

LES OUTILS DU FUTUR L'apport du spatial

par Claude Jamar, Centre Spatial de Liège; Université de Liège

Abstract

Space activities have been pushed forward by the dreams of the pioneers to reach the Moon and the planets. Later on and more realistically, by the needs of the human kind to develop its economy, increase its security and improve its live. The structure of the Universe and its origin are also major subjects driving the space research and the development of space techniques. The evolution of science and technology is now extremely fast allowing us to expect some replies to these questions in the next few generations. Since a few decades only we are conscious to be thrown in a hostile universe and that major improvements in our technologies and the control of space should increase our security.

Since a few decades we try to detect signals from intelligent species coming from star systems nearby the solar system. The life in the universe and the reply to the question : "are we alone and if not, where and who are they?" are certainly essential to the human being philosophies and religions. Space means should play a major role in this quest of the live elsewhere in the Universe.

The evolution of the technologies and its impact on space conquest is analysed on the basis of the present knowledge of physics. The bottleneck of the launch is put forward. In this field more than in any others, we need breakthroughs. Spacecraft is now part of the live in the developed countries. This influence will grow but the field is still in its infancy and progresses have to be made to reduce the costs, increase conviviality of the domain by more versatility and autonomy. In the short term, robots shall pave the way to the planets and later on to the stars. But for the long term, biotechnology will become essential to space exploration by the expected development of bio-sensors, bio-memories and bio-computers. We are naturally unable to plan these new tools but they should induce revolutions in the field.

1. La toile de fond

Par définition, le futur est inconnu et les révolutions imprévisibles. Par contre, les évolutions sont relativement aisées à planifier car elles répondent toujours aux mêmes lois et d'abord à celles de la demande et de la nécessité. De plus, les avancées figurent très tôt dans nos rêves et nos écrits et suivent toujours le même schéma. Il n'y a aucune raison que le processus s'arrête ou s'infléchisse, lié qu'il est à la structure mentale humaine.

Quelques exemples peuvent illustrer et expliciter le « très tôt » :

- L'idée du vol, tout d'abord, déjà présente dans la légende d'Icare mais ensuite chez Cyrano de Bergerac en 1656, Restif de la Bretonne en 1781, Sir Georges Cawley et ses planeurs en 1799 pour aboutir au vol réel des frères Wright le 17 décembre 1903 et à l'aéronautique qui nous est familière.
- L'astronautique dont Ziolkowsky établit les bases dès 1903 bien avant le premier vol de Sputnik en 1957.

En ce qui concerne la demande et la nécessité, le schéma de développement est inscrit dans les lois économiques et lié aux attentes du marché. Une invention se peaufine d'abord dans les laboratoires, puis, si elle s'avère utile, envahi massivement le marché. Au terme d'une quarantaine d'année, tout est dit : le développement en laboratoire, la percée du produit sur le marché, puis son éviction par son successeur, plus performant ou mieux adapté à la demande. Le fait que le processus se perpétue immuablement démontre, s'il le faut, la complexité extraordinaire de la nature et l'état peu avancé où nous nous trouvons par rapport à cette complexité.

Il faut placer l'évolution des outils dans une perspective d'évolution globale extrêmement rapide de la société :

- Le savoir humain double tous les 10 ans mais ce temps se réduit suite à l'amplification des communications induisant une capacité de collaboration quasi instantanée sur l'ensemble de la planète.
- La puissance des ordinateurs double tous les 18 mois selon la loi de Moore et sera multipliée par 1000 d'ici 2020, date à laquelle les limites de la technologie silicium seront atteintes.
- Le réseau Internet double chaque année.
- Le nombre de séquences ADN connues double tous les deux ans.

Le seul frein à une accélération de cette progression semble être notre capacité à absorber les nouveautés mais ce n'est probablement pas l'accroissement de notre durée de vie moyenne qui va y changer grand chose, poussés en avant comme nous le sommes par la publicité et les médias. Cependant, nous étions simplement habitants de la Terre; nous en devenons maintenant gestionnaires et nous devons nous préoccuper d'éléments tels que :

- La consommation d'énergie qui triple tous les 50 ans depuis 150 ans.
- La planète Terre elle-même qui approche petit à petit de ses limites de stabilité (effet de serre, trou d'ozone, pollution), limites que nous ne pouvons à aucun prix dépasser.

Les facteurs stratégiques de croissance qui étaient fortement dépendants des ressources naturelles seront maintenant liés à l'intelligence, l'invention et les techniques nouvelles. Ce changement nécessitera de consacrer plus de ressources à l'éducation et à la science.

La révolution majeure du XX^{ème} siècle fut la théorie quantique d'où découlent l'informatique et la biotechnologie. Ces connaissances nouvelles ont façonné la seconde moitié du siècle et sont toujours les moteurs de nos progrès.

Une révolution de même niveau au XXI^{ème} siècle est évidemment probable, mais imprévisible, ce qui rend caduque toute futurologie. Il est encore trop tôt pour décider si le décodage de l'ADN pourrait constituer cet élément de progrès.

Néanmoins, on peut raisonnablement imaginer qu'en toile de fond, une civilisation planétaire va progressivement voir le jour avec la fusion des cultures, le déclin des nations, la disparition de la plupart des 6000 langues parlées actuellement, l'avènement d'une économie mondiale et d'une classe moyenne en pleine expansion avec des niveaux de vie convergents.

Cette tendance à une globalisation et à une unification s'accélérera encore quand on découvrira de la vie en dehors du système solaire poussée par la prise de conscience d'appartenance à une communauté terrestre.

Dans les quelques dizaines d'années prochaines, on verra :

- Les ADN d'une grande quantité d'organismes séquencés, des maladies génétiques ainsi éliminées, l'ADN personnel connu comme l'est notre groupe sanguin.
- La création d'OGM de plus en plus sophistiqués.
- des robots capables d'apprentissage, autonomes et généralisés,
- Des lasers puissants, compacts, minuscules et omniprésents, la télévision 3D, la généralisation de la fibre optique.
- La fusion nucléaire contrôlée (l'énergie du futur devra être bon marché, inépuisable et propre au niveau de l'environnement).
- L'avènement des micro- puis des nano-technologies.
- L'internet généralisé, distribué au niveau de l'individu comme le téléphone; chaque mobile, nous par exemple, étant un nœud du réseau, localisé par GPS.

Dans cet énorme mouvement et sur cette toile de fond dont chaque élément pourrait conduire à une étude spécifique, nous nous limiterons aux apports du spatial.

2. Les frontières actuelles du spatial

2.1. Les lanceurs

Le premier élément du florilège spatial est le lanceur de satellite. En dépit des difficultés à mettre au point les systèmes actuels, n'ayons pas peur de dire qu'ils sont archaïques, trop coûteux et peu fiables. Néanmoins, ces systèmes ont à leur actif la mise en orbite de plus de 4000 satellites, des sondes exploratrices du système solaire, de la mission Apollo d'atterrissage sur la Lune, de la mise en place des stations habitées. Cependant, pour améliorer l'insertion du spatial dans notre société, il nous faut réduire le coût des

lancements d'un facteur dix, augmenter la fiabilité par 100 à court terme et refaire un effort de même ampleur dans 50 ans.

Ceci est une nécessité vitale pour permettre à l'espace de véritablement s'intégrer à la vie du citoyen de la Terre et de promouvoir son utilisation massive.

Ces objectifs ne sont pas accessibles avec les technologies actuelles. On recherche ici une révolution !

Les avions spatiaux sont en cours de développement aux USA. Ils atteignent 100 km d'altitude mais à très faible vitesse et sont encore loin des performances nécessaires à la mise sur orbite d'un satellite ou d'un homme. L'Europe est bien en retard dans ce domaine après avoir, pendant un temps avec les projets HOTOL et Sänger, été en avance au moins au point de vue des projets. Cependant, les techniques ne sont pas encore disponibles et il y a d'abord à faire beaucoup de progrès dans la motorisation, le guidage, la navigation, les structures légères mais réutilisables.

Si ces développements rencontrent le succès espéré et qu'un avion spatial se révèle faisable, il faudra probablement attendre 2020 pour en disposer. Alors, le tourisme spatial naîtra et avec lui une demande forte pour plus de progrès dans la réduction des coûts et l'augmentation de la fiabilité.

Nous reviendrons sur la propulsion plus longuement quand nous évoquerons l'exploration du système solaire et au-delà.

2.2. Les satellites

Les satellites sont le deuxième élément du domaine spatial.

La diversité des missions des satellites est maintenant extraordinaire. Citons :

- La veille météorologique.
- La climatologie, la surveillance des calottes polaires, l'analyse des océans, la mesure des vents.
- L'observation du Soleil ; l'étude et l'exploration du système solaire.
- Les télécommunications et le multimédia.
- La localisation et le guidage par satellite ; GPS ou Galileo.
- L'observation de la Terre et les programmes de prévention et de gestion des catastrophes naturelles.
- La gestion des ressources de la planète.
- La vie dans l'espace avec les stations orbitales MIR puis ISS.
- L'utilisation de la microgravité.

Quelles sont les tendances actuelles ?

D'une part, les satellites de télécommunication deviennent de plus en plus gros et complexes. Ils ont aussi une durée de vie qui s'allonge, tendant vers 15 à 20 ans. Prolonger la vie du satellite au-delà de cette durée n'a probablement pas de sens car les vieux satellites sont dépassés par l'évolution de la technologie. Un satellite de 15 ans d'âge est atteint d'obsolescence et remplacé par un engin plus performant.

D'autre part, dès que c'est possible en fonction des phénomènes physiques impliqués, les satellites deviennent de plus en plus petits et légers, compensant ainsi le coût exorbitant des lancements. Ils accompagnent et s'appuient sur la tendance générale de développement des micro-systèmes électromécaniques. C'est ainsi que, de plus en plus, des satellites de 100 kg sont lancés et que des études sont en cours pour la construction de satellites de 1 kg. On pourrait voir, avant longtemps, des flottilles de micro-satellites, explorant le

système solaire de manière quasi autonome, avec, éventuellement, un satellite relais transmettant les informations vers la Terre.

Par ailleurs, la présence de l'homme dans l'espace requiert d'autres développements passant par la télémédecine, l'adaptation de locaux extrêmement étroits et confinés à la physiologie et à la psychologie humaine avec la contrainte de la microgravité et de ressources limitées imposant le recyclage quasi total.

2.3. Le segment sol

Le troisième volet du segment spatial se trouve au sol. Il s'agit d'abord des stations de réception équipées des grandes antennes paraboliques. C'est un élément très coûteux mais c'est aussi très rentable. Il permet les connections téléphoniques, le multimédia et surtout, actuellement, la diffusion de plus de 10.000 chaînes de télévision sur l'ensemble de la planète. C'est aussi un élément en pleine expansion avec 750 chaînes de télévision de plus chaque année. Ici, pour réduire les coûts et augmenter la rentabilité, la tendance est à la prolifération de l'autonomie. Les systèmes au sol sont coûteux car ils demandent une présence constante d'équipes entraînées, les satellites ayant la propriété de ne jamais s'arrêter de déverser leurs données et d'attendre des ordres. On essaye donc, en ajoutant de l'intelligence et de la mémoire aux satellites, de diminuer les contraintes opérationnelles sur les récepteurs au sol. Les satellites deviennent des robots plus ou moins autonomes, délivrant leur message à la demande, calculant leur position par GPS et sélectionnant parmi le monceau d'information la réponse idoine à la question posée.

3. Les défis du spatial dans les prochaines décennies

Les programmes spatiaux sont actuellement essentiellement sous la responsabilité des nations. Pour cette discipline plus encore que pour les autres, ce découpage, qui implique une atomisation des moyens, n'a pas de sens. Les nations du monde ont en général des visions similaires du futur de leurs activités spatiales et mettre les efforts en commun est non seulement raisonnable mais devient une nécessité économique. Des collaborations se développent à l'instar de la collaboration européenne et, même en dehors de l'Europe, de plus en plus, les pays se regroupent autour de projets ambitieux. Par contre, quand l'activité passe dans le monde économique, la concurrence redevient la norme.

En dehors des applications qui passent progressivement dans le domaine commercial, les objectifs du spatial gérés par les grandes administrations (NASA, ESA, JAXA, ...) peuvent être typiquement distribués en trois grandes catégories :

1. Observer, mesurer, modéliser et gérer la planète Terre
2. Etudier l'origine et l'évolution de l'Univers, explorer le système solaire
3. Rechercher les planètes de type terrestre éventuellement porteuses de vie

3.1. Observer, mesurer, modéliser et gérer la planète Terre

La Terre fonctionne comme un grand système, complexe et dynamique. Il est affecté par des forces extérieures comme le Soleil et est soumis aux variations de l'atmosphère, des océans, des continents, de la vie. C'est un réseau compliqué d'interactions entre tous ces éléments.

Ce que nous recherchons est un moyen de prédire les changements et leurs impacts sur la société. Pour cela, nous avons besoin de deux choses :

- un système de mesure global, précis et diversifié,
- un modèle mathématique supporté par les ordinateurs ad hoc.

Le premier élément auquel nous sommes immédiatement sensibles est certainement la prévision météorologique à court, moyen et plus tard, long terme. Nous atteindrons des prévisions à 2 semaines, dans moins d'une dizaine d'années, avec des probabilités de prédictions correctes raisonnablement élevées. Il devrait être possible de définir des tendances à plus long terme. Par exemple, on devrait, à une année de distance, savoir si l'année suivante sera une année El Niño/La Niña ou si l'été sera caniculaire en Europe, par exemple.

Pour atteindre cet objectif, il faut une capacité de prédiction des changements du système terrestre, alimentée par une architecture d'observation spatiale complète et des superordinateurs traitant des modèles sophistiqués. Avant 20 ans, la capacité de calcul et de mémoire des ordinateurs au silicium sera multipliée par 1000. Ce devrait être suffisant pour les objectifs recherchés ici.

L'impact de prédictions à long terme notamment sur le rendement de l'agriculture devrait être considérable.

Le climat avec son influence sur la végétation et plus généralement sur le cycle de l'eau est essentiel. La disponibilité d'eau douce est déjà un problème actuellement. Ce problème va s'aggraver. Les ressources doivent se gérer à court et à long terme.

Pour cela, il faut un outil déployé au niveau planétaire avec une composante spatiale constituée d'un grand nombre de satellites polyvalents pour l'observation de la Terre, surveillant son atmosphère (température, vents, humidité, composition chimique), ses océans mais aussi son équilibre thermique. C'est ainsi que d'autres satellites seront chargés de la surveillance des apports en énergie du Soleil à notre planète.

L'étude du climat et la prévision météorologique n'est qu'un exemple de gestion de la planète. Il y en a bien d'autres et nous ne citerons que quelques exemples :

- Gestion des catastrophes naturelles comme les inondations, glissements de terrain, tremblements de terre.
- Avertissement des départs de feu dans les zones sèches.
- Mesure de l'évolution du volume des glaces sur le Groenland et le continent antarctique.
- Cartographie des zones urbaines.
- Suivi des migrations.
- Surveillance des cultures, de leur santé mais aussi du respect des normes (indemnités agricoles, culture des drogues interdites).

3.2. Etudier l'origine et l'évolution de l'Univers, explorer le système solaire

Regardant, non plus vers le sol mais vers le ciel, nous serons amenés à continuer à nous poser des questions relatives à l'origine, l'évolution et la finalité de l'Univers. Ce sont évidemment des questions qui nous hantent depuis des millénaires. Nous avons depuis quelques dizaines d'années, les outils qui progressivement nous permettent de répondre à ces questions. Souvenons-nous que c'est seulement :

- en 1927, que Lemaître propose le Big Bang comme explication à l'origine de l'Univers,
- en 1930, qu'on découvre la planète Pluton,
- en 1962, qu'on découvre les quasars.

Ces exemples démontrent que notre connaissance de l'Univers est nouvelle et ne peut représenter qu'un premier balbutiement d'une aventure qui couvrira plusieurs dizaines de milliers d'années. Mais les progrès sont rapides comme le démontrent les figures suivantes prises à seulement 22 ans d'intervalle.

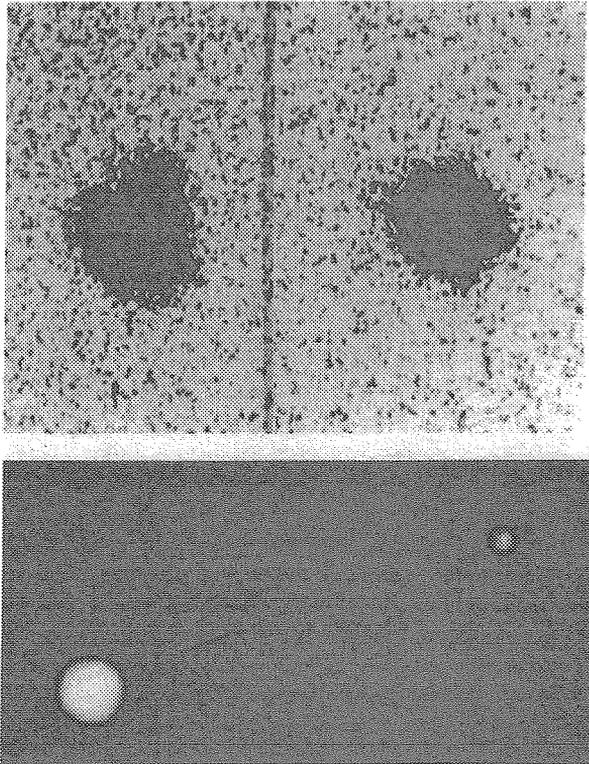


Fig. 1 : (1) : Planète Pluton observée depuis le sol de la Terre. La légère excroissance (au-dessus, à droite) de la figure de gauche a fait supposer à l'existence d'un satellite, Charon, autour de Pluton (1978),
 (2) : Pluton et son satellite Charon observés par le Hubble Space Telescope en 2000.

Le progrès rapide de ces dernières années est le résultat d'une série d'optimisations dans la détection des signaux qui nous viennent de l'Univers :

- Au début du XXème siècle, on détectait un photon sur cent sur une plaque photographique. Nous pouvons maintenant détecter chaque photon individuellement. Nous avons donc atteint la limite théorique des détecteurs de lumière.
- Les télescopes terrestres, grâce à l'optique active, mais surtout les observatoires spatiaux ont un pouvoir de résolution spatial qui atteint les limites théoriques c'est-à-dire, 10 à 100 fois mieux qu'il y a seulement 30 ans (voir la figure 1).

- Les télescopes en orbite travaillent dans toutes les bandes de longueur d'onde observant la matière froide aussi bien que les phénomènes cataclysmiques générant de la matière extrêmement chaude.

Nous avons donc atteint les limites théoriques des techniques qui nous sont familières. Nous devons donc déployer des moyens plus importants ou découvrir des techniques plus subtiles.

Dans le futur, l'European Southern Observatory (l'observatoire européen au Chili) envisage la construction d'un télescope terrestre de 100 m de diamètre, le projet OWL.

Pour l'espace, le successeur du Hubble Space Telescope, le James Webb Space Telescope est en cours de fabrication. Bien qu'il s'agisse d'un engin très complexe, il suit toujours la méthodologie ancienne qui consiste à capter de la lumière sur une surface la plus grande possible (6.5m de diamètre dans ce cas) et à l'analyser en fonction de sa répartition spatiale (imagerie) ou spectrale.

Il faudra, dans les prochaines années, suivre la piste tracée par les radioastronomes, c'est-à-dire, utiliser l'interférométrie dans les longueurs d'onde plus courtes que les ondes radio : IR, visible et UV-X. L'interférométrie combine le rayonnement obtenu par plusieurs télescopes individuels en une seule image. C'est évidemment une tâche d'une difficulté extrême mais qui sera accessible bientôt. Les premiers succès de cette technique ont été obtenus au sol pour des télescopes distants de quelques centaines de mètres. Réaliser un projet d'interférométrie dans l'espace est autrement ambitieux, sans référence stable et avec l'objectif de positionner les télescopes à plusieurs milliers de km les uns des autres avec une précision inférieure à la longueur d'onde de la radiation étudiée. La tâche est de plus en plus difficile en allant vers les courtes longueurs d'onde et il ne fait aucun doute que l'on commencera par l'infrarouge. Pour donner une idée des capacités d'un tel système, une interférométrie en rayons X permettrait de dessiner une carte détaillée d'un trou noir par exemple, en améliorant par plus d'un million la résolution spatiale actuelle.

Dans les recherches prochaines, il reste à préciser la structure du flux lumineux issu du Big Bang, au moment où l'Univers, 380.000 ans après l'explosion initiale, peut fournir les premières informations sur sa structure. Tout ceci est en cours de développement avec plusieurs satellites de diverses provenances et surtout les observatoires Herschel et Planck de l'Agence Spatiale Européenne. L'objectif est ici, en descendant l'échelle de temps, de comprendre la formation des galaxies et de l'Univers tel que nous le voyons mais aussi, en remontant alors l'échelle de temps, de nous donner des informations sur le Big Bang lui-même. Les questions sont aussi hermétiques que perturbantes : par exemple, le Big Bang a-t-il donné naissance à un ou plusieurs Univers ? Qu'y avait-il avant l'explosion et pourquoi a-t-elle eu lieu ? Quelle pourrait être une théorie globale succédant à la théorie de la relativité ?

Par ailleurs, nous sommes en passe d'ouvrir un nouveau champ de recherche par la mise en orbite des 3 satellites du projet LISA. Ce système devrait nous permettre de détecter les grands cataclysmes cosmiques par leur signature en ondes gravitationnelles. Ces ondes dont la théorie de la relativité prédit l'existence n'ont jamais été détectées. Si elles existent, elles donneraient vie à un nouveau type d'astronomie, celui des mouvements de grandes masses et des explosions gigantesques dont l'Univers est le siège fréquent (explosions de supernovae, par exemple). Pour comprendre toute la difficulté de ce projet, il suffit de dire

que les satellites du projet LISA seront situés à 5 millions de km les uns des autres et que les variations de ces distances devront être contrôlées à un cent millièmes de micromètre.

L'exploration du système solaire continue. Les premières sondes Voyager sont toujours actives et approchent des confins du système solaire vers 100 milliards de km du Soleil. La sonde Cassini orbite autour de Saturne et va lâcher dans l'atmosphère de Titan l'atterrisseur européen Huygens. L'exploration de Mars par les robots américains Opportunity et Spirit et par le Mars Explorer européen est en cours. Elle est le début des programmes internationaux dont AURORA est la composante européenne. La sonde Rosetta lancée le 2 mars 2004 va atterrir sur la comète Churyumov-Gerasimenko. Ces quelques exemples montrent que l'exploration du système solaire se poursuit bien mais la tâche est immense. La recherche de la vie dans le système solaire se limite à deux objectifs : découvrir des fossiles sur Mars et, éventuellement de la vie sous les kilomètres de glace recouvrant Europe, le satellite de Jupiter. Cet objectif, d'une difficulté extrême, nécessitera peut-être un siècle d'efforts. Toutes les planètes, à l'exception provisoire d'Uranus et de Neptune, figurent actuellement dans les programmes des agences spatiales.

Le Soleil lui-même fait l'objet de toute notre attention par son impact considérable sur la Terre mais aussi sur tout l'ensemble du système. La survie de nos sondes spatiales est sujette à l'humeur du Soleil et c'est donc un élément d'intérêt pour nous. Le mécanisme du Soleil n'est pas compris suffisamment. Une mission visant à satelliser une sonde Solar Orbiter, proche du Soleil est aussi prévue. La zone centrale du système solaire est intéressante à explorer mais combien difficile. Elle impose la construction d'instruments résistant à des centaines de degrés et donc des défis technologiques nouveaux et ambitieux.

En parallèle, nous entreprendrons la conquête humaine du système solaire, d'abord en extrapolant l'aventure actuelle, avec des engins robotisés, ensuite, en reprenant le cours de l'exploration de la Lune où nous l'avons laissé et en y renvoyant des hommes.

Une base lunaire permanente sera mise en service dans une quinzaine d'années. Plusieurs nations : USA, Europe, Russie, Chine et même Inde ont dans leur programme un retour sur la Lune. La difficulté sera probablement de faire collaborer ces nations au-delà des notions de prestige et d'idéologie.

La Lune ne doit être qu'une étape vers l'exploration du système solaire et d'abord de Mars. Cette planète, pas trop inhospitalière, doit servir de banc d'essai et d'apprentissage avant d'autres aventures plus délicates et plus lointaines comme les satellites de Jupiter, par exemple. La planète Mars devrait être atteinte dans les années 2030 et une base permanente pourrait y exister vers 2050. La suite dépend de notre ambition et de notre pugnacité. Les objets du système solaire sont nombreux et variés. Ils s'imposent chacun comme autant de défis et devraient satisfaire nos besoins d'exploration et d'aventure pour plusieurs siècles. Ensuite, les étoiles nous attireront inévitablement.

3.3. Rechercher les planètes de type terrestre éventuellement porteuses de vie

L'évolution de l'humanité passe inévitablement par la recherche puis la découverte de formes de vie en dehors de la Terre. La matière vivante n'est qu'une des formes de la matière mais évidemment la plus importante pour nous.

L'Univers est vieux de 13.7 milliards d'années. Comme on le sait, l'Univers se complexifie de plus en plus depuis le Big Bang et la matière vivante est peut-être le degré

ultime de complexité atteint actuellement dans l'Univers. Sur la Terre, la matière vivante évolue elle-même vers des formes de plus en plus compliquées et ce depuis 3.8 milliards d'années. Par rapport à ces durées, la longueur d'une vie humaine est négligeable. Dès lors, on comprend bien que le traitement de l'échelle de temps va être pour nous un problème difficile. La matière vivante devrait normalement être très largement répandue dans l'Univers. Par contre, des êtres intelligents et plus encore des êtres au même stade de développement que nous sont, sans nul doute, très exceptionnels. L'Univers nous ayant habitué à être bien plus diversifié et complexe que nous ne le pensions, les formes de vie y sont probablement très étranges et dépassent notre imagination. Les moyens de communication et de détection les plus évidents pour des civilisations avancées devraient aussi être très différents de ceux qui nous sont familiers. Malgré nos efforts, nous avons probablement peu de chance d'entrer en communication avec des vies extraterrestres alors que notre développement est encore si embryonnaire.

Soyons donc modestes et rappelons-nous les paroles de Christian de Duve : « s'il est une leçon que l'on peut retenir de l'histoire de la vie, c'est que nous n'en sommes presque certainement pas l'aboutissement ou le couronnement,... ».

Nous rechercherons donc d'abord, autour des étoiles voisines, les planètes et principalement les planètes de type terrestre, puis parmi celles-là, celles qui comportent de l'eau liquide puis enfin nous essayerons de détecter la présence d'oxygène et plus précisément d'ozone, les produits de la vie. Ceci devrait être accompli sinon très avancé avant 30 ans.

Les technologies d'interférométrie devraient nous permettre, dans un siècle peut-être, quand nous pourrions satelliser des réflecteurs de plusieurs dizaines de mètres de diamètre travaillant ensemble à quelques dizaines de milliers de km les uns des autres, de cartographier les continents des planètes gravitant autour des étoiles voisines. Ce serait évidemment une avancée majeure mais notre nécessaire humilité doit nous rappeler qu'il y a 100 milliards d'étoiles dans notre galaxie qui elle-même n'est qu'une parmi 100 milliards de galaxies. L'ensemble est géométriquement immense. Ainsi en est-il de l'échelle de temps. Même si la vie est communément distribuée dans cet Univers, les chances de découvrir une civilisation de même état d'avancement que nous sont actuellement infimes.

4. Les outils spatiaux du futur

Tous ces défis ne pourront être relevés que si nous développons les technologies et les outils nécessaires. Nous devons faire des progrès dans tous les domaines, ces progrès étant eux-mêmes sources de bien-être sur la Terre.

Reprenons dès lors, les différents items du florilège spatial en examinant à plus long terme quelle pourrait être leur évolution.

4.1. Les systèmes de lancement

La mise en orbite terrestre est l'élément clé de tout le spatial. C'est aussi l'élément le plus faible du secteur; c'est donc celui sur lequel doivent porter le plus de recherches. Or, depuis les premiers âges du spatial, les lancements se font toujours par des moteurs chimiques à réaction : fusées à carburant liquide ou solide. Le rendement des fusées est en augmentation mais on doit approcher maintenant d'un optimum. Les plus grosses fusées sont capables de satelliser en orbite basse des charges de 10 à 20 tonnes. C'est évidemment

déjà beaucoup pour un satellite de la Terre mais quand il s'agit, soit de construire une station orbitale soit de préparer un train d'éléments pour emmener des astronautes sur Mars, par exemple, c'est dramatiquement peu. Le montage en orbite devient incontournable, ce qui n'est pas trop critique en soi mais le coût totalisé des lancements devient lui-même prohibitif. On pense qu'un train minimum pour emmener trois hommes sur Mars devrait peser dans les 1000 tonnes !

Il serait surprenant que l'on puisse encore beaucoup alléger la structure des fusées et synthétiser des carburants beaucoup plus efficaces. Donc les masses satellisables ne vont pas augmenter considérablement dans les prochaines décennies.

Par ailleurs, on étudie bien au Lawrence Livermore National Laboratory une rampe de lancement électromagnétique, sorte de catapulte de 5 km de long sur laquelle les objets sont poussés par une onde progressive comme dans un accélérateur de particules mais les chances d'aboutir et surtout de généraliser ce mode de lancement pour des objets sophistiqués est proche de zéro tant l'échauffement subi par le corps en mouvement rapide dans les basses couches de l'atmosphère est considérable.

Un avion transportant une fusée à un seul étage est probablement une solution rationnelle et rapidement accessible mais pas encore satisfaisante car manquant de souplesse.

La faisabilité de l'avion spatial n'a pas été démontrée mais les progrès dans ce sens sont rapides et spectaculaires. Les premiers avions spatiaux atteignent 100 km d'altitude mais avec une vitesse faible. Il nous faut aller un peu plus haut mais surtout beaucoup plus vite.

Dans le domaine, le concept le plus innovant et le plus futuriste est celui de la tour et de l'ascenseur.

D'abord imaginé par Konstantin Tsiolkovsky en 1895, puis repris par Y.N. Artsutianov ("*Dreams of Earth and Sky*", 1960), le concept a été popularisé par A.C. Clarke dans "*Fountains of Paradise*", 1979.

Il s'agit d'une station en orbite géostationnaire à 36.000 km d'altitude, reliée au sol par une cage d'ascenseur. Ce projet qui semble ne relever que de la science fiction intéresse néanmoins les sociétés américaines spécialisées dans les ascenseurs pour gratte-ciel et de premières études par ces sociétés pourraient démarrer rapidement.

La difficulté de réalisation vient de la cage d'ascenseur pour laquelle aucun matériau actuel n'est assez résistant. L'évolution des nanotubes de carbone donnera peut-être une nouvelle impulsion à cette idée. On ne peut espérer voir cette réalisation, qui pose des problèmes d'ingénierie extraordinaires, avant plusieurs siècles. Cependant, c'est le système idéal car il réduit les coûts de mise en orbite à des sommes dérisoires.

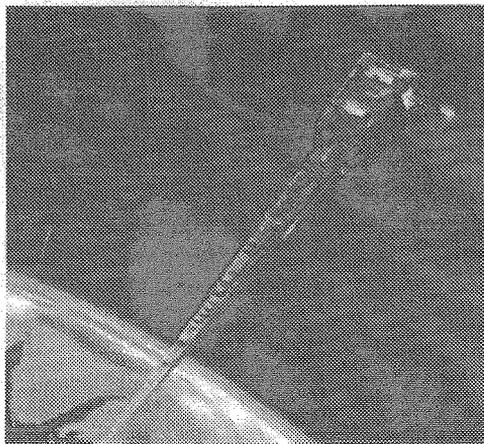


Fig. 2. : Concept de la tour et de l'ascenseur pour atteindre l'orbite géostationnaire.

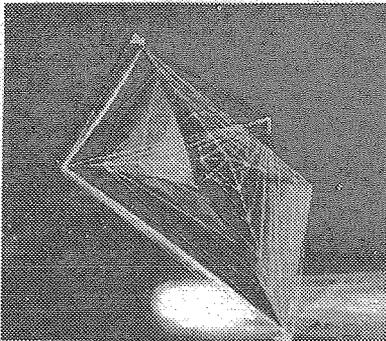
4.2. La propulsion dans l'espace

Depuis quelques années de nouveaux concepts voient le jour et d'abord les moteurs à propulsion électrique. Ceux-ci ionisent du gaz Xénon éjecté par action électromagnétique vers l'arrière du véhicule. L'intérêt du système réside dans la grande vitesse d'éjection des ions et dans l'autonomie des véhicules. La poussée, malheureusement extrêmement faible, peut être soutenue pendant des milliers d'heures. Cependant, le carburant constitue toujours une part importante de la masse du véhicule. L'énergie nécessaire à la production et à l'éjection des ions doit être actuellement fournie par des panneaux solaires et ne peut fonctionner que dans la partie centrale du système solaire. Dès qu'il s'agit de dépasser l'orbite de Jupiter, il faut une source d'énergie radioactive ou nucléaire.

Une autre possibilité est d'utiliser les voiles. Ce système a l'avantage d'éviter l'emport de carburant. Les voiles sont propulsées soit par la lumière solaire soit par la lumière laser. Des voiles de 10 à 20 m sont actuellement testées en Russie, aux USA et au Japon.

Pour être efficaces, elles doivent avoir des dimensions qui se chiffrent en km^2 avec des épaisseurs de l'ordre du micron. On est évidemment encore loin de ces spécifications.

Fig. 3 : Voile (gauche) et ramjet (droite)



Comme pour les panneaux solaires photovoltaïques, la propulsion induite par l'impulsion transmise par la lumière solaire ne fonctionne qu'au voisinage du Soleil. Par contre, la faible divergence des faisceaux laser permet d'entrevoir leur application jusqu'aux dernières planètes du système solaire.

En améliorant ces différents systèmes et en étant très patients car les déplacements seront lents, on devrait pouvoir explorer ainsi toutes les planètes du système solaire.

Sortir de cette zone, pour atteindre les étoiles voisines, nécessite une autre approche. Il faut en effet atteindre des vitesses qui soient des fractions conséquentes de la vitesse de la lumière.

La vitesse d'une navette spatiale étant de 28.000 km/h et 10 % de la vitesse de la lumière étant 108.000.000 km/h, on conçoit immédiatement l'immensité de la tâche. A priori, on ne peut plus supposer que l'on emmène le carburant dans le véhicule. Il n'y a plus que deux options : être propulsé par une force extérieure comme les voiles poussées par des lasers

situés dans le centre du système solaire et alimentés en énergie par le Soleil ou collecter son carburant au fur et à mesure de sa progression. Ce dernier mode a été étudié. Il s'agit de la propulsion statoréacteur ou ramjet. L'hydrogène interstellaire est capté par un gigantesque entonnoir et transformé partiellement en énergie par un procédé de fusion nucléaire.

Ces différents systèmes sont encore plus proches de la fiction que de la science.

4.3. La colonisation de l'espace

La Station Spatiale Internationale (ISS) est la préfiguration d'une station habitée, permanente, gravitant autour de la Terre. Elle est elle-même l'aboutissement d'une série d'habitations spatiales dont la première : Salyut-1 fut lancée par l'Union Soviétique en 1971. Elle fut suivie par plusieurs autres. Retenons pour l'importance qu'elle a eu, la station MIR placée en orbite en 1986. MIR est restée pratiquement continuellement habitée pendant 15 ans jusqu'à sa rentrée dans l'atmosphère en 2001. La construction de l'ISS a été décidée par les Etats-Unis en 1984.

C'est évidemment un projet très ambitieux. Ce fut aussi un plan pour l'emploi en faveur de la Californie atteinte par la réduction des frais d'armement à la suite de la chute du mur de Berlin, le 9 novembre 1989 et cette caractéristique fragilise maintenant le projet par l'absence d'une ligne de développement directrice forte. La construction de l'ISS a le mérite d'impliquer 16 nations et de mettre en place des liens de collaboration internationale mais a aussi l'inconvénient de ne pas résulter d'un programme de développement basé sur le long terme. La pression industrielle diminuant, la motivation pour terminer la station se dilue donc en parallèle.

Dans quelques années, une base permanente sera opérationnelle sur la Lune. Dans ce domaine, tout doit être inventé et ce n'est pas étonnant que l'évolution nous paraisse lente. Beaucoup plus tard, une base permanente sera aussi installée sur Mars. En dehors d'une pléthore de problèmes techniques, la résistance humaine au confinement dans un espace étroit, la survie à long terme sur des planètes de gravité différente sont des éléments délicats à appréhender. Il est probable qu'après une ou deux générations l'espèce humaine se diversifie pour s'adapter à ces conditions. L'adaptation génétique dirigée, semblable à ce qui est décrit par A. Huxley dans « Le Meilleur des Mondes » est également une possibilité mais qui passe par une révolution philosophique. Néanmoins, progressivement, l'espèce humaine colonisera le système solaire consolidant par là sa survie en tant qu'espèce. En effet, un jour ou l'autre et inévitablement, la Terre entrera en collision avec un corps céleste de taille majeure et notre survie dépendra :

- soit de notre capacité à éviter la collision ce qui ne sera pas faisable avant plusieurs décennies,
- soit de notre présence ailleurs que sur la Terre d'où l'espèce pourra continuer son histoire.

4.4. L'énergie et la puissance

Dès à présent, un point est acquis concernant l'énergie. L'exploration spatiale ne fera pas l'économie de l'énergie nucléaire. Les générateurs d'électricité demandent l'emploi au minimum de radio-isotopes. Pour des quantités d'énergie plus importantes, des mini-centrales nucléaires sont nécessaires. Des prototypes de centrales à l'uranium existent qui

seront prêts à être déposés sur la Lune et sur Mars. Dès que la fusion nucléaire sera maîtrisée, des réacteurs basés sur ce principe fourniront la source d'énergie nécessaire à la propulsion spatiale. L'énergie dégagée et l'impulsion spécifique résultante ne seront cependant pas suffisantes pour atteindre les étoiles les plus proches en des temps raisonnablement courts. Dans un futur très lointain, il pourrait être possible de fabriquer et d'emmener de l'antimatière. L'impulsion spécifique qui en résulterait serait énorme et probablement permettrait d'envisager les voyages interstellaires. Cependant, nous ne sommes capables de produire actuellement que des nanogrammes d'anti-hydrogène. Nous ne pouvons extrapoler à partir d'acquis aussi ténus.

4.5. Les ordinateurs et les communications

Dans ce domaine et suite à la pression économique, la réalité dépasse la fiction. Des ordinateurs 1000 fois plus puissants que ceux du début du siècle seront disponibles dans 20 ans, c'est-à-dire, demain. L'intérêt de cette évolution est notamment qu'elle se produit sans induire de gigantisme. L'extrapolation des ordinateurs de première génération conduisait à des machines puissantes mais géantes, consommant des quantités faramineuses d'énergie, tels ceux imaginés par les auteurs de science fiction. Or, nos ordinateurs se miniaturisent tout en gagnant en puissance. Le processeur d'un GSM est bien plus puissant que la machine sur laquelle on calculait des modèles d'étoiles dans les années 1950 et qui alors remplissait un bâtiment entier. Nous ne pouvons actuellement imaginer avoir besoin de plus de puissance de calcul et de mémoire puisque ces ordinateurs des années 2020 pourront stocker l'ensemble des connaissances et réalisations humaines. Néanmoins, nous avons encore des possibilités d'étendre nos capacités par de nombreux facteurs 10, nous rapprochant progressivement des capacités et des modes de fonctionnement de notre cerveau. Cette évolution fera certainement appel aux biotechnologies. L'ordinateur personnel deviendra alors invisible tant il sera miniaturisé. Les engins spatiaux disposeront alors à bord d'une puissance de calcul énorme, au service d'une autonomie quasi totale, dépendant d'un ordinateur d'un format semblable à celui d'une carte de visite, pesant quelques grammes et consommant quelques watts.

Les communications sont un autre goulot d'étranglement de l'exploration spatiale. Dans l'état actuel de nos connaissances en physique, les communications sont rendues difficiles voire impossibles à longue distance par la vitesse de la lumière. Bien que grande, cette vitesse est déjà insuffisante pour des contacts à travers le système solaire. A ce problème nous n'avons pas, dans l'état actuel de nos connaissances en physique, la moindre amorce de solution. Si cette limite imposée par la théorie de la relativité est incontournable, un déplacement de quelques années dans l'Univers conduira à une perte définitive de contact et on assistera à un essaimage de l'espèce humaine plutôt qu'à une conquête structurée et contrôlée.

4.6. Les robots

Beaucoup d'encre a coulé à propos des robots. Le terme lui-même ne date que de 1921 mais les robots sont simplement des successeurs des automates des siècles précédents. Il faut admettre que les espoirs mis dans les robots domestiques ou industriels, il y a quelques années, ne se sont pas concrétisés aussi rapidement qu'espéré. La raison en est simple. Les robots des années 60-80 suivaient un programme préétabli. Ils ne sont donc bons qu'à des tâches répétitives telles qu'on les connaît sur les chaînes de montage des voitures. Le

premier robot commercial a été mis en service en 1956. Il a été suivi de millions d'autres chargés de tâches de routine. Les robots étudiés actuellement dans les laboratoires sont d'une toute autre nature. Capables d'apprentissage, ils seront adaptables. Capables de décoder et de reproduire la voix humaine, ils seront conviviaux. Comme ils pourront être miniaturisés et rendus moins sensibles que les humains aux conditions adverses de l'espace, ils traceront les pistes. Un robot mobile se déplaçant sur deux jambes est actuellement sans intérêt dans l'espace. Par contre, un robot capable de s'ausculter et de se réparer, d'estimer et d'apprendre, de gérer ses erreurs est incontestablement intéressant dans l'espace. Rien n'empêche qu'une telle intelligence artificielle ne se déplace sur un véhicule à roues explorant les surfaces planétaires. Secondairement, le robot devrait induire une évolution de la télévision en permettant, par réalité virtuelle, aux humains tranquillement assis dans leur fauteuil et voyant par les yeux du robot, de se promener sur les planètes du système solaire. Combinant les progrès de la robotique avec ceux des nanotechnologies, on en arrive au concept de micro-véhicules, éventuellement volants, qui à la manière des insectes effectueraient des observations et des explorations.

5. Conclusions

Au moment de conclure, on ne peut éviter de mettre en exergue les deux éléments suivants qui n'ont pas été envisagés mais sont essentiels :

- Le coût de tous ces développements est évidemment considérable. Comme point de comparaison, rappelons que la Station Orbitale Internationale coûte 75 milliards d'euros. Il n'y a pas de raison particulière pour que les budgets spatiaux soient augmentés fortement dans le futur. La capacité d'exploration sera donc plafonnée par la progression de la croissance mondiale, voisine de 2% par an. Après quelques siècles, c'est évidemment une augmentation très importante mais en attendant, il faudra limiter les ambitions en développant les technologies et en étalant les programmes.
- Le caractère conservatoire de tout ce qui précède est malheureusement évident. En effet, la plupart des avancées envisagées ci-dessus sont déjà dans nos cartons, pilotées qu'elles sont par la recherche fondamentale du siècle dernier. Or, nous nous trouvons actuellement face à une révolution biotechnologique dont nous ferions bien d'intégrer les éléments dans notre réflexion prospective. Dans un siècle, nos découvertes bouleverseront tout le schéma ci-dessus mais il est hasardeux de prévoir les progrès et plus encore les freins possibles.

La vie a évolué sur la Terre depuis 3.8 milliards d'années, poussée par des mécanismes naturels selon le processus deviné par Charles Darwin. Nous faisons partie de ce processus mais pour la première fois sur la Terre et maintenant seulement, des êtres issus du processus sont capables de le contrôler. Il y a quelques millénaires, nous avons augmenté notre capacité physique en nous faisant aider par les animaux domestiques. Depuis l'avènement des moteurs, cette capacité s'est considérablement accrue : nous nous déplaçons à 100 km/h, nous volons à 1000 km/h, nous traversons l'espace à 10 km/s, nous soulevons des charges de plusieurs tonnes, etc. Notre capacité intellectuelle est maintenant améliorée par notre relation avec les ordinateurs. En une seconde, nous communiquons avec l'autre côté de la planète et avec des millions d'interlocuteurs. Nous avons faim, soif, chaud, froid,... ; cette période se termine. Nous sommes encore malades mais bientôt nous

n'en aurons plus que le souvenir. Les pressions de l'environnement, moteurs de l'évolution naturelle, disparaissent donc pour l'homme moderne. L'évolution naturelle de l'Homo Sapiens va s'arrêter pour faire place à l'évolution induite et à l'HGM : l'Homo Génétiquement Modifié ! Déjà nous remplaçons nos organes défectueux par des prothèses puis par de vrais organes, identiques mais en bon état. Nous savons qu'il ne faudra plus longtemps pour que nous soyons tentés, à l'instar des sportifs qui se dopent, d'améliorer ces organes. Après des débuts inévitablement modestes où nous soignerons d'abord nos maladies génétiques, nous serons portés à nous améliorer génétiquement. Nous n'avons pas la moindre idée de ce que sera cet HGM mais, en supposant, par exemple, que nous soyons capables d'augmenter de 20% le volume de notre cerveau, tout ce qui précède sera frappé d'obsolescence. Cet être nouveau, capable d'autres perceptions et d'autres ambitions, pourra concevoir des choses à jamais complètement étrangères à l'humain que nous sommes.

Les outils du futur seront d'abord modelés par les technologies qui sont déjà présentes à l'état embryonnaire dans nos laboratoires mais seront révolutionnés par les progrès de la biotechnologie en attendant que nous ayons la capacité de nous modifier nous-mêmes et de construire notre évolution artificielle. La conquête de l'espace nous paraîtra alors une voie aisée et naturelle nous permettant de nous confronter à des défis nouveaux jusqu'à que nous y rencontrions d'autres êtres intelligents. Mais ceci est une autre histoire.

Références

Michio Kaku : « Visions. Comment la science va révolutionner le XXIème siècle », Albin Michel, 1997

Daniel S. Goldin : « The Frontiers of Possibilities », International Astronautical Foundation, 2000

John E. Allen ; « Quest for a novel force : a possible revolution in aerospace » ; in Progress in Aerospace Sciences 39, 1, 2003

ESA BR-176 ; « Innovation Technologies from Science Fiction for Space Applications », 2001

Christian de Duve : « La Saga de la Vie », présenté aux Biennales de la Poésie 2003

Sites Internet :

esa.int

nasa.gov

map.gsfc.nasa.gov

solcomhouse.com

Auteur : Claude Jamar, Centre Spatial de Liège, Avenue du Pré-Aily, B-4031 ANGLEUR