.

Un exemple



"Figure 03", le robot humanoïde qui veut s'immiscer dans votre vie quotidienne
(L'Usine Digitale – 13 octobre 2025)

La start-up américaine Figure AI a présenté "Figure 03", un robot humanoïde qui embarque son modèle vision-langage-action propriétaire Helix. Conçu pour une utilisation domestique et une production en masse, Figure 03 comprend un nouveau système de vision avec des caméras situées sur chaque main ainsi que des capteurs pouvant détecter des poids très légers, jusqu'à 3 grammes. Au total, Figure AI espère produire 100 000 robots d'ici à 2029 (Yoann Bourgin - 10 octobre 2025).

Ce n'est qu'un exemple. De nombreuses entreprises, notamment françaises, proposent ces machines à des prix compris entre 15000 et 100000 €.

2.5 On va marcher sur Mars ?

Rien n'est moins sûr ! C'est dans les cartons de la Nasa depuis des décennies mais rien de vraiment concret pour le moment. Il y a 30 ans, en tant qu'affecté à la prospective au CNES, j'ai réuni un groupe de travail sur le sujet, lequel a démontré ce que dit aujourd'hui l'article "Mission habitée vers Mars" de Wikipedia. Citons-en juste le début :

"la réussite de ce projet demande des moyens financiers bien supérieurs à ceux du programme Apollo, lui-même lancé grâce à un concours de circonstances particulièrement favorable (guerre froide, embellie économique)".

"Un vol habité vers Mars est un défi technique et humain sans commune mesure avec une expédition lunaire : taille des vaisseaux, support-vie fonctionnant en circuit fermé sur de longues durées (900 jours), fiabilité des équipements qui ne peuvent être réparés ou dont la redondance ne peut être systématiquement assurée, problèmes psychologiques d'un équipage confiné dans un espace restreint dans un contexte particulièrement stressant, problèmes physiologiques dus à l'absence de gravité sur des périodes prolongées."

J'ajouterais qu'on cherche aujourd'hui des traces de vie sur Mars. Avec l'homme pollueur, on est assuré d'en trouver ! ⁵⁰. En principe, les sorties en scaphandre ou en véhicule pressurisé devraient garantir qu'il n'en sera rien mais un accident est toujours à craindre.

C'est pourquoi, l'envoi d'un équipage sur Mars est l'arlésienne des missions habitées. Jusqu'à maintenant, c'est toujours pour dans 30 ans. Mais depuis qu'Elon Musk a la prétention de coloniser ce désert glacé (-65° C en moyenne) sans atmosphère respirable (du CO₂ à une pression moyenne de 7 mbar au sol), à partir d'une multitude de lancements de 100 colons à bord de son vaisseau géant Starship, beaucoup semblent y croire. Quant à moi, ayant étudié l'envoi d'un simple équipage (moins de 10 astronautes), ma position est claire et je suis prêt à l'argumenter. Pour de multiples raisons, je crains que le scénario d'Elon Musk n'ait d'autre issue qu'un suicide collectif.

Je sais que mon point de vue est contestable mais je pense que, dans le contexte actuel, la mission habitée sur Mars de la NASA ne peut être une priorité...sauf peut-être si la Chine s'en mêle !

2.6 Le cas de L'ISS

De ce point de vue, la station spatiale actuelle, l'ISS, et ses occupants ne sont pas l'exemple à suivre pour des missions lointaines :

- d'abord le 0-G : voir ci-dessus pour les séjours de longue durée.
- mais surtout des hommes et des femmes extrêmement motivés et surentraînés. Sans être des surhommes, ils ne représentent aucunement la société humaine dans sa diversité.

A cela s'ajoutent toutes sortes d'inconvénients

- Espace exigu et encombré. Atmosphère confinée malgré une climatisation sophistiquée.
- Entièrement dépendante de la Terre qui l'approvisionne et la contrôle en permanence.
- En orbite basse, zone de plus en plus encombrée de débris, elle est soumise au risque de collision et doit régulièrement procéder à des manœuvres d'évitement. Elle doit aussi rehausser son orbite régulièrement dégradée par la traînée atmosphérique résiduelle.
- Son coût de développement et d'exploitation (150 Md\$, 35 M\$ le séjour) sans grandes retombées scientifiques (hormis l'homme comme sujet), pourtant sa vocation première.

Cela dit, l'ISS est une réalisation révolutionnaire :

- Elle était jusqu'à peu ⁵¹, le seul laboratoire offrant du 0-g permanent
- Elle apprend à vivre dans l'espace. L'expérience acquise est considérable.
- Dans le contexte géopolitique actuel, elle est la seule occasion de faire vivre ensemble deux nations qui s'opposent sur Terre.
- Et tous les astronautes le disent : voir la Terre depuis l'espace change l'idée qu'on se fait du monde.
- Elle est un outil efficace de communication avec le public, ce qu'a bien compris l'ami Thomas Pesquet.

Sur le plan technique :

- Son assemblage en orbite préfigure celui des grandes structures à venir.

⁵⁰ Les robots martiens sont soigneusement décontaminés avant leur lancement. Sur la Lune, c'est différent : aucune vie ne peut y durer.

⁵¹ Jusqu'à l'arrivée en 2021-2022 de la station chinoise Tiangong.

- Les systèmes de lancement (lanceur + véhicule cargo ou habité) qui la desservent sont le résultat d'une sélection darwinienne par les coûts et la sûreté de fonctionnement : capsule vs. avion spatial, consommable vs. réutilisable. Et ce n'est pas fini.

Les débris spatiaux

Le développement des technologies spatiales ces dernières décennies a provoqué une augmentation du trafic dans l'espace qui se traduit par une progression exponentielle du nombre d'objets en orbite. Cette situation commence à poser de sérieux problèmes de sécurité. (tiré de l'article du CNES sur le sujet).

En provenance principalement de satellites et d'étages de fusées abandonnés en fin de mission, soumis à l'ambiance spatiale ou s'auto-détruisants, ce sont surtout ceux qui orbitent entre 200 et 900 km d'altitude qui sont devenus un véritable fléau tant le risque de collision avec un objet opérationnel est devenu élevé. La dimension de ces débris peut aller d'une fraction de millimètre à la taille d'un autobus. Seuls les débris de plus de 10 cm circulant en orbite basse peuvent être suivis. L'impact sur un satellite d'un débris de l'ordre du centimètre de diamètre est équivalent à celui d'une enclume en chute libre. (source Wikipedia).



Les membres de la mission Crew-9 de SpaceX (NASA) à l'intérieur du module Unity de l'ISS. De gauche à droite: l'astronaute de la NASA Suni Williams, le cosmonaute de Roscosmos Aleksandr Gorbunov et les astronautes de la NASA Nick Hague et Butch Wilmore (NASA).

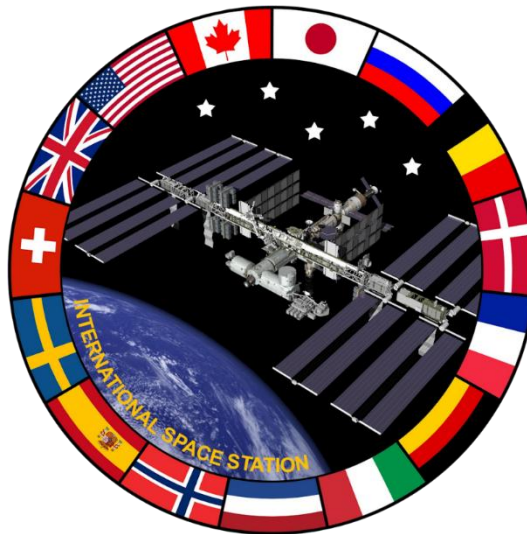
Mais l'ISS vieillit, coûte cher et n'offre plus guère de perspectives. Mais qui a vraiment envie de l'abandonner (et de payer pour ça) ? Il faudra pourtant bien s'y résoudre. Elon Musk a un contrat de la Nasa pour la désorbiter d'ici 2030 et peut-être avant. Elle devrait être remplacée par une ou plusieurs petites stations "privées", plus petites, destinées à la recherche scientifique payée par les utilisateurs.

Les autres moyens de l'impesanteur

Ils sont tous basés sur la chute libre, seul moyen actuel d'annuler la pesanteur. Ainsi :

- Les vols paraboliques (A310 / 0-g de Novespace) offrent de courtes durées de 0-g ou de gravité réduite (31 paraboles de 22 s).
- Les fusées-sondes et le "tourisme spatial", quelques minutes.
- Encore moins les "tours d'impesanteur" : à peine 5 s de chute libre dans la "Fallturm Bremen", 10 si on fait la montée avant la chute.

En fait, ces moyens s'avèrent complémentaires, compte tenu de la variété des expériences qui s'y pratiquent.



L'ISS est un bel exemple de coopération internationale. Principaux participants : les US (NASA), l'Europe (ESA), la Russie (ROSCOSMOS), le Japon (JAXA), le Canada (ASC).

Chapitre 2 – Vivre (pour de bon) en dehors de la Terre

Rien ne s'est fait de grand qui ne soit une espérance exagérée

Jules Verne

1. APOGEIOS: une ville dans l'espace

Hommage

C'est ici l'occasion d'évoquer Jacques Rougerie, grand architecte, océanographe et académicien qui propose de construire des habitats en grande partie sous-marins.

A titre d'exemple, avec le vaisseau SeaOrbiter, il veut offrir à la science un outil inédit pour étudier les mers et les océans ⁵².



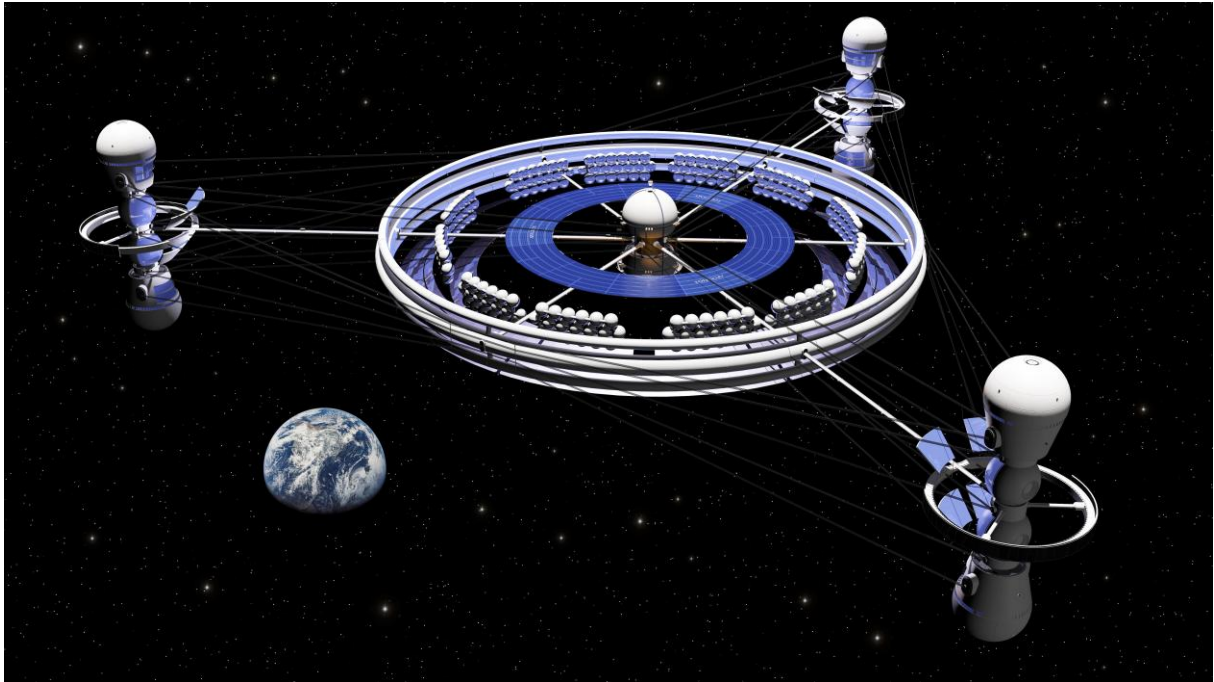
Mais ce qui est important, c'est qu'il considère que la mer et l'espace ont nombre de points communs. A ce titre, la Fondation Jacques Rougerie de l'Académie des beaux-arts, alliée à notre premier astronaute Jean-Loup Chrétien, se veut les conjuguer avec la "Génération Espace Mer" et Arts, Sciences, Technologies et Nature pour bâtir le futur de nos civilisations.

C'est dans ce cadre qu'il nous a récompensé, Olivier Boisard et moi-même, pour notre projet de cité spatiale APOGEIOS, laquelle doit être construite comme les grands navires avec un ber pour l'assembler et finir par sa mise en rotation, l'équivalent de leur lancement en mer.

Le concept nous a valu en 2011, à Olivier Boisard et à moi-même, le prix "Architecture et design de l'espace" décerné par la Fondation Jacques Rougerie "Génération Espace - Mer" (Institut de France). C'est Olivier qui, comme "Space Designer" lui a trouvé son nom et surtout un look moins austère que mon croquis d'ingénieur.

⁵² voir l'article de Chloe Durand-Parenti, publié le 12/08/2024 dans le magazine "Le Point".

Le sujet n'est pas nouveau, loin de là. Il est même un peu usé. Il date pratiquement de Constantin Tsiolkovski (1857 – 1935) considéré comme un des pères de l'astronautique ⁵³. Et sans parler de la SF.



Apogaios. Conception: Pierre Marx. Modélisation: Olivier Boisard

1.1 Un mythe fondateur

On change de paradigme, de dimensions et d'objectifs. APOGEIOS est un concept d'une première ville spatiale (10000 habitants) dont la vocation est d'en créer d'autres, initiant un processus de "colonisation" du système solaire jusqu'à la ceinture de Kuiper. Cette perspective constitue le mythe fondateur indispensable aux pionniers qui occuperont APOGEIOS et dont la concrétisation sera la principale occupation, au-delà de leurs tâches quotidiennes.

1.2 Quelques principes

APOGEIOS est une approche qui se veut prudente de l'installation d'une population ordinaire hors de la Terre :

- Elle est en orbite pour pouvoir, par rotation lente autour de son axe, recréer à sa périphérie le niveau de pesanteur terrestre sur le modèle de la roue de Von Braun ⁵⁴. Sauf à perdre son temps dans un carrousel, ni la Lune ni Mars n'offre cette possibilité pourtant essentielle (voir plus haut).

⁵³ "La Terre est le berceau de l'humanité. Mais on ne passe pas sa vie dans un berceau".

⁵⁴ Wernher von Braun, bien que personnage très controversé, est une des figures les plus célèbres de l'ère spatiale (voir sa biographie).

- Elle s'inspire des concepts "d'îles spatiales" de Gerard K. O'Neill ⁵⁵ en moins gigantesque. C'est une petite ville plutôt qu'un Center Park. Malgré cela, sa masse est évaluée à 750 000 tonnes dont la moitié de protection des rayonnements ionisants GCR et SPE voir encadré au § 2-4.
- N'exerçant aucune attraction, elle est beaucoup mieux protégée des météorites que la Lune ou Mars. Surtout, elle ignore les événements météorologiques extrêmes que commence à connaître la Terre sous l'effet du changement climatique ainsi que les séismes et autres tsunamis. Il se pourrait bien que ce soit sa raison d'être. Seuls les risques inhérents à un système clos (incendie, dépressurisation, pollution, épidémie,..) sont les mêmes et constituent d'ailleurs un réel challenge..
- Installée entre la Terre et la Lune, elle reste proche de la Terre. De ce fait, le cordon ombilical n'est pas coupé, ce qui est essentiel au début, et sa desserte est beaucoup plus facile et plus sûre que de devoir descendre sur la Lune ⁵⁶.
- Proche de la Lune, elle en tire une bonne partie de ses ressources notamment l'eau, l'oxygène, les ergols LH2 et LOx et les matières premières, d'abord pour sa construction (aluminium, fer... et sa protection CGR / SPE à base de régolite lunaire), ensuite comme source d'approvisionnement de la cité et de ses habitants.
- Ne viennent de la Terre que les produits élaborés et peu encombrants, comme les robots pour la construction et, plus généralement, tout ce qui ne peut pas être fabriqué hors de Terre, surtout au début.

Les points de Lagrange Terre-Lune

Il existe dans le système Terre-Lune, 5 points, dits de Lagrange, immobiles par rapport à ces deux corps. L_1 , L_2 et L_3 sont instables, contrairement à L_4 et L_5

Pour cette raison, nous avons positionné Apogeios au point L_2 , ce qui est une erreur du fait que s'y trouve piégés nombre de petits corps, augmentant ainsi le risque de collision. Par contre, placé sur un point instable, des corrections d'orbite sont nécessaires.

1.3 Le programme

Après avoir créé en une dizaine d'années l'infrastructure nécessaire : unités de production sur la Lune et sur le chantier, moyens de transport entre la Terre, la Lune et la cité, vient la construction inspirée de celle des grands navires et d'une durée estimée à 35 ans. Ensuite le peuplement en quelques années. Au total, compter un demi-siècle à partir de la décision de programme.

Mais la bonne question est "Combien ça coûte ? "

⁵⁵ Gerard K. O'Neill (1927-1992) était professeur à Princeton où il enseignait la physique. Il fit travailler ses étudiants sur le développement de grandes structures dans l'espace. Voir son livre "*The High Frontier : Human Colonies in Space*" (1976)

⁵⁶ Le processus étant très voisin des lancements en GEO.

- Le coût à achèvement de la cité proprement dite est estimé à 2000 Md\$, soit ~ 60 Md\$/an en moyenne. Cela suppose une réduction notable des coûts de production, de transport et des opérations robotisées d'un facteur d'au moins 10. Elle paraît cependant accessible avec la probable banalisation de la robotique et si l'on s'affranchit en partie des contraintes imposées par les lanceurs terrestres du fait de la provenance de ressources pondérales tirées du sol lunaire (voir 1^{ère} partie, § 1.2 et 2.3).
- Sur cette base, par une simple règle de trois, le coût total du programme serait de 3000 Md\$. Dans l'état actuel de la planète, un tel budget dépasse largement les possibilités d'une seule nation, si riche soit-elle ⁵⁷. On ne peut l'envisager que dans le cadre d'une large coopération internationale. 60 Md\$/an représente moins de 1/1000 du PIB mondial ⁵⁸.

En conclusion, APOGEIOS est un concept crédible si l'on en croît les prospectivistes et leurs scénarios d'une Terre bouleversée par le changement climatique et ses conséquences en termes d'habitabilité, de ressources et de conflits. 10000 Spatiens, ce n'est pas grand-chose mais c'est le début de l'occupation du système solaire.

2. La colonisation de Mars

Comme je ne crois pas que ce soit la bonne voie pour s'installer dans l'Espace, je vais faire court.

Dans le système solaire, en dehors de la Terre, il n'existe aucune planète ou gros satellite qui puisse accueillir une population humaine. Tous sont extrêmement inhospitaliers, voire dangereux ou tout simplement inenvisageables. Sur le papier, seule Mars reste imaginable moyennant adaptation mais c'est un pis-aller.

C'est pourtant le but de la "Mars Society", association fondée en 1998 par Robert Zubrin, un ingénieur de la NASA. C'est le but d'Elon Musk (qui en fait partie), lequel n'hésite pas à parler de "Terraforming". Là, il ne s'agit plus d'une mission d'un petit corps d'astronautes mais bien de déplacer du monde sans espoir de retour tout en transformant la planète pour la rendre plus accueillante.

La Mars Society compte aujourd'hui environ 5 000 membres dans une cinquantaine de pays. La section française de la Mars Society est fondée en 1999 comme "Association Planète Mars" et animée par deux ingénieurs en propulsion: Alain Souchier (†) et Richard Heidmann, grandes figures du programme Ariane.

La "terraformation" ("terraforming" en anglais) est le processus hypothétique de modification délibérée de l'atmosphère, de la température, de la topographie de surface ou de l'écologie d'une planète, d'une lune ou d'un autre corps pour le rendre similaire à l'environnement de la Terre, dans le but de les rendre habitables pour les humains (source Wkipedia).

⁵⁷ Le budget annuel de la Nasa est actuellement de l'ordre de 25 Md\$ et ne semble pas devoir augmenter, bien au contraire.

⁵⁸ 111000 Md\$ en 2024 selon les données officielles de la Banque mondiale.

Déguisé en Rockstar, Elon Musk monte sur scène pour attirer les candidats et ça marche ! Naturellement, leurs motivations sont diverses mais probablement peu d'entre eux ont conscience de ce qui leur arriverait si ce projet fou voyait le jour.

3. Quitter le système solaire

3.1 The last frontier

Peut-on sérieusement imaginer "l'émigration" d'une colonie humaine vers un autre soleil ? La réponse est non mais on peut faire semblant de dire oui. D'où ce qui suit.

Mais pour aller où ? Vers une autre étoile, bien sûr ! Comme on ne peut pas rester indéfiniment sans ressources et, autant qu'on le sache, il n'y en a pas beaucoup dans le milieu interstellaire, on commencera par la plus proche même si elle n'offre aucune "nouvelle Terre".

Le voyage interstellaire frappe l'imagination tant il apparaît comme l'aboutissement de la quête des hommes et, pour certains, comme leur seul et véritable avenir. C'est l'ultime exploration. Après avoir franchi les océans puis appris à voler dans les airs et, récemment, à marcher sur la Lune, pourquoi ne pas se lancer à l'assaut des étoiles ? Et, en passant de l'une à l'autre, tels les Vikings, se répandre ainsi dans tout l'Univers ? Qu'est-ce qui pourrait les en empêcher ?

Le rêve est effectivement captivant :

- d'innombrables destinations: 200 milliards d'étoiles dans notre galaxie et 100 milliards de galaxies! Des myriades de planètes habitables (voir recherche exoplanètes) ! C'est plus varié que de trouver une nouvelle route pour les Indes !
- des aventures et des découvertes inouïes. Une variété infinie de situations. La rencontre d'autres formes de vie et, peut-être, d'autres civilisations, etc.

C'est pourquoi les voyages intersidéraux suscitent autant de productions littéraires et cinématographiques holywoodiennes où la science-fiction (la guerre des étoiles, Startrek,..), peu soucieuse de vraisemblance, renouvelle le genre de l'épopée et de la saga, de l'étrange et du grand spectacle et où les performances sidérantes et sidérales des moyens techniques, notamment des vaisseaux, relèguent à l'âge de pierre nos dernières inventions.

On peut bien sûr supposer que, dans deux siècles, la science et la technologie auront énormément évolué dans tous les domaines. Les hommes vivront peut-être plusieurs siècles ou se seront transformés en artefacts intelligents. Ils sauront peut-être modifier la gravitation et traverser facilement la galaxie. Mais ce n'est pour le moment que de la SF.

Il y a donc très loin du rêve à la réalité. Au-delà des spéculations sur la vie et l'intelligence dans l'univers, sur le devenir de l'homme et de l'humanité, les approches scientifiques et techniques sont rares et bien peu convaincantes, corsetées qu'elles sont par les limites et les paradoxes que nous imposent la mécanique relativiste, les performances limitées des moyens de propulsion les plus futuristes que nous puissions imaginer et les aléas de destinations, absolument toutes encore *terra incognita*.

Il faudrait recenser et étudier les nombreux travaux sur le sujet. Dans ce qui suit, on propose un scénario paraissant présenter un minimum de vraisemblance car basé sur :

- des perspectives plausibles parce que raisonnablement extrapolées du savoir-faire actuel,
- des données techniques et scientifiques acquises, chaque fois que c'est possible,
- la méthode et les concepts du célèbre ingénieur, chercheur et visionnaire américain Gérard K. O'Neill,
- un scénario d'exploration de l'espace décrit par l'astronome français Jean-Claude Ribes ⁵⁹.

Cela dit, que le lecteur compétent me pardonne. C'est juste pour le fun !

3.2 Point de départ

Au début du XXIII^e siècle, l'humanité a colonisé le système solaire. De nombreuses cités de toute nature ont été construites dans l'espace et sur certains corps célestes, jusqu'aux confins du système. Leur nombre et leur taille ne cessent d'augmenter et on entrevoit le moment où elles abriteront plus d'êtres humains que la planète mère. L'économie de l'ensemble est florissante et d'importantes ressources matérielles et humaines sont désormais disponibles pour de nouvelles aventures.

En deux siècles, la technologie a beaucoup progressé. Désormais, l'énergie et les ressources naturelles apparaissent sans limites du fait, d'une part de la maîtrise de la fusion nucléaire tant pour l'énergie que pour la propulsion et, d'autre part, de l'exploitation à grande échelle des ressources extraterrestres (planètes et leurs satellites, astéroïdes et comètes).

Surtout, les "Spatiens" ont appris, au prix, il est vrai, de quelques expériences malheureuses, à maîtriser leurs écosystèmes. Qu'il s'agisse des cultures en serres, des bioréacteurs ou de leur propre flore microbienne, ils savent gérer l'indésirable et réagir à la moindre alerte sans aucun secours extérieur.

Mais des transformations encore plus importantes ont modifié profondément les modes de vie et la société de l'époque. Citons, en particulier :

- Un nouveau doublement de l'espérance de vie dû aux progrès de la médecine et de la génétique. Le siècle est devenu l'âge de la maturité, la sénescence et la mort survenant entre 150 et 200 ans,
- L'omniprésence de robots, dont une grande part d'androïdes / gynoïdes, débarrassant les hommes des tâches ingrates, pénibles, dangereuses ou répétitives.

et bien d'autres que nous ne citerons pas pour n'effaroucher personne. Toutefois, contrairement aux précédentes, ces évolutions ne semblent pas indispensables pour quitter le système solaire. Mais elles devraient beaucoup faciliter les choses !

Naturellement, à cette époque, le système solaire est aussi connu et complètement exploré que la Terre l'est aujourd'hui. En particulier, tous les petits corps célestes intéressants (planétoïdes, astéroïdes et comètes) sont catalogués et leurs ressources évaluées. Quelques-uns d'entre eux ont même été changés

⁵⁹ Voir "*Phénomènes Aérospatiaux Non identifiés – Un défi à la Science*", ouvrage collectif rédigé sous la direction d'Yves Sillard et publié aux éditions du Cherche-Midi en 2007.

d'orbite ou ramenés dans le plan de l'écliptique pour en faciliter l'exploitation ou simplement déviés de leur trajectoire pour protéger la Terre d'un impact destructeur (géocroiseurs).

Ainsi est née une véritable civilisation spatiale, totalement affranchie de ses origines terrestres, mais aussi du soleil dont la proximité n'est plus recherchée, voire même évitée. Désormais, les hommes vivent en nombre, n'importe où dans l'espace, pourvu qu'ils puissent s'y procurer les matières premières dont ils ont besoin et qu'aucun danger naturel ne les menace (météorites ou radiations).

Grâce aux progrès continus de l'instrumentation et des méthodes d'observation et d'analyse, plus de cent des systèmes stellaires les plus proches sont aussi bien connus que le système solaire avant l'envoi des premières sondes, deux siècles plus tôt. En particulier, depuis la découverte, à cette époque, des premières planètes extrasolaires, de nombreuses "quasi-terres" ont été identifiées, susceptibles d'abriter la vie et, pourquoi pas, l'intelligence.

Mais surtout, deux sondes automatiques ont exploré pendant une vingtaine d'années le système triple Alpha du Centaure et les 40 ans de traversée ont permis de connaître le milieu interstellaire très au-delà de l'héliopause⁶⁰.

Toutes les conditions sont donc réunies pour entreprendre un premier voyage. En effet :

- Quelle différence entre vivre dans la ceinture de Kuiper, là où le soleil n'est qu'une étoile un peu plus brillante que les autres ou au voisinage d'Alpha du Centaure, l'étoile la plus proche, ou quelque part entre les deux ?
- Quelle différence entre occuper une orbite dans le système solaire ou s'en éloigner peu à peu en se rapprochant d'une autre étoile ?
- Quelle importance de faire le voyage en une seule vie plutôt qu'en plusieurs générations ?
- Quelle importance de trouver ou non une planète habitable au bout du parcours ? Et pourquoi s'y poser ? alors que les aïeux ont quitté la Terre. Sans parler d'éventuels ET !
- Quant au retour, il est sans intérêt. On quitte le soleil comme les aïeux ont quitté la Terre et les aïeux de nos aïeux, l'Europe. Le but est de coloniser le nouveau système (et d'autres, par la suite). Et rien n'empêche de communiquer (bien qu'au bout de quelque temps, ce soit un peu long !)

Ce n'est presque plus une aventure ! Il s'agit seulement de changer de soleil et rien n'empêche d'y mettre le temps. Seul vrai problème: celui de vivre en autarcie pendant des décennies.

Naturellement, aucune de ces conditions n'existe ou n'est acceptable aujourd'hui. La technologie n'est pas là et nous n'avons pas encore quitté la Terre. C'est pourquoi ceux qui imaginent un voyage vers les étoiles propulsent le vaisseau à coup d'explosions thermonucléaires (quand ils ne tordent pas les lois actuelles de la physique) et se sentent obligés de faire hiberner (est-ce seulement possible ?) une poignée de kamikazes engagés sur la promesse fallacieuse d'un Eden hypothétique.

⁶⁰ L'héliopause est la limite où, face aux vents galactiques, le vent solaire s'éteint et où débute l'espace interstellaire. De forme ovoïdale, ses dimensions se comptent en centaines d'UA.

L'hibernation ralentirait le vieillissement sans pour autant le suspendre. Comment admettre de perdre ses meilleures années dans une hibernation d'un siècle ? Seule la cryptobiose, observée chez des animalcules marins (tardigrades), est une quasi stase réversible mais ne semble pas pouvoir être transposable à l'homme.

Mais à la fin du XXIIème siècle, cette nouvelle expansion n'est plus une utopie et la question n'est pas des moyens mais de l'opportunité d'une telle expédition, question dont se sont saisies les plus hautes autorités morales et objet d'âpres et interminables débats où s'affrontent partis politiques, comités d'éthique et autres think tanks. Finalement, médias aidant, l'opinion publique, passée la période de méfiance et d'incrédulité, se passionne et prend parti pour le projet. En parallèle, le lobbying acharné des agences étatiques et de l'industrie spatiale ont eu raison des réticences de nombreux cercles dirigeants.

En 2225, après des années d'atermoiements, les 197 membres du S.S.A.C (Solar System Administration Council), réunis en assemblée souveraine, se prononcent à une faible majorité en faveur d'une migration vers une étoile proche, actant solennellement que l'humanité a vocation à se répandre dans toute la galaxie. Ils lancent un appel d'offres et accordent une aide budgétaire substantielle de 50 GSols au projet qui sera retenu.

Candidatons !

3.3 Le projet

Nota: Proxima Centauri b, découverte en 2016, est une exoplanète probablement tellurique, d'une masse minimale de 1,3 masse terrestre, en orbite dans la zone habitable de l'étoile naine rouge Proxima Centauri, qui est la plus proche étoile du Soleil (4,243 A-L, soit environ 40000 milliards de km) et qui fait partie d'un système stellaire triple.

KSC - Juillet 2225 - Présentation par la responsable du projet **AlphaBET** (pour **ALPHA** Centauri **B** / Exodus Trip), Mrs. Karolin Sterlat, au jury désigné par le Conseil.

Mrs. Karolin Sterlat, 96 ans, est Docteur ès Sciences (astrophysique), architecte diplômée du très prestigieux Institut de Macroingénierie Spatiale et titulaire d'une chaire à la Haute Ecole de Management des Grands Programmes. Comme Chef de Projet, elle a mené avec brio la construction de la dernière-née des cités de l'archipel: l'île "Seguin" (ndlr! : en hommage au célébrisime îlot parisien). Mrs. Karolin Sterlat est Grand Officier de l'Ordre Solaire et membre actif de la 5A ⁶¹.

La ceinture de Kuiper

est un grand anneau de petits corps orbitant autour du soleil. Il est constitué d'astéroïdes, de comètes et de planétoïdes glacés. Leur nombre est estimé à environ 10 milliards dont 100 000 d'un diamètre > 50 km et quelques milliers d'un diamètre > 100 km).

⁶¹ Association Amicale des Amateurs d'Andouillette Authentique.

La première partie de la ceinture s'étend entre 30 et 50 UA et s'arrête à la "falaise de Kuiper", la seconde partie va au-delà (100 UA et plus). La plupart sont situés sur des orbites inclinées par rapport au plan de l'écliptique.

Entrée en matière

"Bienvenue à KSC (Kuiper Space City), capitale du plus lointain et du plus peuplé des archipels solaires (35 UA, 75 millions d'habitants. *NDLR*). Nos équipes, associées à celles de Lagrangia et de Marcity, réputées dans tout le système pour leur expérience et leur savoir-faire complémentaires, préparent depuis maintenant trois ans le projet dont j'ai l'honneur de vous exposer les grandes lignes. Comme vous le précisera notre Haut Commissaire ici présent, ce projet a reçu l'agrément de notre gouvernement, lequel est disposé, s'il est retenu, à soutenir son développement sur la base d'un accord équilibré avec l'Institution Centrale et les archipels que le projet pourrait intéresser.

Nous proposons de construire une flottille de grands vaisseaux capables de franchir les 4,24 A-L qui nous séparent du système triple Alpha du Centaure, le plus proche de notre Soleil. Comme vous le savez, parmi les planètes telluriques qui gravitent autour de ces étoiles, l'une d'entre elles qui orbite à environ 0,7 UA de l'étoile B présente des caractéristiques assez voisines de celles de la Terre⁶². Cependant, la présence de formes de vie apparemment évoluées constitue un risque trop important pour envisager le contact.

Mais notre objectif n'est pas de coloniser d'autres planètes, même habitables, alors que nombre de Terriens ont émigré dans les cités de l'espace. Le véritable but de l'expédition est de donner du champ à l'humanité, conformément au discours fondateur du SSAC. Notre projet est effectivement conçu comme tel.

Alors, pourquoi cette destination ? Pour deux raisons essentielles :

- D'abord parce que les colons doivent trouver le plus vite possible les ressources (planètes, comètes et astéroïdes) nécessaires à leur survie. Nous verrons tout à l'heure qu'il faut prévoir des réserves considérables pour tenir pendant la durée de la traversée puisque, évidemment, on ne peut rien espérer trouver en chemin. Et donc, plus le voyage sera court, moins ces réserves seront importantes.
- Ensuite, parce qu'étant le système le plus proche, Alpha du Centaure est le mieux connu. Certes, parmi la centaine de systèmes distants de moins de 20 A-L que deux siècles d'observations nous ont rendu familiers, il n'apparaît pas comme la meilleure destination. Mais c'est de loin la plus sûre. C'est, en effet, le seul système observé *in situ* par les deux sondes d'exploration Icarus 1 et 2 qui, pendant plus de 20 ans, l'ont arpenté et observé de près. Ainsi, de nombreux astéroïdes et comètes ont été précisément identifiés et minutieusement explorés. Plusieurs s'avèrent de bons ports d'arrivée assurant ainsi aux candidats au voyage qu'ils pourront se réapprovisionner en eau et en matières premières avant de commencer à s'installer au sein du système.

⁶² Voir Ciel & Espace n° 456 de mai 2008.

Le projet Icarus

Nom donné en hommage au projet de sonde interstellaire inhabitée Daedalus, étudié à la fin du XX^e siècle par la British Interplanetary Society et abandonné en 1978. Deadelus devait atteindre l'étoile de Barnard, distante de 5,9 A-L., dans le temps d'une carrière professionnelle de l'époque (~ 40 ans).

Ce nouveau projet a pour objectif de construire une sonde interstellaire capable d'atteindre un système planétaire situé à moins de 15 années-lumière dans le temps d'une vie humaine. Icarus occupe depuis 2009 une vingtaine de physiciens, ingénieurs et spécialistes du vol spatial dont le fondateur du projet, le physicien Kelvin Long.

Voyage, Voyage

Parlons donc du voyage. Comment se rendre vers Alpha B ? Aussi curieux que cela puisse paraître, la réponse est "tout droit". La mécanique spatiale ne nous avait pas habitué à cela ⁶³ mais nous ne sommes plus dans le système solaire mais dans la galaxie, à 26000 A-L de son centre. Alpha B est donc quasiment sur la même orbite que notre Soleil. De plus, contrairement aux lois de Képler qui régissent le mouvement des planètes, les étoiles tournent toutes à la même vitesse ⁶⁴, de sorte qu'en 1^{ère} approximation, la trajectoire optimale est rectiligne.

Bien entendu, il faut d'abord s'échapper du système solaire et, à la fin du voyage, se mettre en orbite autour d'Alpha B. Par ailleurs, les deux étoiles ne sont pas vraiment immobiles l'une par rapport à l'autre, d'autant qu'Alpha B fait partie d'un trio où chaque étoile tourne autour des deux autres. Mais la somme de tous ces écarts de vitesse, quelques dizaines de km/s, n'est rien, vous vous en doutez, à côté de la vitesse atteinte lors de la traversée.

C'est là que se pose la question cruciale de la durée du voyage. Si les sondes Deadelus et Icarus n'ont mis que 40 ans pour effectuer la traversée, nous ne pouvons prétendre en faire autant avec des vaisseaux habités beaucoup plus lourds. Il ne s'agit plus de propulser quelques dizaines de tonnes d'instruments de mesures et d'observation et les moyens de traitement et de transmission associés, mais bien d'acheminer une colonie qui, pendant le temps du voyage, devra vivre en totale autarcie avec le souci permanent d'assurer sa sécurité.

Comme nous allons le voir, ce sont les deux principaux "design drivers". Le premier est, pour nous tous, tout-à-fait nouveau. Notre développement dans le système solaire n'a pu se faire que grâce aux ressources inépuisables qu'offre la multitude de corps célestes qui s'y trouvent. L'eau, l'oxygène et l'azote, tous les métaux, les substances carbonées, en fait tous les éléments chimiques sont disponibles en quantités quasiment infinies pour peu qu'on décide de les extraire.

⁶³ Dans le système solaire, les trajectoires sont des arcs orbitaux (elliptiques ou hyperboliques) ou, en cas de propulsion continue à faible poussée, des spirales.

⁶⁴ soit environ 220 km/s autour de Sagittarius A, le trou noir super massif tapi au centre de la galaxie.

Rien de cela entre les deux étoiles. Il n'y a pas d'autre solution que d'emmener les ressources nécessaires pour compenser les fuites, compléter le recyclage de l'atmosphère, de l'eau et des déchets, régénérer les écosystèmes et maintenir en état de fonctionnement la multitude de machines et d'équipements embarqués, sans oublier la marge d'ergols pour couvrir les aléas du voyage et surtout ceux de l'arrivée. Il faudra embarquer une grande quantité d'eau, de l'oxygène et de l'azote ou des substances en contenant, des souches génétiques, des semences, des engrais, des produits phytosanitaires, des médicaments et bien d'autres produits, des équipements et des composants de toutes sortes et aussi des matériaux et les machines pour les mettre en œuvre.

Il y a donc un optimum à trouver entre voyager vite avec peu de ressources mais beaucoup d'ergols et l'inverse, sachant que s'en écarter devient rapidement absurde. Notre projet situe cet optimum vers une durée d'un peu plus d'un siècle, 126 ans pour être précis.

Sur ces bases, un calcul simple donne la vitesse maximale atteinte par les vaisseaux avant qu'ils se retournent pour inverser la direction de la poussée et donc décélérer pour arriver à destination en douceur. Compte tenu de la vitesse d'éjection du plasma (20000 km/s), les vaisseaux atteignent, à mi-course, la vitesse phénoménale de 16000 km/s, soit 5% de la celle de la lumière.

La question de la sécurité nous est plus familière à ceci près qu'il faut l'assurer, sans aucune aide extérieure, pendant plus d'un siècle. Comment, dans ces conditions, garantir que la colonie arrivera à bon port en bonne santé physique et mentale, avec suffisamment de moyens pour démarrer son installation avant de pouvoir exploiter les ressources locales ?

Non que le danger vienne du milieu interstellaire. La probabilité d'impact d'une météorite est infinitésimale et même à la vitesse maximale, les grains de poussière interstellaire sont si petits (moins d'un micron) et si peu nombreux (1000 / km³) qu'il est aisé de se prémunir de leur effet abrasif.⁶⁵ Quant aux gaz (essentiellement de l'hydrogène), il y en a moins que dans la meilleure enceinte à vide. Enfin, les radiations se limitent au rayonnement GCR. Le soleil est loin et, à l'arrivée, notre intention est de rester assez loin de l'étoile au moins dans un premier temps (après tout, nous sommes des Kuiperiens !).

L'espace interstellaire n'est pas vide

La galaxie contient des milliards d'objets libres, de masse planétaire, à la dérive dans une nuit sans fin. Ce sont des planètes orphelines, éloignées de leur étoile mère lors de leur naissance chaotique. Ces planètes vagabondes sont des mondes errants. Elles n'ont ni lever, ni coucher de soleil, car elles ne sont rattachées à aucun astre, contrairement aux planètes qui nous sont familières. À la place, elles orbitent de manière indépendante autour du noyau de la Voie Lactée (source Wikipedia).

De même, l'espace intergalactique contient des étoiles orphelines ou étoiles errantes n'appartenant à aucune galaxie.

Reste à assurer la sécurité par la maintenance et le dépannage, la redondance et l'adaptation, le sauvetage et la survie. La première exigence est de régénérer périodiquement les écosystèmes. La grande visite d'un vaisseau nécessitera, comme on le fait dans nos cités, de le vider totalement de ses habitants, tous les 5 ans par exemple, pendant les quelques mois que dure le chantier et donc de les transférer dans les

⁶⁵ Voir note en annexe

autres vaisseaux. Avec seulement deux vaisseaux, chacun devrait être dimensionné pour le double de sa population habituelle, ce qui est tout-à-fait excessif. Certes, on peut aussi concevoir les vaisseaux comme nos cités mais surtout, cela suppose que, dans cette circonstance normale et récurrente du voyage, on accepte d'abaisser significativement le niveau de sécurité de la population puisqu'il est alors impossible de quitter le vaisseau en cas d'accident grave pour se réfugier dans un autre. C'est pourquoi, il faut au moins trois vaisseaux. Nous nous sommes arrêtés à ce nombre pour des raisons économiques que vous comprendrez aisément.

Les vaisseaux

Venons-en maintenant aux colons et à leurs vaisseaux. La première question qui se pose est : combien et pour combien de colons? De nombreux aspects sont évidemment à prendre en compte, notamment le coût et la sécurité, mais aussi le "Manpower" nécessaire, une fois arrivé à destination, lorsqu'il faudra exploiter les ressources locales et construire de nouvelles cités. L'expérience montre qu'une colonie trop petite court le grave danger de ne pouvoir faire face à toutes les tâches à mener plus ou moins simultanément. Le débat mené sur Terre, lorsqu'il s'est agi, il y a plus d'un siècle, de construire APOGEIOS (nom donné à la première cité spatiale du fait de sa position au point de Lagrange n° 2 du système Terre-Lune. NDLR), est à ce sujet très instructif et, transposé à notre époque et au cas qui nous occupe, donne un résultat comparable, à savoir une population initiale de dix mille colons.

Nous les répartissons dans trois vaisseaux identiques. Ce n'est pas par référence à la première expédition de Christophe Colomb vers l'Amérique⁶⁶, mais essentiellement pour mieux gérer les écosystèmes et assurer la sauvegarde en cas d'accident grave. Je reviendrai plus tard sur ce point absolument essentiel.

La deuxième question est quel genre de vaisseau ? Il faut faire une cité en même temps qu'un astronef, capable de vivre jusqu'à deux siècles en autarcie, sans aucune ressource extérieure. Là est le challenge.

Les vaisseaux sont des "trimarans", les "coques" formant une étoile à trois branches terminées par trois sphères de 75 m de diamètre environ. Chacune comporte un habitat de 10 ha et une serre ultraponique⁶⁷ de 5 ha. La protection GCR est assurée par un revêtement extérieur de 25 cm d'hydrure de lithium. Ce matériau léger et efficace est réputé coûteux mais, dans notre cas, l'hydrogène et le Lithium 7 qui le composent proviennent de la séparation du deutérium et du lithium 6 nécessaires aux systèmes propulsifs. Cela étant, nous faisons l'hypothèse que tous les colons seront radorésistants, ce que l'on peut espérer au vu du succès des récentes campagnes de prévention génétique de l'OMS.

Les branches de l'étoile sont des tunnels reliant les habitats au centre de l'étoile. Longs de 665 m pour un diamètre de 20 m, ils abritent les serres ultraponiques. La surface cultivée totale est d'environ 10 ha. L'atmosphère qui y règne est celle des serres habituelles (*ndlr: 400 mbars, 42% d'oxygène, 35°C et 90% d'humidité*). Le centre est occupé par les propulseurs et les stockages d'ergols.

S'agissant d'un voyage sans retour, doit-on conserver nos normes environnementales, vieilles de plus d'un siècle, justifiées (de plus en plus mal) par la nécessité de conserver le lien ombilical avec la Terre?

⁶⁶ Ses trois navires n'étaient d'ailleurs pas identiques (deux caravelles et une nef).

⁶⁷ Contraction d'ultrasons et d'hydroponique. Culture sans substrat. Les racines sont plongées dans un fin brouillard d'oxygène humide, chargé en sels minéraux et en oligoéléments. Voir le site de la startup française GUS (Growing Ultraponic System).

Pourquoi alors devrait-on "exporter" la pesanteur et l'atmosphère terrestre, là où nous savons, par exemple, que cette planète que j'évoquais tout à l'heure a un niveau de gravité de 1,4 g, une atmosphère irrespirable, une pression au sol de 3,5 bars et une température qui descend rarement en dessous de 45°C ? Autre question: s'agissant de vaisseaux, quelles normes d'habitabilité doit-on appliquer? Celles des croiseurs spatiaux, celle des cités ou des normes spécifiques ? Nous avons longuement débattu de ces questions sans pouvoir conclure de manière définitive. D'un côté, l'expérience de plus de deux siècles de séjours dans l'espace militent plutôt en faveur du *statu quo* mais les avis divergent fortement, de l'autre certains de nos ingénieurs, les "mass killers", verraient bien les colons vivre en apesanteur dans d'étroites cellules, respirant d'inavouables compositions gazeuses. Finalement, nous avons considéré que le fait de s'exiler autant que la durée du voyage étaient suffisamment éprouvants pour ne pas en rajouter en imposant un changement trop radical d'environnement. Nos vaisseaux offrent donc des conditions de vie voisines de celles de nos cités: une pesanteur comprise entre 0,8 et 1 g, l'atmosphère terrestre en zone tempérée à 2200 m d'altitude terrestre et un espace vital de 60 m² / 150 m³ par individu.

J'en profite pour répondre à la question que vous vous posez certainement. Comment nourrir la colonie pendant tout le temps du voyage, sachant son isolement mais aussi qu'à bord, chaque tonne compte ? Nos cultures en serres habituelles, grosses consommatrices d'espace et de substrats, sont totalement inadaptées. Par ailleurs, nos us et coutumes alimentaires doivent être conservés. L'art culinaire et ce qui l'entoure, héritage de nos ancêtres terriens, fait partie du patrimoine de l'humanité et est classé comme tel. C'est pourquoi, nous avons réuni l'élite de l'industrie agroalimentaire ainsi que d'éminents scientifiques (biologistes, écologistes, nutritionnistes,...) étroitement surveillés par quelques toques étoilées et nos ingénieurs chargés du bilan masse. Eh bien je peux vous dire que le résultat est là. Cette équipe a réalisé une serre ultraponique extrêmement légère, dont le rendement exceptionnel le dispute à la qualité et à la variété des produits. La terrine de lièvre aux petits légumes, le sorbet ananas-mangue et le Pouilly Fumé 2207 que vous pourrez déguster au cocktail vous en convaincront.

La masse de l'ensemble habitat + serres avoisine les 40 kilotonnes (dont 10 pour les serres). Il tourne autour de son axe à raison d'un tour et demi par minute, créant une pesanteur de 1g au niveau le plus bas des habitats et de 0,8 g au niveau le plus haut. Notons que cette masse, rapportée au nombre d'habitants donne un ratio de 12 T/individu, trois fois plus faible que la moyenne observée pour les cités et cela pour un très petit habitat et sans ressources extérieures. La raison en est bien sûr que, du point de vue du vaisseau, cette masse est celle de la charge utile. Réduire cette masse est donc un impératif, malheureusement au détriment du coût.

Deukaliôn ou "Prends le Soleil et tire-toi"

Comme toujours, la mission est largement conditionnée par les possibilités des systèmes de propulsion. Parmi les moyens dont nous disposons, le plus performant, et de loin, reste le réacteur à fusion nucléaire couplé à une tuyère magnétique dont vous trouverez un rappel du principe de fonctionnement dans le culturel qui vous a été remis à l'entrée. Certes, les recherches actuelles sur d'autres principes de propulsion semblent prometteuses mais tous les spécialistes s'accordent à dire qu'ils ne supplanteront pas les moteurs actuels avant au moins 50 ans.

Nous sommes, à KSC, des spécialistes reconnus de ces moteurs. Sans ce savoir-faire, il eut été très difficile d'occuper notre position excentrée dans le système solaire. Notre expérience presque centenaire, tant dans leur construction que dans la production à grande échelle de deutérium et de lithium 6, a fait

de nous le leader incontesté du marché. Nous avons donc quelques raisons d'être fiers de *Deukaliôn*⁶⁸, notre dernier-né, que j'aimerais maintenant vous présenter..

Sans remettre en cause des principes largement éprouvés, *Deukaliôn* inaugure une nouvelle génération de propulseurs. Quelques chiffres: 2600 T (radioprotection comprise), 35 m de long, 21 m de diamètre, 3000 GW efficaces, 30 tonnes de poussée et une durée de vie calculée supérieure à deux millions d'heures (soit plus de deux siècles). *Deukaliôn* est sans équivalent aujourd'hui. Totalement autonome, il ne nécessite aucune assistance externe pour son démarrage et son alimentation électrique. Il est muni des systèmes de surveillance et de sécurité les plus perfectionnés et sa maintenance est totalement robotisée. Développé en partenariat public privé, sous maîtrise d'oeuvre de la SNEKMA (*ndlr: Société Nouvelle Kuiperienne de Moteurs Atomiques*), sa qualification s'achève avec, notamment, la démonstration d'une durée de fonctionnement continu de 20000 h entre maintenances. Notre confiance dans cette machine est telle que nous l'utilisons en ce moment pour modifier l'orbite de la comète DELI (*ndlr: nomenclaturée*⁶⁹ P/2178 B22) dont nous voulons extraire les tonnages importants de deutérium et de lithium 6 nécessaires aux vaisseaux.

Grâce aux performances exceptionnelles de ce moteur, il est possible de réaliser la mission avec un seul ensemble propulsif alors que les sondes robotiques ont eu besoin de deux étages. La moindre complexité qui en résulte, et ses conséquences en termes de fiabilité et de coût, compensent très largement le supplément de masse totale qui, d'ailleurs, reste tout-à-fait acceptable.

Dans ces conditions, le voyage requiert 328 kT d'ergols (marges comprises), soit 82 kT de deutérium et 246 kT de lithium 6. Le deutérium est stocké à l'état liquide dans le noyau central. Le lithium à l'état solide recouvre les habitats participant à la protection GCR tant qu'il n'est pas consommé.

Nous prévoyons d'équiper chaque vaisseau de 6 de ces moteurs dont un à l'arrêt servant de secours, les cinq autres fonctionnant en régime permanent à 90% de leur poussée maximale. Cette mesure, bien que pénalisante pour la performance, garantit la longévité et la fiabilité du système propulsif dans son ensemble. Sachant, de plus, que les vaisseaux qui voguent de concert peuvent s'entraider, nous pensons réunir les conditions pour assurer la réussite de la mission en toute sécurité.

Voyage Voyage

Sur ces bases, un calcul simple donne la vitesse maximale atteinte par les vaisseaux avant qu'ils se retournent pour inverser la direction de la poussée et donc décélérer pour arriver au but en douceur. Compte tenu de l'impulsion spécifique très élevée des moteurs (2.10^6 s), les vaisseaux atteignent, à mi-course, la vitesse phénoménale de 16000 km/s, soit 5% de la celle de la lumière.

Les moyens de propulsion: moteurs et ergols. Sans rentrer dans les détails, la masse totale d'un vaisseau au départ est un peu supérieure à 300 kT dont 250 kT d'ergols (deutérium et lithium 6).

Faute de temps, je ne reviendrai pas sur notre préoccupation première, ce qu'on appelle les "RAMS"ⁱⁱⁱ. Le sujet mérite une présentation spécifique, tant il est vaste et difficile. Mais notre démarche en est imprégnée. Je ne vous entretiendrai pas sur les dangers de cette aventure. Un voyage de plus d'un siècle à bord de machines qui ne peuvent pas être sans failles, une destination qui est tout sauf familière. Des

⁶⁸ Dans la mythologie grecque, Deukaliôn (ou Deucalion) est le fils du Titan Prométhée.

⁶⁹ 22^{ème} comète identifiée au cours de la 2^{ème} quinzaine (B) de janvier 2178. Il s'agit d'une comète cyclique (C)

dangers inconnus que les sondes n'ont pas détectés. Il faudra sérieusement sélectionner nos ambassadeurs. Ce n'est plus le berceau de Tsiolkovski qu'ils quitteront, mais bel et bien leurs amis, leur famille et leur patrie. Amen.

Finale

Mesdames et Messieurs les Délégués, j'espère vous avoir intéressé. Je n'ai pas voulu vous assommer de chiffres et n'ai pas évoqué nombre de points techniques importants tels que le pilotage et le guidage des vaisseaux, les moyens et procédés de construction et la mise en œuvre finale. Le dossier complet est à la disposition de vos experts. J'en suis restée aux principes généraux mais vous avez compris que ce projet fantastique nous passionne. Nous y mettons toute notre âme, au moins autant que nos compétences et nourrissons le ferme espoir qu'il se réalise et que nous en serons d'importants acteurs.

Je vous remercie de votre attention.

Standing ovation

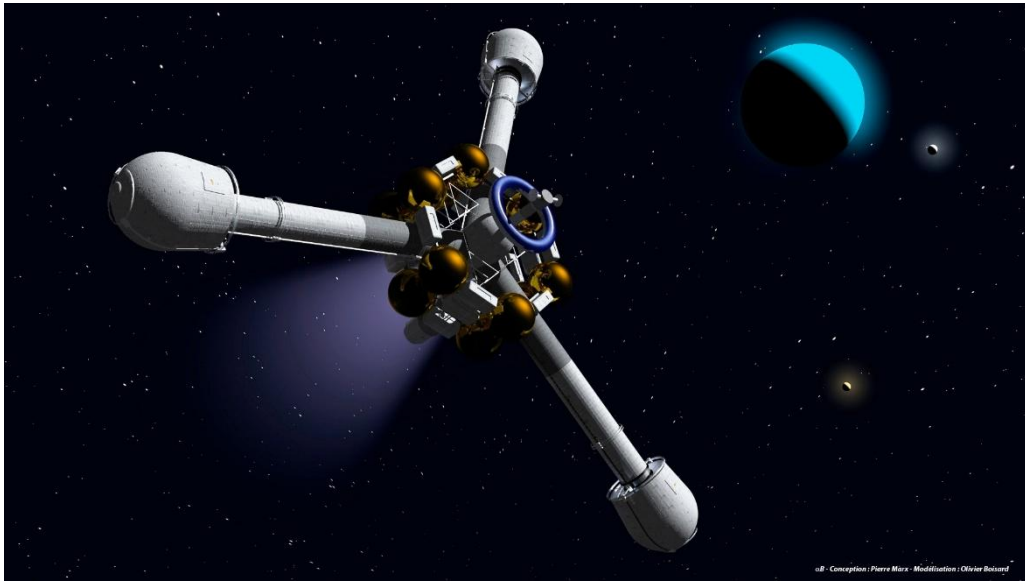
Alors, dans un tonnerre d'applaudissements, l'assemblée, délégués compris, se leva comme un seul homme avant que monte le puissant chant des conquérants que toute la salle entonna.

Sur l'air de la Brabançonne:

Après un siècle de voyage,
Ces hommes à bord de leurs vaisseaux
Récompensés de leur courage
Planteront là-bas notre drapeau.
Et d'une main souveraine et fière,
Ce nouveau peuple de pionniers,
Gravera sur la vieille bannière :
La Foi, la Loi, la Liberté ! (ter)

Lorsque le brouhaha eut cessé et le silence revenu, le président du jury remercia chaleureusement la conférencière ajoutant tout de même, en quelques mots habilement choisis, que l'affaire n'était pas gagnée.

S'ensuivit une assez longue péroraison du Haut Commissaire du Gouvernement de KSC qui, après quelques envolées lyriques pour cette sidérale aventure, retrouva la langue de bois qui lui était familière pour exalter la coopération entre les archipels. Il poursuivit en détaillant les multiples retombées socio-économiques du projet et remercia obséquieusement l'Administration Centrale pour sa promesse de soutien financier. Les applaudissements circonstanciés qui suivirent réveillèrent, juste avant le cocktail, quelques délégués qui s'étaient assoupis.



Vaisseau interstellaire αB . Conception: Pierre Marx. Modélisation: Olivier Boisard

Chapitre 3 - Point de vue ⁷⁰

La Science appartient à ceux qui s'interrogent ⁷¹

Hommage

"Le renouvellement de la science est au prix de la liberté de chaque chercheur d'innover et de frayer sa propre voie : j'entends innover vraiment, et non pas progresser brillamment dans une voie reconnue." Georges Lochak

C'est à Georges Lochak (†), proche collaborateur de Louis de Broglie puis Président de la Fondation éponyme (FLdB) ⁷², que je dois d'avoir été publié dans ses Annales. Lorsque j'ai soumis mon 1^{er} article à la fondation, en 2008, j'ai essuyé deux refus du (ou des) *referee(s)*, le premier sur le fond, le second sur la forme. A ma 3^{ème} tentative, il l'a découvert par hasard et décidé de l'accepter sans nouvelle relecture. C'est l'occasion pour moi de lui rendre hommage.

Nota: N'étant pas un chercheur professionnel, je ne savais pas à qui m'adresser. C'est Alexandre Szames qui m'a orienté vers la Fondation Louis de Broglie. Je l'en remercie.

1. Un aspect de la recherche aujourd'hui

"Il y a chez les dirigeants politiques l'idée que le but de la recherche serait forcément de faire de l'innovation derrière. L'idée d'une recherche libre, gratuite, purement spéculative, exploratoire, est de moins en moins en odeur de sainteté."

Dixit Emanuel Bertrand, physicien et historien des sciences à l'École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la ville de Paris (ESPCI).

1.1 Situation de la physique fondamentale

Elle est basée sur deux corpus théoriques, nés au début du XX^e siècle :

- la relativité générale d'Einstein (RG) qui s'applique à "l'infiniment grand". En gros, l'astrophysique et la cosmologie.
- la mécanique quantique de Bohr, Planck, Schrödinger, de Broglie et d'autres (MQ) qui rend compte de "l'infiniment petit": en gros, le bestiaire des particules et des champs de force.

Ces deux théories ont tellement permis, à la fois de comprendre notre univers et d'engendrer nombre de révolutions technologiques, que remettre l'une ou l'autre en cause est plus que téméraire.

⁷⁰ Ce qui suit est une adaptation d'un texte déjà publié.

⁷¹ Invitation à des conférences de l'Université Paris Cité (UPC) le 7 octobre 2025

⁷² Voir, sur le site de la Fondation, le numéro spécial des Annales en sa mémoire (vol.47 n°1-2022).

Cela étant, elles s'avèrent inconciliables malgré des décennies d'efforts d'une cohorte de physiciens. Derniers avatars : la théorie des cordes et la gravité quantique à boucles sans parler de nombreuses autres tentatives. La "Théorie du Tout" n'a pas encore trouvé son Einstein. Dans 100 ans peut-être, m'avait dit Georges Lochak (voir plus loin).

De nombreuses équipes se consacrent à la physique fondamentale, théorique et expérimentale, notamment en France (voir la liste des labos de l'IN2P3). Un des objectifs est d'intégrer le champ de gravitation dans la famille des trois interactions fondamentales: EM, faible et forte⁷³.

Pour le fun

La Relativité Générale d'Einstein est basée sur le principe d'équivalence Ne pas confondre avec celui de la pataphysique. Citons Boris Vian, ORTF, Les grandes revues littéraires, 25 mai 1959: *"Un des principes fondamentaux de la Pataphysique est celui de l'Équivalence. C'est peut-être ce qui vous explique ce refus que nous manifestons de ce qui est sérieux et de ce qui ne l'est pas, puisque pour nous c'est exactement la même chose"*.

1.2 Statut des chercheurs "indépendants"

Sans parler des gourous, complotistes, charlatans et illuminés de tout poil, les chercheurs dits "indépendants", c'est-à-dire non professionnels, sont ostracisés (ce qui n'a pas toujours été le cas) et ce, pour plusieurs raisons :

- Ils ne sont pas forcément titulaires d'un doctorat d'Etat, viatique quasi-obligatoire pour intégrer la communauté scientifique.
- Ils ne bénéficient pas de l'environnement scientifique indispensable au bien-fondé et à la bonne conduite de leurs travaux (confrontation avec les pairs au sein d'une équipe, à l'occasion des colloques, dans le cadre de partenariats,...).
- Ils proposent la plupart du temps des théories farfelues dont certaines remettent en cause celles bien établies car largement validées et appliquées, notamment la RG et la MQ. De ce fait, ils signent eux-mêmes leur arrêt de mort.
- Sans le label d'un organisme officiel, l'accès aux revues à comité de lecture (seul critère de valeur) leur est très difficile car coûteux et risqué (revues en "free access", voire prédatrices où il faut payer cher pour être publié).

Le problème est qu'il y a très peu de moutons blancs dans ce troupeau noir et donc qu'ils paient pour les autres. Tout cela est parfaitement décrit dans l'ouvrage d'Alexandre Moatti "Alterscience - postures, dogmes, idéologies" (Odile Jacob, janvier 2013).

Cela étant, la communauté scientifique n'est pas toujours vertueuse en raison même de son mode de fonctionnement. La course à la publication⁷⁴ pour être reconnu et financé (publish or perish) engendre nombre d'articles sans réel intérêt scientifique, sans parler de négligences, voire de fraudes (plagiat, manipulation de données, preuves fictives).

⁷³ La situation ressemble un peu à celle de la fin du XIX^e siècle où s'opposaient l'électromagnétisme de Maxwell et la mécanique newtonienne. La crise a éclaté avec l'expérience de Michelson-Morley, à la base de la relativité restreinte (constance de la vitesse de la lumière).

⁷⁴ D'après la base de données de l'Unesco, le nombre de chercheurs dans le monde atteignait 9 millions en 2017 et augmenterait de 300 000 / an. Il y a eu 2,8 millions d'articles scientifiques en 2022.

L'intégrité scientifique : dernier refuge de la vérité ?

Près de 2 % des chercheurs interrogés admettent avoir fraudé au moins une fois, 34% avoir eu des pratiques douteuses au moins une fois, 14 % répondent avoir connaissance de fraudes et 72 %, de pratiques douteuses.

L'intégrité scientifique en est arrivée au point que sa surveillance mérite désormais d'être institutionnalisée. Il arrive même que des scientifiques illustres, jouant de leur réputation, se perdent dans des marottes indéfendables. Ainsi l'impact considérable du déni du changement climatique de Claude Allègre (†), éminent géochimiste puis ministre de la recherche.

sources:

- Wikipedia
- l'article de Sophie Roux "Intégrité, éthos scientifique, fraudes et négligences" (L'Archicube , 2015, 19, pp.52-70. Ffhal - 02461581f).
- l'interview de Stéphanie Ruphy "Sans intégrité, pas de science" (La Recherche, octobre / décembre 2025)
- "Les ratés de la Science" de Bruno Léandri (Ed. du Trésor, 2022).
- l'article du journal Le Monde (supplément "Science et Médecine" du 15 janvier 2025) intitulé "Chasse aux fraudes scientifiques".

1.3 Mon cas personnel : Contrôle local de la gravitation - Mythe ou perspective ?

"Si une idée ne semble pas bizarre, il n'y a rien à espérer d'elle."

Niels Bohr, un des fondateurs de la mécanique quantique, 1922

Je suis "ingénieur des fusées" comme Georges Lochak m'avait baptisé. Au cours de ma carrière, principalement au CNES (en partie sur Ariane), j'ai vécu nombre de lancements. J'ai aussi dirigé l'avant-projet et le dossier de programme d'Ariane 5. Mais tout cela ne fait pas un chercheur, au contraire...

Mais, bien que tombé dans la marmite à l'adolescence, j'ai fini par me convaincre que la propulsion chimique n'est pas l'avenir à long terme du transport spatial au départ de la Terre ⁷⁵ Malheureusement, il n'y a pas d'alternative crédible pour sortir de son puits gravitationnel (voir chap. 1, § 2.3). C'est pourquoi j'imagine qu'on saura un jour contrôler localement la gravitation. On ne rit pas, SVP. On a le droit de rêver.

En 1990, j'ai acheté la "Théorie des Champs" de Landau et Lifchitz (éditions MIR, Moscou 1970), remarquable ouvrage didactique, et ai passé 2 ans à étudier la RG. A un endroit, j'y ai trouvé ce qui m'a paru être un tour de passe-passe et à un autre, une note de bas de page qui m'a paru discutable. Donc deux pistes à explorer. Encore le droit de rêver et très probablement de se tromper ! Dur, dur de douter de Lev Landau (†), physicien surdoué et prix Nobel 1962.

⁷⁵ Une fois en orbite, les poussées nécessaires pour en changer peuvent être faibles, ce qui est le cas de la propulsion ionique, désormais largement utilisée.

Je passe sur le parcours chaotique et solitaire qui a suivi pour aboutir en 2009 à un article que Georges Lochak a accepté de publier (voir ci-dessus). J'ai l'outrecuidance de penser qu'il est fondateur dans la mesure où, semble-t-il, personne n'a traité le sujet, ce qui d'ailleurs ne laisse pas de m'étonner ⁷⁶. Par la suite, j'ai publié un deuxième article en 2020, toujours dans les annales de la FLdB, application du premier où apparaît la possibilité d'une gravitation répulsive ⁷⁷.

Références

Sur le site de la Fondation Louis de Broglie (en français) :

- Marx, P. (2009). Effets gravitationnels des champs électromagnétiques intenses. *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, vol. 34(1).
- Marx, P. (2020). Bosses du champ électromagnétique - Modèles électro-gravitationnels de l'électron classique et de l'énergie noire. *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, vol. 45(1).

Sur arXiv.org (en anglais)

- 1^{er} article: <http://arxiv.org/abs/2312.14940>
- 2^{ème} article: <https://arxiv.org/abs/2312.05263>

Voici, résumée en quelques lignes, la thèse que je propose :

- Les équations de Maxwell du 2^{ème} groupe qui régissent le champ EM ignorent le fait que, selon la RG, toute forme d'énergie et donc l'énergie EM, crée un champ de gravitation. De ce fait, elles sont linéaires quelle que soit l'intensité du champ, ce qui n'a pas de sens physique ⁷⁸.
- Or elles n'ont jamais été mises en défaut, même avec des champs EM très élevés, lesquels, de toute manière, engendrent des niveaux de gravitation totalement négligeables.
- Mon hypothèse est qu'il faut des champs sans commune mesure avec ceux qu'on sait produire ou observer. Sur cette base, la métrique du 4-espace doit être fonction du quadri-potentiel EM ⁷⁹, d'où création d'un champ de gravitation. Mais sa norme est commensurable avec le potentiel de Planck, soit $\sim 10^{27}$ volt !
- Appliqué au cas du potentiel électrostatique à symétrie centrale, le champ de gravitation est répulsif au voisinage du centre puis s'annule pour devenir attractif et tendre vers la loi de Newton à grande distance.

⁷⁶ Il me semble que ça aurait pu être fait à l'époque d'Einstein comme ça été le cas, par exemple, pour les trous noirs, découverts beaucoup plus tard. Mais je n'ai trouvé aucune trace du sujet. On m'a signalé l'existence de la théorie EIH (Einstein-Infeld-Hoffmann) mais je ne vois pas le rapport avec mon sujet.

⁷⁷ Dans mon article de 2009, j'avais déjà une telle possibilité avec une onde de grande amplitude mais je ne m'en étais pas aperçu.

⁷⁸ La linéarité des équations qui gouvernent un phénomène physique n'est valable que pour les faibles amplitudes des grandeurs en jeu. C'est le cas, par exemple, des ondes gravitationnelles. En raison de leur très faible amplitude, l'équation associée s'obtient en linéarisant les équations d'Einstein.

⁷⁹ Variable de position dans l'espace de configuration. Le champ qui en dérive est la variable de vitesse.

- Ce résultat suppose l'existence d'une limite à la valeur du potentiel, limite que je propose être le potentiel de Planck. Ainsi, le potentiel EM devient une vraie grandeur physique et sa norme n'est plus arbitraire. On notera que c'est le cas en MQ avec l'effet Aharonov-Bohm ⁸⁰. La seule proposition nouvelle est qu'il a une valeur limite comme c'est le cas pour la lumière. Toutefois, cela remet peut-être en cause "l'invariance de jauge" et la conservation de la charge, difficulté que je ne sous-estime pas.
- Il faudrait étendre à d'autres cas, notamment celui d'un fil supraconducteur rectiligne traversé par un courant électrique extrêmement élevé. Mais il me faudrait de l'aide (je suis trop âgé).

Je précise que je n'applique que des méthodes classiques :

- à la base, le formalisme lagrangien dans l'espace de configuration du champ EM pour les équations de Maxwell (1er article),
- la métrique de Reissner-Nordström pour celles d'Einstein dans le cas simple (purement théorique) d'un potentiel électrostatique à symétrie centrale (2^{ème} article).

Plus généralement, quitte à être ridiculisé ou simplement snobé (le terrain est glissant), je pense que:

- la gravitation n'est pas un champ à proprement parler ⁸¹ mais la manifestation de la non-linéarité des équations qui régissent les autres champs (ce que je propose pour le champ EM). En réalité, Newton et Einstein ont décrit la gravitation comme créée par la masse d'un corps céleste mais sans en donner la cause.
- les particules sont des "bosses" de ces champs, résultant de leur non-linéarité (voir le § 6 de mon 2^{ème} article). Il s'ensuit qu'elles sont créées par la gravitation et non l'inverse. Ainsi, devrait-on pouvoir concilier MQ et RG.
- la masse n'est pas une grandeur indépendante d'autres formes d'énergie mais n'en est que la somme.
- on devrait réhabiliter le concept d'éther mais pas celui, mécanique, d'avant la relativité mais plutôt celui du type "quintessence" où une forme d'énergie dite "sombre" ou "noire", est supposée remplir tout l'univers et provoquer son expansion accélérée.
- la MQ est une théorie de la mesure. Il existe peut-être une réalité sous-jacente qui "expliquerait", entre autres, la dualité onde-corpuscule. Par exemple, les photons seraient créés lors d'interactions avec d'autres particules. Seule l'onde existerait à l'état libre. La théorie de De Broglie-Bohm en est un exemple mais, suite aux expériences d'Alain Aspect (prix Nobel 2022), le débat semble définitivement tranché en sa défaveur.

⁸⁰ L'effet Aharonov-Bohm est un phénomène quantique décrit en 1949 par Werner Ehrenberg et Raymond Eldred Siday.

⁸¹ Notamment parce qu'on peut l'annuler localement par un changement de coordonnées.

- cela dit, je ne suis pas compétent pour en parler. Mais tout de même, ce qui est bizarre ⁸², c'est que la MQ a besoin de concepts classiques (énergie et quantité de mouvement) pour se fonder, lesquels concepts s'en déduisent en passant aux limites.

L'énergie noire ou la possibilité d'un graviton

Dans mon 2^{ème} article, j'ai proposé, moyennant quelques précautions de langage, que l'énergie sombre soit celle d'un plasma électriquement neutre constitué de particules de charges $\pm e$ et de masse choisie pour que leur distance moyenne soit dans la zone de gravité répulsive de chacune d'entre elles. Compte tenu de la densité de l'énergie sombre, cette masse doit être extrêmement faible ($< 10^{-5}$ eV) devant celle de l'électron et ne correspond apparemment à aucune particule connue.

Par ailleurs, le champ de gravitation engendré par ces particules ne dépend pas du signe de leur charge de sorte que si on place au même endroit deux de ces charges au signe opposé, le champ de gravitation créé est le double alors que la particule résultante est neutre. Or, le champ de gravitation considéré dans mon article est celui créé par une particule par hypothèse électriquement chargée.

Pour lever cette contradiction, je propose que, plutôt que de mettre les deux charges au même point (ce qui, d'ailleurs n'a pas de sens physique), elles constituent un dipôle d'une très petite longueur devant les dimensions de l'espace que jalonne le champ de gravitation qui l'entoure. On rejoint là la représentation des particules par de minuscules "cordes", à la base de la théorie éponyme.

Cette particule hypothétique pourrait-elle prétendre au nom de graviton ? le Belphégor des théories quantiques ? Mais celles-ci partent du principe que les gravitons doivent toujours mener à une interaction attractive. Alors, quels autres candidats ? Peut-être les neutrinos, particules stables de masses très faibles mais non nulles. La masse de notre graviton est supposée $< 10^{-5}$ masse de l'électron, soit $< 5 \text{ eV}/c^2$ ⁸³, condition respectée par les neutrinos, notamment le neutrino électronique $\nu_e < 0,086 \text{ eV}/c^2$. Mais tout cela est spéculatif et n'a peut-être aucun sens.

⁸² "Si un jour vous rencontrez quelqu'un qui prétend avoir compris la théorie quantique, vous serez face au plus grand des menteurs car personne n'y a jamais rien compris". Richard Feynman (1918-1988), éminent et célèbre physicien américain, prix Nobel 1965.

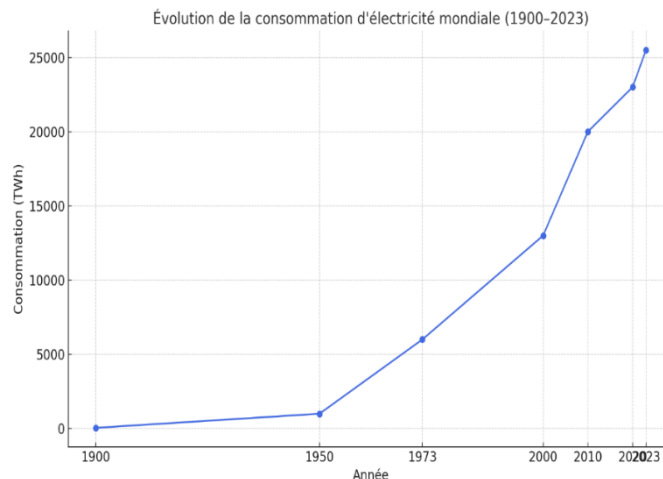
⁸³ Unité de masse utilisée en physique des particules: $\frac{\text{eV}}{c^2} \sim \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb} * 1 \text{ Volt}}{(3 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2} \sim 0,178 \cdot 10^{-35} \text{ kg}$

La consommation mondiale d'énergie électrique ne cesse de croître et ce, de manière exponentielle. On peut penser que ça ne va pas s'arrêter et qu'un jour on saura produire des densités d'énergie EM suffisamment élevées pour engendrer dans leur alentour un champ de gravitation mesurable.

L'énergie électrique

La consommation mondiale devrait doubler d'ici 2050 (jusqu'à 50000 TWh/an), due notamment à :

- l'électrification des transports (véhicules électriques).
- le chauffage électrique (pompes à chaleur).
- l'intelligence artificielle, les data centers et la digitalisation.
- la transition vers une production bas-carbone (solaire, éolien, nucléaire)



Il y a beaucoup de chemin à faire pour produire des densités de courant susceptibles d'engendrer un champ de gravitation appréciable mais cela ne me paraît pas impossible. Notamment, on est encore loin des possibilités que pourraient offrir la fusion nucléaire ou la supraconductivité. L'avenir le dira.

Mais mon vrai problème est comment valider ma théorie. Peut-être avec les magnétars (champ magnétique $> 10^{11}$ Tesla) récemment découverts. Peut-être aussi avec la supraconductivité ou la fusion contrôlée. En leur temps, les expériences d'Eugène Podkletnov⁸⁴ m'avaient impressionné mais il semble que personne n'a pu les reproduire⁸⁵. Quant aux bizarreries de la foudre, Raymond Piccoli, directeur du laboratoire de recherche du CNRS sur la foudre, a semblé intéressé mais n'a pas donné suite.

Pour finir, je souhaiterais rencontrer un physicien qui accepterait de prendre le temps de lire ma prose (les ténors sont très occupés et les thésards ont le nez dans le guidon) et de me dire ce qu'il en pense. Ça été le cas de Georges Lochak pour mon 1^{er} article et du *referee* pour le 2^{ème} mais je reste sur ma faim, n'ayant été contacté que par quelques revues ou organisateurs de colloques dont, renseignements pris, j'ai préféré me méfier.

⁸⁴ Voir article dans Wikipedia.

⁸⁵ Il m'arrive de penser qu'on s'y est peut-être mal pris. Il se peut, toutefois, que ce chimiste russe de renom ait confondu variation de la gravité et lévitation magnétique. Suite à cette affaire, il fût renvoyé de l'université finlandaise de Tampere où il menait ses recherches.

Chapitre 4 - Perspectives ou Prospective ?

Avertissement

Bien que ne fréquentant plus beaucoup les bistrots, j'ai gardé un faible pour les brèves de comptoir les plus éculées et les vérités premières les plus définitives, entendues entre deux arrivées du tiercé.

1. Ici-bas et en ce moment, seule la Terre tourne rond

Nous vivons un début de siècle où les certitudes des bienfaits que devait apporter la mondialisation s'avèrent quelque peu optimistes. Ses présupposés : une croissance sans fin, l'éradication de la misère, la fin des guerres, etc. ne sont pas vraiment au rendez-vous.

Les causes principales en sont, de mon point de vue, l'insuffisance d'une régulation socio-économique globale (*i.e.* acceptable et pratiquée partout, ce qui est évidemment utopique), l'augmentation de l'intensité et de la fréquence des catastrophes naturelles (changement climatique) et la réalité de la nature humaine, capable de tous les excès.

S'ajoute, dans le même temps, une très forte accélération de la high tech, notamment dans le numérique, bouleversant les modes de vie, justifiant cette phrase prémonitoire d'Alvin et Heidi Toffler ⁸⁶ *"le choc du futur est le stress et la désorientation provoqués chez les individus auxquels on fait vivre trop de changements dans un trop petit intervalle de temps"*.



Bvd Montmartre à Paris vers 1910 où cohabitent les chevaux et les premières voitures ⁸⁷

⁸⁶ Alvin Toffler (1928 – 2016) était un écrivain, sociologue et un des futurologues les plus célèbres de son temps. Il était marié à Heidi Toffler, également écrivaine et futurologue, avec qui il a co-écrit plusieurs de ses ouvrages (source Wikipedia).

⁸⁷ Source "Les archives du Figaro".

Mais tout n'est pas noir. A l'opposé de la sinistrose entretenue par les media, il y a beaucoup de raisons d'espérer, notamment en la jeunesse. Ca va sans dire mais ça va mieux en le disant ⁸⁸.

2. D'où venons-nous ? Que sommes-nous ? Où allons-nous ?

Titre d'une célèbre peinture de Paul Gauguin réalisée à Tahiti en 1897-1898 et exposée à "The Museum of Fine Arts" de Boston



D'où venons-nous ?

Selon les anthropologues, la première espèce humaine "homo habilis" apparaît en Afrique de l'Est, il y a 2,5 millions d'années. Cette espèce a disparu comme plusieurs autres qui ont suivi. Seule "homo sapiens" dont fait partie votre serviteur existe encore, probablement parce qu'entre autres, elle a compensé sa faiblesse physique par l'intelligence de certains (pas tous) et le développement du langage, l'union faisant la force.

Beaucoup plus proches de nous (à partir de 4000 ans avant J.C.) ⁸⁹ sont apparues les grandes civilisations, synonymes de sociétés organisées, hiérarchisées et dominantes. J'ai lu quelque part que, sans leurs esclaves, les Grecs aurait peut-être développé la société technologique d'aujourd'hui. Dans ce cas, le changement climatique aurait commencé avec eux et nous ne serions peut-être pas là pour en parler !

Quant à moi, atome d'espace-temps, je me souviens de deux flashes : le premier dans la forêt vierge guyanaise, l'impression d'y avoir vécu il y a très longtemps et le second du haut d'une des 7 collines qui dominant Rome, le sentiment confus que la ville éternelle avait abrité mon berceau.

⁸⁸ "Si cela va sans le dire, cela ira encore mieux en le disant." Talleyrand (1754-1838), au Congrès de Vienne, octobre 1814

⁸⁹ La notion de civilisation est définie par l'utilisation de l'écriture et l'existence de cités dotées d'une architecture monumentale. Plusieurs civilisations se sont développées de manière indépendante. Celles de Mésopotamie et d'Égypte sont les plus anciennes (source Wikipedia).

Que sommes-nous ?

"Ni ange ni bête". Je n'ai pas lu le roman d'André Maurois mais son titre me paraît tout résumer :

- D'une part, une branche des primates avec ses contingences, d'autre part un être spirituel, sans cesse en questionnement ⁹⁰.
- Capable du pire comme du meilleur vis-à-vis de la nature comme de ses congénères.

Je ne vais surtout pas chercher à singer la multitude des grands esprits qui ont traité le sujet ni évoquer nombre des preuves qui jalonnent son histoire. Parmi elles, l'extraordinaire est que "le primate a marché sur la Lune" ⁹¹. Mais c'est juste mon point de vue.

Où allons-nous ?

Je rejoins ceux qui pensent qu'une nouvelle civilisation est en gestation. Quelle sera-t-elle ? Ayant fait un peu de prospective (dans mon domaine), j'ai appris plusieurs choses :

- On ne peut déceler d'avenirs (noter le pluriel) sans connaître l'histoire. On les imagine en effet en extrapolant les grandes tendances et pas seulement (et surtout pas) à partir des situations du moment.
- Des variantes sont possibles en introduisant des ruptures technologiques et / ou sociétales. Encore faut-il pouvoir les identifier en tant qu'enjeux et les considérer comme suffisamment vraisemblables et déterminantes.
- Le court terme (5 ans) est relativement prévisible. Le moyen terme (5 – 10 ans) est hasardeux. Le long terme (10 et au-delà) est purement spéculatif.

La prospective est un métier. C'est notamment l'importante activité du CNRS sur le sujet. Voir aussi le centre de réflexion "Futuribles International" ⁹². Il m'arrive toutefois de douter de l'intérêt d'une prospective méthodique, raisonnée et étayée comparée aux certitudes indiscutables qu'apportent la boule de cristal, le marc de café ou l'éviscération de poulets. Sans oublier notre regrettée Madame Soleil ⁹³.

⁹⁰ "L'homme est un mystère; je m'occupe de ce mystère car je veux être un homme" (Dostoïevski).

⁹¹ "C'est un petit pas pour un homme, un bond de géant pour l'humanité." Neil Armstrong, le 1^{er} homme qui a marché sur la Lune le 20 juillet 1969.

⁹² Fondé en 1960 par Bertrand de Jouvenel. À partir de 1975, il édite la revue *Futuribles*, bimestrielle francophone sur le thème de la prospective (voir son site).

⁹³ Germaine Lucie Soleil (1913 / 1996), Parigote pur jus et astrologue française hyper célèbre au point qu'il se disait couramment "Je ne suis pas Mme Soleil". Même l'ancien Président Georges Pompidou l'a dit !

3. Pauvre planète

"Dans la vie, rien n'est à craindre, tout est à comprendre"

Marie Curie

A en croire les Cassandre, son avenir est plutôt sombre. Nombreux sont ceux qui nous prédisent une catastrophe planétaire mettant en jeu jusqu'à la survie de l'humanité. Par exemple :

3.1 Un astéroïde géant

Genre extinction des dinosaures ⁹⁴. Au-delà d'un diamètre d'un kilomètre, l'impact peut avoir des répercussions planétaires. Toutefois, sa probabilité est extrêmement faible et on progresse dans les moyens de les détecter et de s'en protéger (déviation, fragmentation).

Depuis la fin des années 90, cette menace est prise en compte, en particulier par la NASA et l'ESA qui ont mis en place un programme de défense planétaire.



La mission DART de la NASA ("**D**ouble **A**steroid **R**edirection **T**est" ou test de déviation d'un astéroïde double), lancée fin 2021, est la première à expérimenter une méthode de déviation d'un astéroïde géocroiseur par impact cinétique (vue d'artiste de l'engin spatial en approche de l'astéroïde sur lequel il va s'écraser).

⁹⁴ Il y a 66 millions d'années, un événement extrêmement brutal, à dimension planétaire, a provoqué l'extinction d'un grand nombre d'espèces animales dont les dinosaures. L'hypothèse la plus vraisemblable est la chute d'un astéroïde de 10 à 80 km. de diamètre à Chicxulub Puerto dans la péninsule du Yucatán au Mexique.



Représentation d'artiste d'un astéroïde tombant sur la Terre
(voir l'article "Impact cosmique" de Wikipedia)

3.2 L'hiver nucléaire

Il y a, dans le monde, près de 10000 ogives nucléaires prêtes à l'emploi et déployées dont environ 85 % détenues par la Russie et les États-Unis ⁹⁵. 7 autres pays en disposent : Chine, France, Royaume-Uni, Israël, Inde, Pakistan et Corée du Nord.

La doctrine de la dissuasion veut que le premier qui s'en sert est le second qui en meurt. Qui donc prendra le risque d'être le premier ⁹⁶ ?

On notera en passant que la chute d'un astéroïde géant et "l'hiver nucléaire" refroidissent l'atmosphère en raison de son obscurcissement par les poussières engendrées et bloquant la lumière du soleil. A quelque chose malheur est bon ! Ce faisant, opacifier l'atmosphère est proposée par quelques apprentis-sorcières partisans de ce qu'on appelle la géo-ingénierie ⁹⁷.

3.3 Le(s) changement(s) climatique(s)

Je suis très étonné qu'il existe encore des climato-sceptiques et non des moindres, vu les fléaux de plus en plus violents et fréquents qui se produisent partout dans le monde. D'autant que le GIEC ⁹⁸, en qui on doit avoir confiance, n'est pas là pour enfile des perles.

⁹⁵ Selon l'Institut international de recherche sur la paix de Stockholm (SIRI).

⁹⁶ Il existe toutefois des bombes nucléaires de petite taille dites "bombes tactiques" destinées à ravager un territoire limité, champ de bataille notamment.

⁹⁷ La géo-ingénierie est l'ensemble des techniques qui visent à manipuler et modifier le climat et l'environnement de la Terre.

Le GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat)

est un organisme intergouvernemental chargé d'évaluer l'ampleur, les causes et les conséquences du changement climatique en cours.

Créé en 1988 sous l'égide de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et du Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE), le GIEC est ouvert à tous les pays membres de l'Organisation des Nations unies. Il regroupe 195 États.

Les évaluations du GIEC sont fondées sur les publications scientifiques et techniques dont le GIEC opère une synthèse critique. Le rapport d'évaluation le plus récent a été publié en 2023 (source Wikipedia).

Il y a deux catégories de climato-sceptiques:

- Ceux qui nient son existence malgré l'évidence. C'est aujourd'hui malheureusement le cas au plus haut niveau puisque le Président des USA s'est affranchi de l'accord de Paris (COP 21 de 2015). Sans parler des positions de Claude Allègre (†) (voir chap. 3 - § 1.2).
- Ceux qui l'admettent mais nient que l'homme en est la cause ⁹⁹ ou qu'il n'est pas le seul coupable. Personnellement, je fais partie de ceux qui pensent que l'homme a allumé l'incendie mais qui doutent qu'il puisse l'éteindre, en tout cas dans le siècle, ce qui ne veut pas dire qu'il ne faut rien faire. Au contraire, un objectif ambitieux est indispensable si l'on veut limiter les dégâts. Malheureusement, les promesses faites lors des COP ne sont pas toujours tenues.

Les COP (Conférence Of Parties)

sont des réunions entre les pays signataires de la Convention Climat de l'ONU, de son nom complet la "Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques" (CCNUCC).

La première COP s'est tenue à Berlin en 1995.

Il y a 3 types de COP :

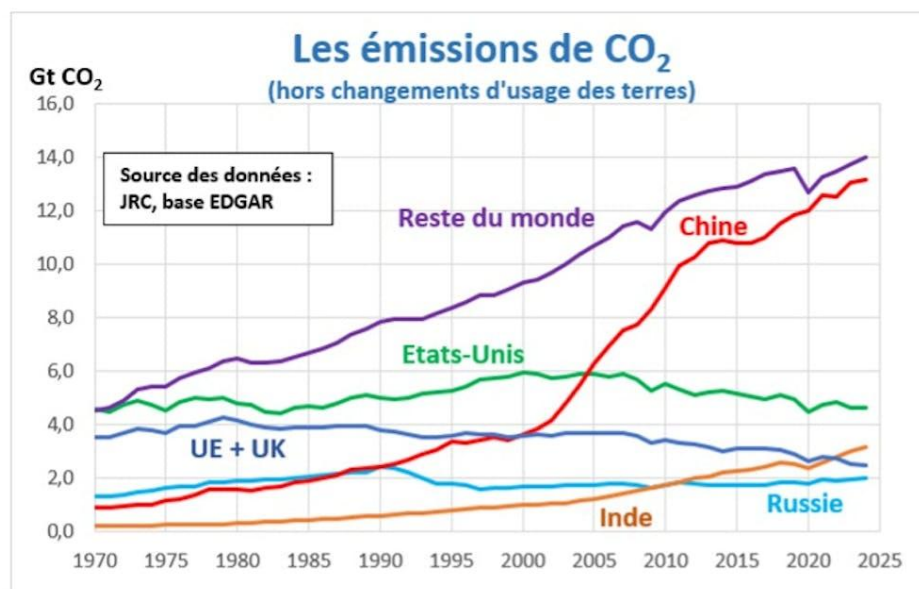
- sur la biodiversité, tous les deux ans,
- sur la lutte contre la désertification, tous les deux ans,
- sur les changements climatiques, la plus importante des trois et tous les ans.

La limite des 1,5° du réchauffement fixée par l'accord de Paris n'est déjà plus atteignable. On parle maintenant de 2,5° C mais, pour le moment, rien n'indique qu'on y parviendra. Il y a certes des efforts importants : politiques, industriels, financiers ainsi qu'une prise de conscience progressive des opinions publiques mais tout cela est pour l'instant insuffisant.

⁹⁹ Cette période est quelquefois dénommée "anthropocène", nouvelle époque géologique qui se caractérise par l'avènement des hommes comme principale force de changement sur Terre, surpassant les forces géophysiques.



Le pont de la Rivière Saint-Étienne détruit peu après le cyclone tropical Gamède, le 25 février 2007, est un exemple de ce qui nous attend : lors de vacances à La Réunion, j'ai vu ce pont effondré et je ne sais pourquoi, j'ai eu le sentiment qu'il en serait de même un jour pour beaucoup de voies de circulation, notamment les autoroutes et les ouvrages qu'ils comportent. Liaison vitale entre le nord et le sud de l'île, il a bien sûr été reconstruit (merci la France) mais sera-ce le cas en 2100 s'il n'y a plus de véhicules routiers, ni d'ailleurs plus de véhicules terrestres du tout ?

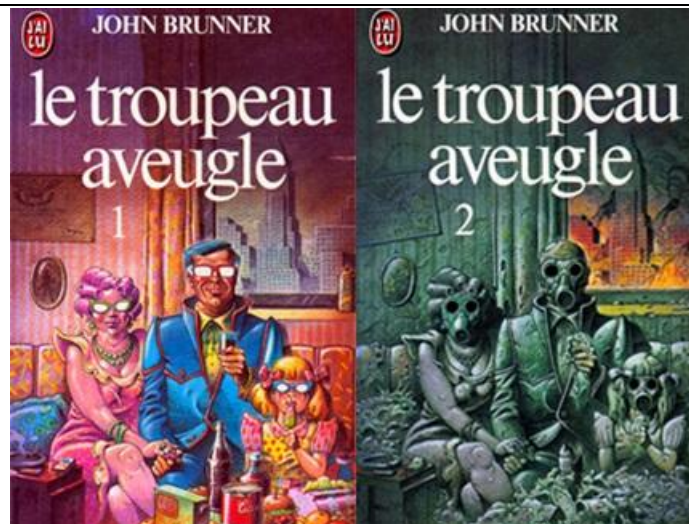


Tiré de l'article "Dix ans après, quel bilan pour l'accord de Paris ?" de [Christian de Perthuis](#), publié le 2 novembre 2025 dans "The Conversation" ¹⁰⁰.

3.4 Une pollution généralisée

destructrice des écosystèmes et de la biodiversité et donc de nous-mêmes ! A ce propos, qui connaît l'écrivain de SF John Brunner (1934) – 1995) ? Sur le sujet, "Le troupeau aveugle" est pourtant prémonitoire.

¹⁰⁰ [Christian de Perthuis](#) est Professeur d'économie, fondateur de la chaire « Économie du climat », Université Paris Dauphine – PSL



Le Troupeau aveugle (titre original : The Sheep Look Up) est un roman de science-fiction de l'écrivain britannique John Brunner paru en 1972. Le roman se déroule à la fin du XX^e siècle. La pollution chimique est telle que la Méditerranée est un cloaque pestilentiel. Certains jours, à New York, il pleut de l'acide et l'eau du robinet n'est pas potable, tout le monde ou presque souffre d'allergies ou d'intolérances, les microbes résistent aux antibiotiques et la vermine aux insecticides, la nourriture est rare et altérée par des pesticides et l'espérance de vie décroît régulièrement.

3.5 Des pandémies immaîtrisables

dues, par exemple, à l'usage volontaire ou accidentel d'armes biologiques (bactériologiques ou virologiques). Elles sont considérées comme armes de destruction massive et, en principe, interdites.

3.6 Des guerres généralisées et incessantes

Conflits frontaliers, nationalismes exacerbés, flux migratoires hors contrôle, etc.

Mais ces trois dernières calamités ne seront que des conséquences du vrai défi qu'est le changement climatique.

A cela s'ajoute l'avenir difficilement lisible auquel la science et les technologies qui en dérivent peuvent nous conduire, entre autres, à transformer l'homme et la société, voire à leur extinction au profit d'une nouvelle espèce !

Je laisse tout cela aux "experts" de tout poil, les Frankenstein en tête et ils sont nombreux ! Je préfère juste m'appuyer sur ce qu'en a dit Stewen Hawking (1942 - 2018), le célèbre physicien anglais connu pour ses travaux sur les trous noirs et la relativité générale et qui, profitant de sa notoriété, a mis en lumière ce qu'il considérait comme les grands défis et les menaces existentielles qui pèseront sur l'humanité dans les décennies à venir. Allant de sujets tels que les extraterrestres à la fin du monde, ses déclarations, parfois controversées, ont fait la une des journaux (voir annexe au chapitre 4).

4. Mon scénario

Il s'agit du long terme (2^{ème} moitié de ce siècle au plus tôt). Il est donc spéculatif, comme je l'ai dit plus haut. Il n'est pas pour autant invraisemblable. Ils résulte de deux facteurs qui, à mes yeux, conditionnent notre avenir :

- Le changement climatique ne sera pas maîtrisé d'ici 2100 du fait, notamment des dissensions, exacerbées par le phénomène lui-même, entre les nations, celles qui le subissent déjà et les autres qui le subiront dans un avenir proche.
- L'espèce biologique Homo (pas vraiment) Sapiens ¹⁰¹ devra bientôt vivre avec une espèce électro-mécanique en cours de genèse avec le mariage des robots et de l'IA. Appelons-la "Robo Sapiens".

A ce sujet, "Robo Sapiens" sera-t-il plus "Sapiens" qu'Homo. Qui peut le dire ? Après tout, ce n'est peut-être pas si difficile ! En particulier, sera-t-il soumis aux trois lois de la robotique ¹⁰² :

- Un robot ne peut porter atteinte à un être humain ni, restant passif, laisser cet être humain exposé au danger,
- Un robot doit obéir aux ordres donnés par les êtres humains, sauf si de tels ordres entrent en contradiction avec la première loi,
- Un robot doit protéger son existence dans la mesure où cette protection n'entre pas en contradiction avec la première ou la deuxième loi.

D'autres facteurs peuvent aussi changer la donne :

- Une démographie incompatible avec les ressources d'une planète en surchauffe.
- La maîtrise de la fusion nucléaire contrôlée ¹⁰³, renvoyant au moyen âge les énergies dites renouvelables. Personnellement, je pense que c'est pour demain.
- Le contrôle local de la gravitation, perspective beaucoup plus hypothétique et lointaine mais à laquelle je crois.

¹⁰¹ Sapiens est un adjectif latin signifiant intelligent, sage, raisonnable, prudent.

¹⁰² formulées en 1942 par les écrivains de science-fiction Isaac Asimov et John W. Campbell.

¹⁰³ La fusion nucléaire est un processus par lequel des noyaux légers fusionnent pour former des noyaux plus lourds et libérer d'énormes quantités d'énergie, bien supérieures à celles libérées par la fission nucléaire. La fusion peut être contrôlée, comme c'est le cas au cœur du Soleil (et des étoiles) et dans les réacteurs à fusion, ou explosive (la bombe H).

Enfin, une rencontre du troisième type ¹⁰⁴ n'est pas impensable si l'on veut bien suivre ceux qui, comme moi, ne voient d'autre explication à certains PAN (voir chap. 1, § 2.2). Quelles en seraient les conséquences ? Difficile de répondre ! Seule la SF peut s'y risquer ¹⁰⁵.

Sur cette base, nombreux sont les avenir possibles. Notamment celui de l'émigration humaine dans l'espace avec APOGEIOS comme première étape. Curieusement, il me semble que les objections à cette éventualité (voir chap. 2, § 1) deviennent des arguments en sa faveur, surtout dans les cas les plus sévères du changement climatique décrits par le GIEC ¹⁰⁶ pour la fin de ce siècle :

- Si on le démarrait dans les années 50, le programme complet (soit environ 50 ans pour créer l'infrastructure spatiale nécessaire, construire la cité et la peupler) serait concomitant à l'évolution du climat (+4°C en 2100)
- Si on devait vivre sur Terre enfermés dans des cités isolées de l'extérieur, ce ne serait guère différent de la vie dans Apogaios. Entre le vide et une atmosphère surchauffée...là-haut ou sur Terre, ce serait la même.
- Au spectacle d'une Terre dévastée, le "mal du pays" qui pourrait gagner les premiers habitants d'Apogaios ne serait plus un risque. Surtout, ceux nés dans Apogaios et dans les cités suivantes auraient tout aussi peur d'aller vivre sur Terre que nous-mêmes si l'on devait vivre comme nos lointains ancêtres.
- Vu la progression actuelle des zones protégées ¹⁰⁷, on peut imaginer que la Terre entière soit un jour classée en totalité réserve naturelle dans l'espoir de favoriser la renaissance de sa biodiversité tout en limitant la population humaine.

Pour résumer, APOGEIOS, contrairement à d'autres destinations, est une perspective réaliste car prenant en compte le "vivre ensemble" d'une communauté isolée de l'extérieur mais pas "perdue dans l'espace".

De fait, la cité spatiale:

- est réalisable avec les technologies d'aujourd'hui (moyennant un changement d'échelle),
- offre à ses habitants un environnement terrestre (atmosphère tempérée et pesanteur identique),
- reste proche de la Terre (condition nécessaire dans un premier temps pour des raisons psychologiques),
- est quasiment sans danger venant de l'extérieur,
- est d'un coût abordable du fait d'un grand nombre de participants
- est fédérateur, ce qui peut atténuer les conflits dus au changement climatique

¹⁰⁴ Un humain entre en contact avec un artefact extraterrestre.

¹⁰⁵ Ainsi "Disclosure Day" le récent film de Steven Spielberg. Un succès planétaire.

¹⁰⁶ Il correspond à une hausse des températures mondiales de 2,7 °C d'ici 2100. Les scénarios les plus pessimistes conduiraient respectivement à une hausse des températures de 3,6 °C et 4,4 °C d'ici 2100.

¹⁰⁷ En 2021, selon la base de données mondiale des aires protégées, la France compte 5 923 aires protégées, couvrant une superficie totale d'environ 3,6 millions de km², ce qui représente 34,7% de son territoire marin et terrestre.

Naturellement, on objectera qu'en 2100, APOGEIOS ne serait habitée que par un millionième de l'humanité et qu'il faudra attendre longtemps pour que cette infime fraction devienne significative. Effectivement, ce n'est pas la fin de l'histoire. Les "Spatiens", comme je les appelle, ont comme objectif de construire en 10 ans des cités pour 20000 nouveaux Spatiens" (voir chap. 1, § 1.1) et ainsi de suite, de sorte qu'en deux siècles, ils pourraient être dix milliards, soit plus nombreux que les Terriens.

Pendant ce temps, le climat devrait s'améliorer et la Terre cesser d'être un désert. Ce n'est qu'à cette époque, selon moi, qu'elle pourrait redevenir accueillante.

5. Clap de fin

Deux tendances lourdes semblent devoir structurer l'avenir :

- Le développement (effréné) de L'IA. Pour le moment, le mot "intelligence" est quelque peu abusif ¹⁰⁸ mais son implantation dans les robots ne fait que commencer. "Robo (sans le t) Sapiens" approche !
- Le changement climatique se manifeste de plus en plus d'année en année. Il semble qu'on n'a encore rien vu. Il faudrait que tous les peuples de la Terre se mobilisent et s'accordent entre eux plus qu'actuellement ¹⁰⁹.

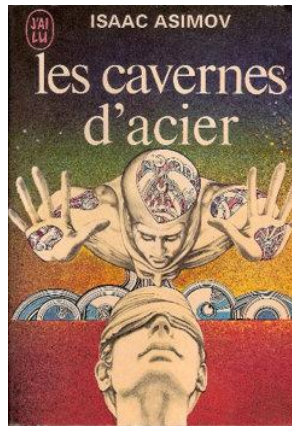
Point de vue

L'intelligence humaine est beaucoup plus complexe que celle de ChatGPT & autres. A commencer par la conscience qu'on ne sait même pas définir correctement. Et quid de l'affectivité, de la créativité, de la spiritualité ? Zéro mais ça pourrait venir aux robots si l'on parvient à imiter le cerveau humain, voire à le perfectionner. Ce n'est plus de la SF. C'est en cours. Les neurosciences ont inspiré les premières formes d'intelligence artificielle. Depuis, la médecine et la recherche numérique ne cessent de s'influencer (voir par exemple "Un « cerveau artificiel" ? Sciences Ouest - La révolution IA - N° 428 - 28 mars 2025).

Quoiqu'il en soit , nos descendants devront prioritairement se protéger, en construisant :

- des digues pour conserver, autant que possible, les littoraux menacés par l'élévation du niveau des mers et des océans.
- des cités climatisées, autonomes en énergie électrique, étanches et isolées d'une atmosphère extérieure devenue brûlante. Ca existe déjà ou presque !
- idem pour les réserves animales (ne pas dire zoos),
- des usines de dessalement de l'eau de mer comme il en existe déjà,
- des réseaux d'aqueducs à la place des pipelines d'aujourd'hui,
- des protections contre les éboulements et les glissements de terrain
- etc.

¹⁰⁹ Selon "Futuribles", les villes de Calais, Graveline et Dunkerque pourraient être englouties par les eaux. Sur le littoral de la Picardie, c'est toute la baie de Somme qui est menacée de disparaître sous la Manche, face à la montée du niveau des eaux.



Roman-culte d'Isaac Asimov publié en 1954

Mais ce sera toujours mieux que d'aller vivre sur la Lune et encore moins sur Mars, mais pas très différent que dans notre ville spatiale "APOGEIOS".

Ça existe déjà

Voir "la maîtrise des eaux" aux Pays-Bas, Et sait-on qu'il y a en France a quelque 9 000 kilomètres de digues, entre petites murailles de béton et levées de terre plus ou moins végétalisées et parfois enrochées, premier rempart contre les eaux ?

RÉSO, ville souterraine sous Montréal (Canada) de 12 km². Elle est constituée d'un réseau connecté d'hôtels, de centres commerciaux, de musées, d'espaces de bureaux et même d'une arène de hockey... Avec jusqu'à un demi-million de visiteurs par jour, ce projet urbain un peu particulier né dans les années 1960 est devenu incontournable.

Consolons-nous : le pire n'est jamais certain. Ce scénario est très pessimiste mais il est important de l'évoquer pour sensibiliser les décideurs. Nombre d'entre eux limitent l'avenir à la durée de leur mandat ou à leur espérance de vie.

Au risque du déclin pour finalement disparaître ou retourner à un mode de vie plus ou moins primitif, l'humanité pourrait connaître une nouvelle ère en se répandant dans l'Espace avec les robots comme compagnons.

La migration dans l'espace est, de mon point de vue, une solution à la fois pour gérer une démographie galopante ¹¹⁰ mais aussi pour laisser la planète se refaire une santé.

Enfin :

- Le contact avec des extraterrestres n'est pas exclu si l'on considère qu'ils sont déjà là, probablement depuis longtemps.
- Les progrès de la physique et de la technologie mèneront peut-être à manipuler la gravitation, ce qui devrait élargir énormément le champ d'action de l'humanité.

¹¹⁰ Actuellement un milliard supplémentaire tous les 12 ans – 10 milliards annoncés pour 2050 mais décroissance au-delà.

Et en plus, c'est (peut-être) vrai !

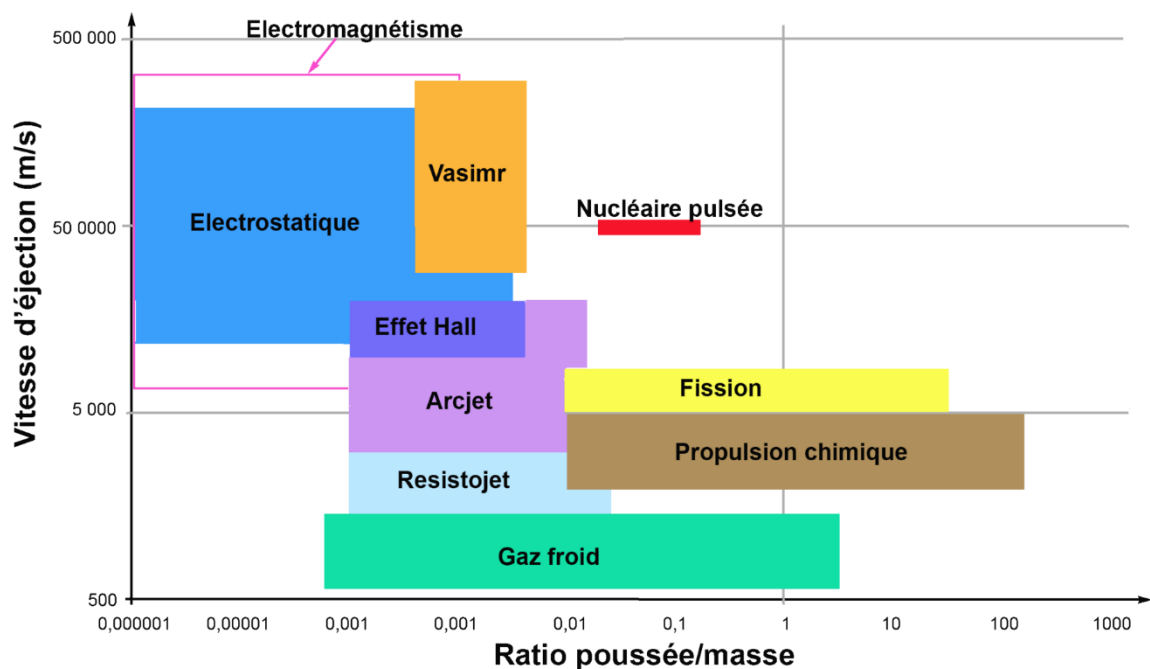
Annexe au chapitre 1

La propulsion spatiale

(Illustrations Wikipedia)

1. Les modes de propulsion

(Tiré de l'article de l'article "Propulsion spatiale")



Nota: La fission n'a jamais volé en tant que moyen de lancement

2. La propulsion des lanceurs

La propulsion d'un lanceur consiste à expulser à grande vitesse (entre 2000 et 4500 m/s), via une tuyère de Laval (tube en forme de sablier), des gaz très chauds (plus de 2000° C) produits par la réaction d'un oxydant et d'un réducteur. La poussée est obtenue du fait de la conservation de la quantité de mouvement de l'ensemble lanceur / gaz éjectés.

Les ergols

Contrairement aux avions, il faut embarquer le comburant pour pouvoir fonctionner dans le vide.

D'une manière générale:

- le mot "ergol" désigne indifféremment le comburant (oxydant): oxygène liquide (LOx), peroxyde d'azote (N_2O_4)...et le carburant (réducteur): kérosène, UDMH, hydrogène liquide (LH2), méthane liquide (LCH4), polybutadiène (PBHT)...
- Le mot "propergol" désigne un couple d'ergols en général, notamment pour les propulseurs solides (improprement appelés "propulseurs à poudre") où les composants solides sont pré-mélangés dans le corps du propulseur
- Un hypergol" désigne un couple d'ergols s'allumant au contact (N_2O_4 / UDMH).
- la propulsion "hybride" utilise un comburant liquide (LOx) et un carburant solide comme celui des propulseurs solides.



Le moteur Vulcain-2 d'Ariane 5

Ergols	LOx / LH2
Poussée totale dans le vide	1 140 kN
Poussée totale au sol	885 kN
Vitesse d'éjection des gaz	4200 m/s
Pression de combustion	110 bar
Temps de fonctionnement en vol	575 s
Durée de vie	6000 s + 20 démarrages
Hauteur	3 m
Diamètre (sortie de tuyère)	1,76 m
Masse totale	1 700 kg
Débit d'ergols	271 kg/s

3. La propulsion électrique

3.1 Principe

La propulsion électrique utilise l'énergie électrique produite par une source externe pour accélérer un fluide qui est éjecté et produit ainsi une poussée. Comparée à la propulsion chimique, cette poussée est très faible (< 1 newton) et ne peut servir qu'une fois en orbite stable:

- pour la mise en place des satellites sur leur orbite finale,
- pour le contrôle d'attitude et d'orbite des satellites (SCAO)
- plus récemment, pour les voyages au long cours des sondes planétaires

Mais elle peut s'exercer pendant de longues durées et grâce à une vitesse d'éjection très élevée, elle permet de réduire de manière très importante (jusqu'à dix fois) la masse d'ergols nécessaire par rapport à la propulsion chimique.

L'énergie électrique est fournie soit par des panneaux solaires photovoltaïques, soit par des générateurs thermoélectriques à radioisotope (RTG) ¹¹¹.

Il existe différents types de propulseurs électriques (source Wikipedia) :

- Le résistojet, premier type de propulsion électrique à avoir été utilisé (1965), consiste à chauffer un fluide avec une résistance avant de l'éjecter par une tuyère. Simple mais peu performant (la vitesse d'éjection est plus faible que celle obtenue avec un propulseur chimique).
- l'arcjet: le fluide est porté à une température très élevée par une décharge électrique. La vitesse d'éjection est très supérieure à celle d'un propulseur chimique.
- le propulseur à effet Hall et le moteur ionique utilisent un champ électrique ou magnétique (généré par la source d'énergie externe) qui accélère le fluide préalablement ionisé. La vitesse d'éjection est très élevée.
- Enfin une troisième catégorie, dont fait partie le propulseur magnétoplasmodynamique, accélère le fluide à l'état de plasma avec des champs électrique et magnétique. Elle permet théoriquement d'obtenir une poussée bien plus importante que les autres types de propulseur électrique.

3.2 VASIMR: un projet prometteur

Pour "**V**ARIABLE **S**pecific **I**mpulse **M**agnetoplasma **R**ocket" (**voir** l'article "La propulsion magnétoplasmique à impulsion spécifique variable" sur Wikipedia) ¹¹²,

¹¹¹ Un générateur thermoélectrique à radio-isotope (RTG pour Radioisotope Thermoelectric Generator) est un générateur électrique nucléaire produisant de l'électricité à partir de la chaleur résultant de la désintégration radioactive de matériaux radioactifs.

¹¹² Il n'y a pas de i. Prononcer Vasimer.

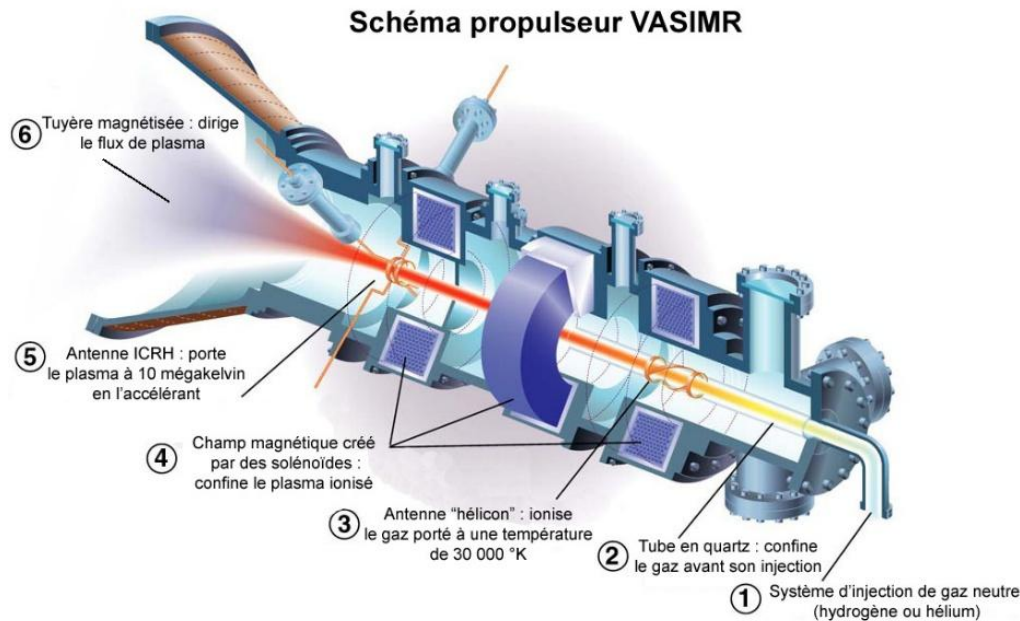


Schéma de VASIMR en coupe

Le concept a été inventé fin des années 1970 par l'astronaute et physicien des plasmas Franklin Chang-Díaz

1. Le gaz neutre (hydrogène ou hélium) est injecté en entrée du dispositif.
2. Un tube en quartz recueille et confine ce gaz neutre avant son ionisation.
3. Une « antenne hélicon » spéciale pré-ionise le gaz (chauffage à 30000 °K) à l'aide de radiofréquences émises dans un champ magnétique axial (rayonnement hélicon excitant les électrons).
4. Le plasma est confiné à distance de la paroi par des solénoïdes entourant la chambre cylindrique, créant un champ magnétique axial dans l'enceinte.
5. Une « antenne ICRH » (Ion Cyclotron Resonant Heating) ionise totalement le plasma en le portant à très haute température (10 megakelvins) et engendre un champ électrique induit qui accélère les ions en une trajectoire hélicoïdale vers la sortie. C'est le *booster* principal.
6. Une « tuyère magnétique » en sortie contrôle le jet de plasma en modelant axialement la trajectoire des ions..

VASIMR est une solution polyvalente, alternative aux deux principes que sont les propulseurs à haute poussée et à faible impulsion spécifique (la propulsion chimique) d'un côté, et les propulseurs à faible poussée et à haute impulsion spécifique (les moteurs ioniques) de l'autre, car il est capable de fonctionner dans les deux modes en ajustant à tout moment ses paramètres de fonctionnement.

Encore au stade expérimental :VASIMR les premières réalisations industrielles doivent permettre des vitesses d'éjection entre 10 et 300 km/s et des poussées de 10 à 500 newtons. Un vaisseau de 20 tonnes,

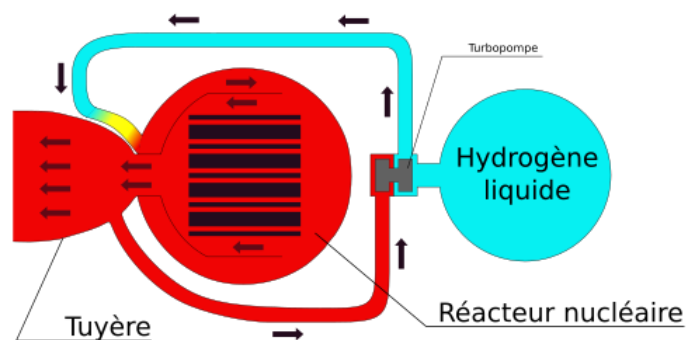
alimentant un propulseur VASIMR avec 200 MW, mettrait Mars à seulement 39 jours de voyage de la Terre.



100 kW firing: VX-200SS VASIMR® engine plasma firing for long duration firing

4. La propulsion nucléo-thermique

4.1 Principe (tiré de l'article "Propulsion nucléaire thermique")



4.2 Le programme NERVA (Nuclear Engine for Rocket Vehicle Application")

Moteur expérimental des années 70 - poussée 250 à 350 kN (tiré de l'article "Propulsion nucléaire thermique")



La taille des opérateurs donne une idée de celle du propulseur

Nota: Les russes ont, semble-t-il, développé un missile, appelé "Bourevestnik", et testé avec succès au-dessus de l'océan Arctique après des années de développement et plusieurs vols d'essai initiaux, dont l'un a entraîné la mort de cinq scientifiques.

5. La propulsion par fusion nucléaire

Conception théorique de fusée propulsée par un réacteur à fusion nucléaire (tiré de l'article "Propulsion par fusion nucléaire")

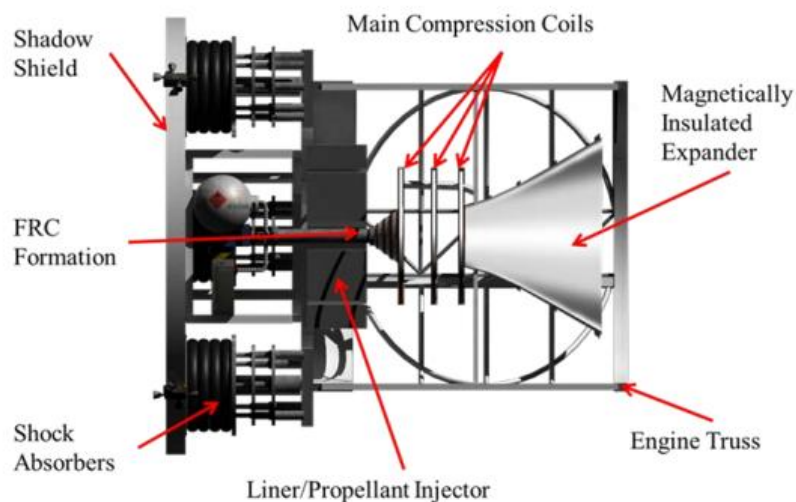
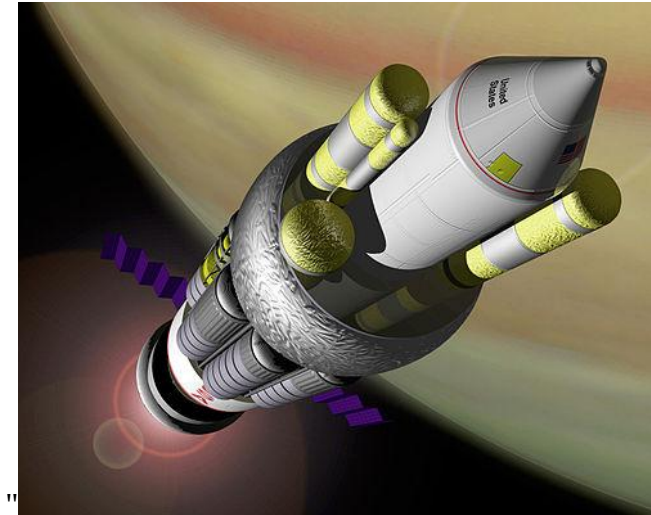


Figure 8. Schematic of the Fusion Driven Rocket including major subsystems.

Projet Orion

Projet des années 50 et condamné par le traité d'interdiction partielle des essais nucléaires de 1963.

Tiré de l'article "Projet Orion"



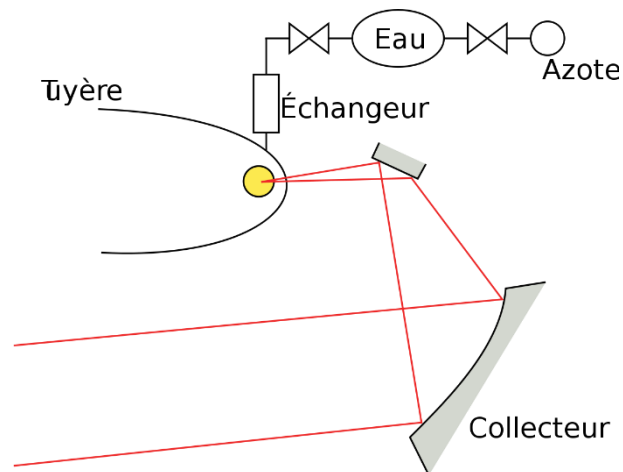
6. Pardon ! J'allais oublier

Les idées ne manquent pas pour s'affranchir des contraintes des systèmes de propulsion décrits ci-dessus. Voici quelques systèmes qui ont fait l'objet d'études approfondies, voire de démonstrateurs à échelle réduite. Mais ils n'ont pas vraiment été plus loin et, à ma connaissance, aucun de ces systèmes n'est opérationnel mais ce n'est peut-être que provisoire.

Leur principe commun est d'utiliser une source d'énergie extérieure au véhicule dans l'espoir d'en améliorer les performances, notamment pour réduire le coût et la durée des transferts orbitaux (LEO - GTO, LEO - LLO, trajectoires interplanétaires).

6.1 La propulsion laser

Le schéma ci-dessous en donne le principe. La vapeur d'eau à haute température qui est éjectée n'est pas produite par la combustion d'hydrogène et d'oxygène mais par de l'eau vaporisée par un laser de forte puissance depuis la Terre ou dans l'espace.



Cette technologie est aujourd'hui envisagée dans la propulsion de microsatellites, voire de sondes interstellaires miniatures (voir l'article "Percée Starshot" de Wikipedia).

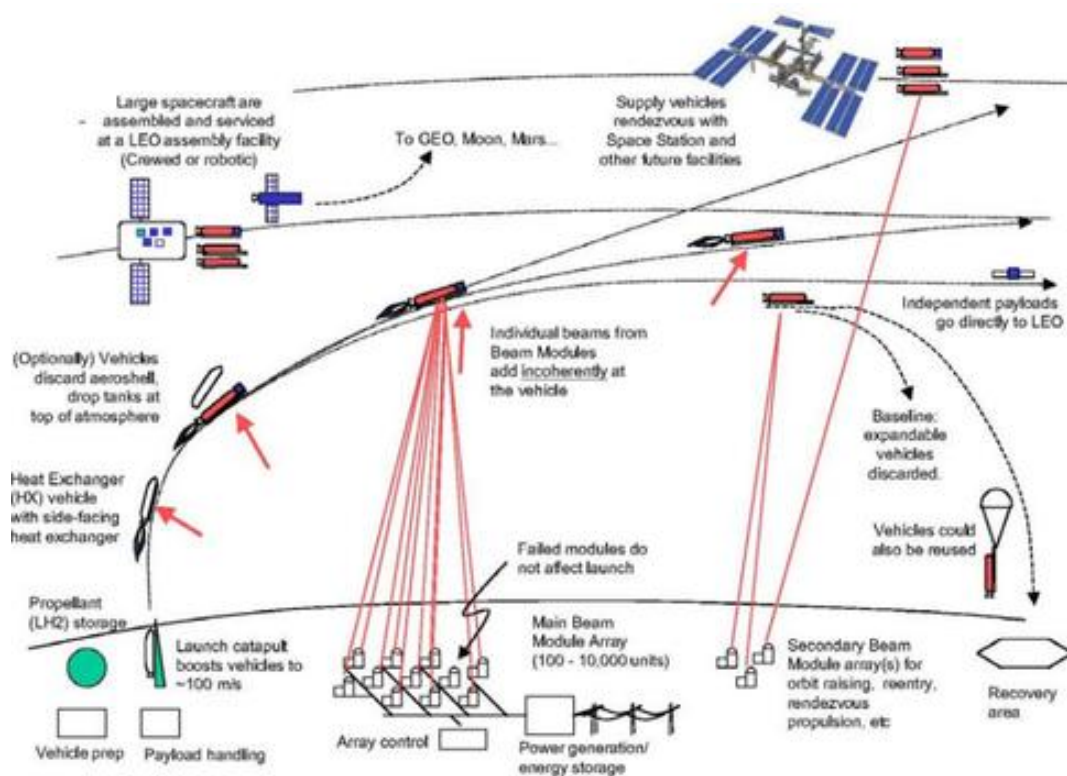


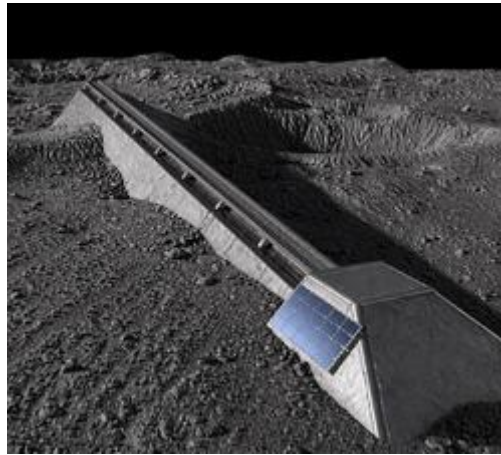
Figure 1: Laser Launch Architecture With Modular Ground-Based Laser Array

6.2 Les lanceurs électromagnétiques

Encore appelés "mass drivers". La charge utile, placée dans un support circulant sur des rails ou dans un tube, est accélérée par induction électromagnétique.

On distingue les accélérateurs linéaires : "catapultes" ou "canons" EM et les circulaires ou "frondes" EM.

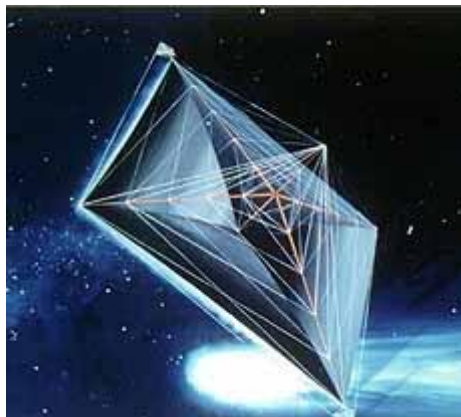
De nombreux concepts et variantes sont proposés selon qu'il s'agit d'installations terrestres, sur la Lune ou dans l'espace. Leur technologie s'inspire de systèmes existants telles les catapultes de porte-avions développées par la marine américaine (EMALS pour Electro-Magnetic Aircraft Launch System).



Concept 3D de lanceur de masse lunaire (voir article de Wikipedia sur les mass drivers)

Voir également l'article de Futura sur le projet d'Elon Musk d'une usine sur la Lune pour construire des satellites et d'une catapulte pour les mettre en orbite.

6.3 Les voiles solaires



Vue d'artiste d'une voile solaire

Toiles de plus ou moins grande taille et extrêmement minces (quelques microns), poussées par la pression qu'exerce la lumière du soleil (comme sur la queue d'une comète). Cette pression, dite de radiation, varie comme l'inverse du carré de la distance au soleil de sorte qu'elle devient négligeable aux distances des planètes lointaines. En jouant (dans les deux sens du terme) avec la gravitation qui, varie comme elle, on peut "naviguer" comme le fait un voilier avec le vent et les courants.

Sauf qu'ici le "vent", et donc l'accélération, sont extrêmement faibles. A titre d'exemple, la voile solaire IKAROS (315 kg dont seulement 15 kg pour la voile de 173 m²) développée par la JAXA, l'agence spatiale japonaise, et lancée avec succès en 2010, lui permettait un incrément de vitesse maximal de 12 m/s au bout d'un mois. Pas lerche !

Par ailleurs, les voiles sont pliées pour rentrer dans la coiffe du lanceur et supporter l'ambiance pendant le lancement. Une fois en orbite, il faut les déployer et les orienter, manoeuvres d'autant plus difficiles qu'elles sont de grande taille.

Pour en savoir plus :

- voir le site de l'U3P (Union pour la Promotion de la Propulsion Photonique) créée en France en 1981. Pour le fun, l'association a notamment lancé le projet d'une course Terre-Lune de voiliers solaires (sans marins à bord !). Le projet est rejoint par des associations japonaises, étatsunienne, espagnole, ainsi que par l'International Astronautical Federation, qui propose d'arbitrer la course.
- Olivier Boisard, qui a présidé l'U3P, répondra mieux que moi à toute question sur le sujet.

Pour moi, le concept serait beaucoup plus crédible si on pouvait fabriquer les voiles dans l'espace, dans une zone à faible gradient de gravité. Par exemple, autour d'APOGEIOS ! On pourrait alors réaliser des voiles de plusieurs hectares sans avoir à les déployer et avec de la main-d'œuvre locale.

Bon vent !

6.4 L'ascenseur spatial

Ou l'utopie en majesté ! Encore un concept imaginé par Tsiolkovsky ! Plusieurs projets dont le dernier en date "ASCENSIO" a été récompensé par la fondation Jacques Rougerie (voir mon projet APOGEIOS). L'auteur est un jeune architecte anglais, Jordan William Hughes, qui a lui-même reconnu qu'il ne pense pas que son projet puisse être réalisé d'ici 10 ans.

Le concept est fondé sur l'idée d'un câble maintenu tendu par la force centrifuge due à la rotation de la Terre sur elle-même. Pour être en équilibre, le câble doit s'allonger au-delà de l'orbite géostationnaire (36 000 km), à partir de laquelle la force centrifuge dépasse la force de gravitation. Une fois en place, des nacelles montant le long du câble permettraient de rejoindre l'orbite de façon plus économique qu'avec un lanceur spatial.

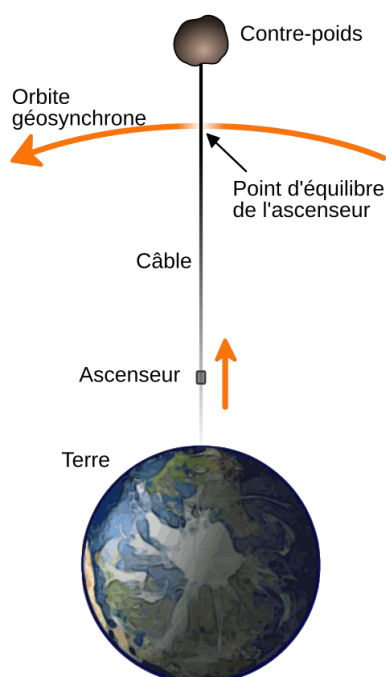


Schéma de principe d'un ascenseur spatial



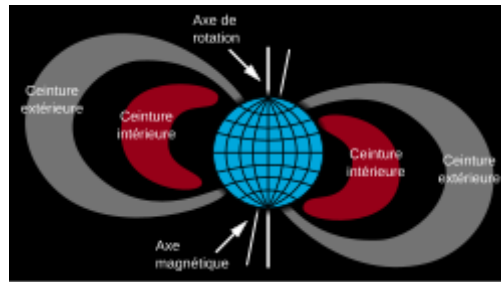
Ascenseur spatial (vision d'artiste – source Wikipedia)).

Au premier abord, l'idée est très séduisante. Malheureusement, elle résiste difficilement à l'examen pour plusieurs raisons:

- La première est technologique. La faisabilité d'un câble de plusieurs dizaines de milliers de km (!) avec des nanotubes de carbone ¹¹³ est loin d'être démontrée.
- La seconde concerne sa fragilité, notamment face à la multiplication des débris spatiaux (voir l'ISS, chap. 1, § 2-6) Le risque est loin d'être négligeable même si des manœuvres d'évitement sont possibles. Par ailleurs, son ancrage sur une plateforme flottante, susceptible de se déplacer, semble difficile à sécuriser.
- La troisième est, comme on s'en doute, politico-économique en raison de son coût de construction et de maintenance mais aussi de son implantation géographique même s'il est ancré en haute mer. Ses promoteurs arguent un amortissement rapide grâce à une réduction drastique du coût du kg en orbite. Je n'en suis pas si sûr.

Il y a bien d'autres difficultés comme sa stabilité ou, non la moindre, la durée de la traversée des ceintures de Van Allen (pour les capsules habitées).

¹¹³ La résistance à la traction des nanotubes de carbone est extrêmement élevée dans leur sens longitudinal. Bien que très coûteux, ils font partie des produits issus des nanotechnologies actuellement testés ou commercialisés dans certains domaines de pointe comme le sport (source Wikipedia).



Représentation schématique des ceintures de Van Allen.

Cela étant, la NASA a testé en décembre 2023 un ascenseur pour la mission ARTEMIS 3. Mais là, il est prévu pour la Lune. Un câble relierait la navette Starship en orbite autour de la Lune à la surface lunaire. Ce serait le meilleur moyen pour permettre de descendre facilement du matériel. De même, la JAXA va bientôt expérimenter un mini-ascenseur spatial aux abords de l'ISS.

Bonne chance !

7. La sureté de fonctionnement

RAMS: **R**eliability, **A**vailability, **M**aintainability, **S**afety : Fiabilité, Disponibilité, Maintenabilité, Sécurité. Ces 4 lettres caractérisent la "sûreté de fonctionnement" d'un système spatial, notamment, d'un lanceur. C'est un élément absolument essentiel, d'une part évidemment pour les vols habités, mais aussi pour les satellites commerciaux (perte coûteuse: satellite + report de l'exploitation)) et les CU scientifiques qui n'ont généralement pas de rechange ("one shot") :

- La fiabilité traduit la probabilité de panne d'un équipement ou d'un système. On l'améliore en garantissant celle de ses composants, en le qualifiant aux limites de son domaine de fonctionnement et en le contrôlant avant et après installation à bord.
- La disponibilité est l'aptitude d'un équipement à fonctionner, en toute circonstance et sans délai, dans son domaine de qualification.
- La maintenabilité est la facilité, comme son nom l'indique, de maintenir en bon état, de réparer ou de changer un équipement.
- La sécurité doit limiter autant que se peut le risque d'atteinte aux biens et aux personnes au sol, notamment en cas de panne. Dans le cas des vols habités, c'est un "design driver" majeur, la vie des astronautes étant en jeu.

A noter que contrairement à un propos souvent entendu, la sécurité n'est pas synonyme de fiabilité mais en est le complément.

La conquête spatiale est malheureusement jalonnée d'accidents au sol et en vol, certains très graves, voire cauchemardesques (mort d'astronautes, chute d'éléments sur une zone habitée). C'est pourquoi les RAMS sont une priorité.

Dans le secteur aérospatial comme dans d'autres, l'expérience acquise a considérablement amélioré les choses. Cela dit, la sureté de fonctionnement n'est pas seulement une question de technique mais une véritable culture malheureusement pas toujours prise en compte par les "costkillers".

Nota : RAMS est aussi l'acronyme anglais pour "Risk Assessment and Method Statement", document à caractère légal utilisé dans l'industrie sur les lieux de travail. Ce document doit expliquer la méthodologie de la tâche à accomplir ainsi que les risques et dangers encourus.

Annexe au chapitre 4

Les prévisions de Stephen Hawking

(Source: articles: BBC, The Guardian, World Economic Forum).

Stephen William Hawking, né le 8 janvier 1942 à Oxford et mort le 14 mars 2018 à Cambridge, est un physicien théoricien et cosmologiste britannique. Ses livres et ses apparitions publiques ont fait de ce théoricien de renommée mondiale une célébrité.

Depuis l'âge d'une vingtaine d'années, Hawking souffrait d'une forme rare, d'évolution lente, de sclérose latérale amyotrophique (SLA). Sa maladie a progressé au fil des ans au point de le laisser presque complètement paralysé (source Wikipedia)



Bien connu pour ses travaux sur les trous noirs et la relativité générale, il est souvent sorti de son domaine de recherche, profitant de sa notoriété pour mettre en lumière ce qu'il considérait comme les grands défis et les menaces existentielles qui pèseront sur l'humanité dans les décennies à venir. Allant de sujets tels que les extraterrestres à la fin du monde, ses déclarations ont fait la une des journaux dont certaines controversées.

Pendant des décennies, le physicien théoricien a dit aux humains de commencer à s'installer de façon permanente sur d'autres planètes, ce qui a fait la une des journaux à plusieurs reprises. Il a affirmé que l'humanité serait un jour victime d'une catastrophe d'une telle ampleur qu'elle s'éteindrait, peut-être plus tôt qu'on ne le pense.

En 2016, il a déclaré à la BBC : "Bien que la probabilité d'une catastrophe sur la planète Terre au cours d'une année donnée puisse être assez faible, elle s'accumule au fil du temps et devient une quasi-certitude dans les mille ou dix mille prochaines années.

Pour assurer la survie de l'humanité, il a exprimé que nous devrions coloniser d'autres planètes et systèmes solaires. Se disperser est peut-être la seule chose qui nous sauve de nous-mêmes. Je suis convaincu que les humains doivent quitter la Terre", a-t-il déclaré lors d'un festival norvégien des sciences et des arts en 2017.

Stephen Hawking a vu les possibilités offertes par les progrès de l'intelligence artificielle, mais il a également mis en garde contre ses dangers. En 2014, il a déclaré à la BBC que "le développement d'une intelligence artificielle complète pourrait sonner le glas de la race humaine". Il pensait que l'intelligence artificielle de base développée jusqu'à présent s'était déjà avérée très utile. Par exemple, la technologie qu'il utilisait pour communiquer intègre une forme élémentaire d'IA. Mais il craignait les conséquences de formes avancées d'intelligence des machines qui pourraient égaler ou surpasser les humains.

Dans son recueil posthume d'articles et d'essais intitulé "Brèves réponses aux grandes questions", il a prédit que les techniques d'édition génétique donneront naissance à une race de "surhommes". "Je suis sûr qu'au cours de ce siècle, les gens découvriront comment modifier à la fois l'intelligence et les instincts tels que l'agressivité", a-t-il écrit. "Une fois que ces surhommes apparaîtront, des problèmes politiques importants se poseront avec les humains non améliorés, qui ne seront pas en mesure de rivaliser", écrit-il. "On peut supposer qu'ils disparaîtront ou qu'ils deviendront insignifiants. Au lieu de cela, il y aura une race d'êtres qui se conçoivent eux-mêmes et qui s'améliorent à un rythme de plus en plus rapide".

Dans le même livre, il a prédit que la menace numéro un pour la Terre serait la collision d'un astéroïde, comme celui qui a tué les dinosaures. Cependant, "nous n'avons aucune défense" contre cela, a écrit Stephen Hawking. En revanche, il considère le réchauffement climatique comme une menace plus immédiate. Il était particulièrement préoccupé par ce que l'on appelle le "point de basculement", où le réchauffement de la planète deviendrait irréversible. Il s'est également inquiété de la décision des États-Unis de se retirer de l'Accord de Paris en 2017. "L'action de Trump pourrait pousser la Terre au bord du gouffre, pour devenir comme Vénus, avec une température de 250 degrés et une pluie d'acide sulfurique", a-t-il déclaré à la BBC.

Le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) des Nations unies met également en garde contre le risque potentiel d'atteindre des points de basculement climatiques, à mesure que les températures augmentent. Il a théorisé que notre planète se transformerait en une gigantesque boule de feu d'ici 2600 en raison de la surpopulation et de la consommation d'énergie. La Terre deviendrait alors inhabitable.

Avec le changement climatique, les chutes d'astéroïdes qui se font attendre, les épidémies et la croissance démographique, notre propre planète est de plus en plus précaire", a-t-il déclaré à la BBC en 2017. C'est l'une des raisons pour lesquelles il a défendu l'idée d'une installation permanente de l'homme sur d'autres planètes.

Ayant passé la majeure partie de sa vie à observer l'espace, il n'est pas surprenant qu'il se soit demandé s'il existait d'autres formes de vie dans l'espace. Il existe même tout un domaine scientifique, connu sous le nom de SETI (Search for Extra-Terrestrial Intelligence, ou Recherche sur l'intelligence extraterrestre), qui se consacre à l'écoute de signaux provenant d'êtres intelligents situés ailleurs dans

l'univers. Cependant, il a mis en garde contre la tentation d'appeler activement les civilisations extraterrestres qui pourraient exister. En 2010, il a déclaré à Discovery Channel : "Si des extraterrestres nous rendent visite, le résultat sera le même que lorsque Christophe Colomb a débarqué en Amérique, ce qui n'a pas été une bonne chose pour les Amérindiens".

En 2010, interrogé par le magazine Time sur la découverte ou l'avancée scientifique qu'il aimerait voir de son vivant, il a répondu "la fusion nucléaire". Il s'agit d'une nouvelle source d'énergie sans carbone, qui fusionne deux atomes d'hydrogène pour produire un atome d'hélium et une grande quantité d'énergie. "J'aimerais que la fusion nucléaire devienne une source d'énergie pratique. Elle fournirait une énergie inépuisable, sans pollution ni réchauffement climatique", a-t-il déclaré.

Glossaire

3AF	Association A éronautique et A stronautique de France: société savante au service de l'industrie aérospatiale
A-L	Année-Lumière : distance franchie par la lumière en un an, environ 9500 milliards de km
BF / HF	Basse Fréquence / Haute Fréquence : vibrations générées par la propulsion et les séparations
CNES	C entre N ational d' E tudes S patiales: agence française de l'Espace
CNEOS	C enter for NEO S tudies: centre d'étude des objets géocroiseurs
COMETA	COM ité d' ET udes A pprofondies: sur les PAN (dont les OVNI)
COP	C onférence O f P arties, ou “ C onférence des P arties”
CSG	C entre S patial G uyanais: un des centre du CNES et base spatiale de l'Europe
CU	C harge U tile d'un lanceur: satellite, sonde planétaire, observatoire, module de station
EM	E lectro M agnétisme (que)
FLdB	F ondation L ouis d e B roglie: lieu d'accueil ouvert dédié à la physique fondamentale
ESA	E uropean S pace A gency: Agence spatiale européenne
ESO	E uropean S outhern O bservatory: observatoire européen austral
GCR	G alactic C osmic R ay: rayonnement ionisant provenant de tout l'univers
GEIPAN	Groupe d'Etudes et d'Information sur les PAN (anciennement GEPAN)
GEO	G eostationnary E arth O rbit: orbite géostationnaire (circulaire à 36000 km dans le plan équatorial)
GIEC (IPCC)	G roupe d'experts I ntergouvernemental sur l' E volution du C limat en anglais: I ntergovernmental P anel on C limate C hange
GTO	G eostationnary T ransfert O rbit: orbite de transfert géostationnaire
IHEDN	I nstitut des H autes E tudes de D éfense N ationale: Ets public dépendant directement du <u>1^{er} ministre</u>
ISRO	I ndian S pace R esearch O rganisation: organisation indienne de recherche spatiale,
ISS	I nternational S pace S tation: station spatiale internationale.
JAXA	J apan A erospace E xploration A gency: agence d'exploration aérospatiale japonaise
KSC (KSC)	K ennedy S pace C enter: base spatiale de la Nasa (East Range) K uiper S pace C ity: voir voyage interstellaire
ΛCDM	L amda C old D ark M atter: <u>modèle cosmologique du Big Bang</u>
LEO	L ow E arth O rbit: orbite terrestre basse (altitude comprise entre 160 et 2000 km)
LLO	L ow L unar O rbit: orbite lunaire basse (en-dessous de 100 km)
LOx / LH2	L iquid O xygène / L iquid H ydrogène: le plus performant des couple d'ergols
MQ	M écanique Q uantique: régit le monde microscopique (molécules, atomes et particules)
NASA	N ational A eronautics and S pace A dministration: agence aérospatiale des USA
NEO	N ear E arth O bject: astéroïde ou comète passant au voisinage de la Terre
OVNI	O bjets V olants N on I dentifiés: catégorie de PAN
PAN	P hénomène A érosatial N on identifié
RAMS	R eliability, A vailability, M aintenability, S afety : fiabilité, disponibilité, maintenabilité, sécurité
RG	R elativité G énérale d'Einstein: décrit la gravitation pour les masses et les vitesses très élevées
SCAO	S ystème de C ontrôle d' A ttitude et d' O rbite installé sur tous les SL, sondes planétaires et derniers étages des lanceurs
SSAC	S olar S ystem A dministration C ouncil: administration centrale des cités du système solaire
SEP	S ociété E uropéenne de P ropulsion: fait partie aujourd'hui du groupe SAFRAN
SETI	S earch for E xtra- T errestrial I ntelligence: recherche d'intelligence extraterrestre
SF	S cience- F iction
SLS	S pace L aunch S ystem: système de lancement spatial (lanceur géant de la NASA dans le cadre du programme ARTEMIS de retour sur la Lune)

SNEKMA	Société Nouvelle K uiperienne de M oteurs A tomiques
SPE	Solar P article E vent: particules ionisantes émises lors d'une éruption solaire
SSO	Sun Synchronous O rbit: orbite héliosynchrone (le satellite passe au-dessus d'un point de la surface terrestre donné à la même heure solaire locale)
UA	U nité A stronomique: environ 150 millions de km, à peu près la distance de la Terre au Soleil
U3P	Union pour la P romotion de la P ropulsion P hotonique
