

# MARS, ROSETTA, ÉMERGENCE DE LA VIE : CONTINGENCES ET GÉNÉRICITÉS

*(La place du générique et du contingent dans l'évolution)*

Jean-Pierre Bibring (Astrophysicien à l'Institut d'astrophysique d'Orsay) a donné une conférence le 6 mars 2018 dans le cadre des conférences organisées par le Bureau des Longitudes. Elle avait pour titre : *Mars, Rosetta, émergence de la vie : contingences et généricités*. Nous vous proposons un compte-rendu de cet exposé particulièrement riche.

**P**endant longtemps, l'unicité de la Terre et de la vie était admise tant dans l'espace que dans le temps. Les choses se modifient à partir du début des vols spatiaux. Sur Terre, on considère habituellement qu'il n'y a qu'un chemin et qu'il progresse nécessairement selon un processus de complexité sans cesse croissante. Il y a comme une pyramide qui arrive nécessairement au vivant : au départ il y a le Big-bang, puis les atomes, les molécules, les molécules organiques, le vivant, ce dernier conduisant ...au cerveau humain. Cette vision génère celle de la « pluralité des mondes ».

## Quelques points de repère historiques

**Hipparque** (-150) et **Ptolémée** (+150) : la Terre est unique et centrale ; cette idée perdure jusqu'à Copernic.

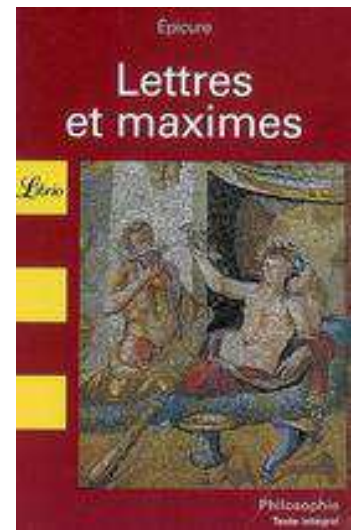
**Copernic** (1543) : les planètes tournent autour du Soleil.

**Giordano Bruno** (1548 – 1600) : l'Univers est infini, les étoiles et les planètes sont de même nature. Il y a une infinité d'étoiles et donc une infinité de terres.

Dans cette vision, la Terre est affreusement banale, il y en a partout et donc il y a de la vie partout dans l'Univers. Notons que, avant lui, Épicure (en 305 avant notre ère !) écrivait déjà dans sa lettre à Hérodoté :



« *Ce n'est pas seulement le nombre des atomes, c'est celui des mondes qui est infini dans l'univers. Il y a un nombre infini de mondes semblables au nôtre et un nombre infini de mondes différents. En effet puisque les atomes sont en nombre infini, comme nous l'avons dit tout à l'heure, il y en a partout, leur mouvement les portant même jusque dans les lieux les plus éloignés. Et d'autre part, toujours en vertu de cette infinité en nombre, la quantité d'atomes propres à servir d'élément, ou, autrement dit, de causes, à un monde, ne peut-être épuisée par la constitution d'un monde unique ni par celle d'un nombre fini de mondes, qu'il s'agisse d'ailleurs de tous les mondes semblables au nôtre ou de tous les mondes différents. Il n'y a donc rien qui empêche l'existence d'une infinité de mondes* ».



Pendant quatre siècles, on va garder la vision de Copernic et Galilée : il n'y a rien de spécifique chez nous sur Terre.

**Galilée** (1610) montre qu'autour de Jupiter il y a des objets qui se déplacent. Il n'y a donc pas qu'autour du Soleil que les choses tournent. Le mouvement est une propriété générique dans l'espace.

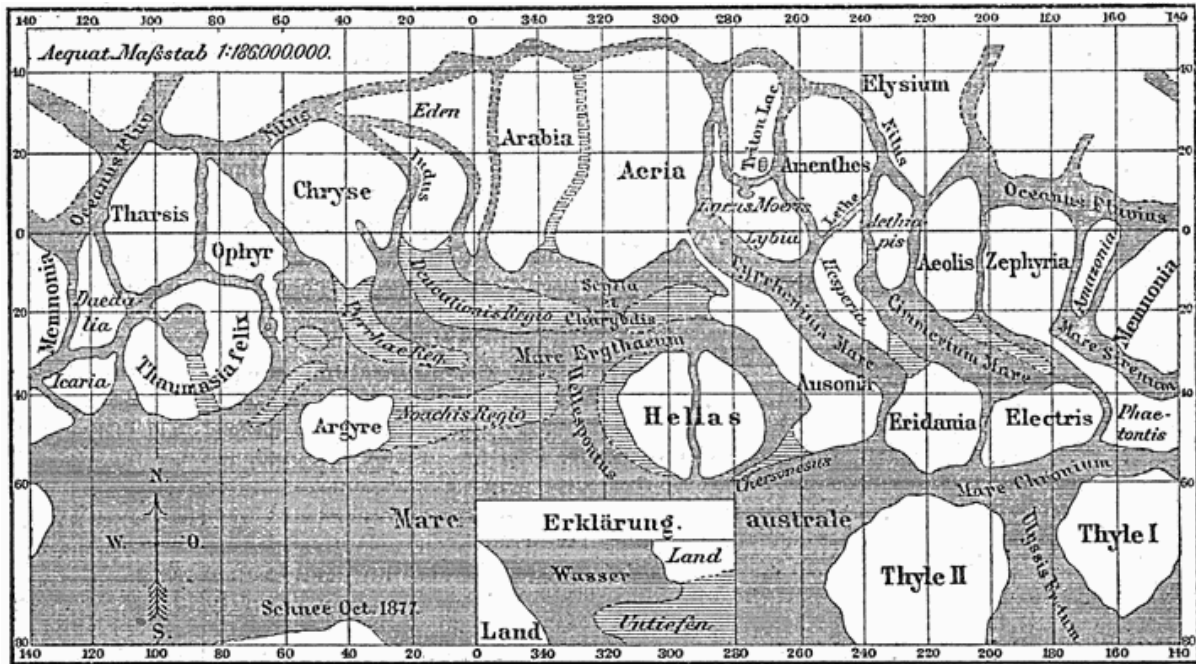
**Kepler** (1618) : les trajectoires des planètes sont elliptiques.

**Newton** (1687) : le mouvement des astres est une propriété universelle, le cosmos est le lieu de l'uniformité des lois. Ce cosmos bien ordonné des Grecs devient l'Univers régi partout par des mêmes lois qui sont universelles. (UNIVERSelles)

Avant l'ère spatiale, faute de contraintes observationnelles fortes et de possibilités de mettre en œuvre une démarche réellement prédictive, l'interprétation des observations était faite en référence première à des dogmes. Aujourd'hui on baigne encore dans un de ces dogmes : celui de la « *pluralité des mondes* » de Giordano Bruno. Quatre siècles plus tard on en fait la vérification. Aujourd'hui l'essentiel de la cosmologie repose sur l'idée que la généralisation des mêmes lois implique nécessairement la généralisation de la vie elle-même.

### **De l'unicité à la diversité ? La Terre est-elle unique ou générique ?**

Avant l'ère spatiale, la planète Mars est un monde considéré non seulement « *habitable* » mais comme habité. Toutes les observations étaient interprétées dans ce sens. L'exemple des canaux de Mars par Schiaparelli (1877) est typique. On imagine que la population qui vit sur Mars habite près de l'équateur alors que l'eau, sous forme de glace, est située près des pôles. Il faut donc des canaux pour ramener l'eau vers l'équateur...



**Les canaux sur Mars vus par Schiaparelli (1877)**

La tendance est d'aller retrouver ailleurs ce que l'on trouve chez nous.

En 1976, les sondes Viking sur Mars devaient caractériser le *métabolisme martien*, on pensait que la vie était une propriété générique. S'il y avait de la vie ailleurs, Mars était probablement l'endroit le plus favorable pour aller la chercher. Il y a encore des personnes qui ne sont pas convaincues qu'il n'y a pas de vie sur Mars.

Le cas de Titan le plus grand satellite de Saturne était intrigant car son atmosphère était invisible avec des instruments d'optique depuis la Terre. C'était le seul objet dans le système solaire où l'on aurait pu s'attendre à trouver de l'eau liquide à sa surface. Par spectroscopie, on enregistrait une importante raie d'absorption à 3.1 micromètres qui correspond au méthane. On ne détectait que du méthane alors que l'on sait maintenant qu'il n'est présent que pour 1 %, le reste étant constitué de diazote. L'idée de voir du vivant identique à celui que nous connaissons dans le système solaire en dehors de la Terre s'est effondrée de nos jours.

Actuellement on considère que la Terre est une planète des plus banales, non générique, la Terre est unique. L'exploration spatiale du système solaire et la caractérisation des exoplanètes engendrent une vraie révolution de notre représentation sur l'évolution des mondes planétaires, tout spécialement de la Terre et du vivant dont elle abrite l'évolution.

## L'ère de l'exobiologie

L'exobiologie consiste à priori en recherche de traces :

- des processus menant au vivant. Dans l'ère préscientifique il y avait la Création (quelqu'un l'a voulu, donc ça suffit) puis il y a eu l'évolution qui permet l'adaptation.
- des ingrédients nécessaires au vivant (eau, carbone, phosphates...)

Voir la vie c'est en quelque sorte voir des vivants. Il y a souvent une confusion entre l'homme et la vie. On retrouve cela avec le programme SETI qui cherche des signaux venus d'ailleurs, après les soucoupes volantes... La rupture apparaît lorsque l'on a pu développer une démarche exo-biologique, prédictive c'est-à-dire scientifique qui permette de passer de l'observation à la représentation. Entre les deux il y a beaucoup d'étapes à franchir : collecte d'un signal, mise en forme, traitement, interprétation, représentation. Chaque étape fait appel à des métiers distincts, à des compétences différentes et complémentaires. Une représentation n'a de sens que si elle débouche sur une prédiction observationnelle, elle doit se reboucler par une observation qui va infirmer ou valider l'hypothèse. La démarche scientifique c'est vraiment cette boucle que l'on met en place.

Les échantillons lunaires (missions Apollo) ont modifié profondément notre vision de la Terre et des mondes planétaires. Cette vision permet de réfuter la « *théorie catastrophique* » de Buffon et de valider la théorie de la « *nébuleuse d'origine* » introduite par Laplace (1796). En fait les voyages spatiaux ont montré la grande variété des mondes planétaires, qui se révèlent très différents de ce que l'on imaginait. On observe une diversité inédite. Comment passer de l'effondrement d'une nébuleuse à des systèmes aussi divers ?

## Le cas de la Terre, un cas particulier

On s'aperçoit que la couverture océanique n'est pas du tout triviale. Il faut des conditions très particulières pour que l'eau soit stable. Pour que l'eau devienne un nuage, il n'y a pas que de la thermodynamique à prendre en compte ; il faut surtout qu'il y ait des germes de nucléation sinon ce sera la surfusion. On ne sait pas ce que sont ces germes, s'ils proviennent de débris de comètes ou des traces du rayonnement cosmique. On ne connaît pas non plus la constante de temps nécessaire pour que le processus se mette en place. On comprend maintenant que la Terre a bénéficié d'un processus tout à fait particulier.

*La vie a-t-elle pris naissance ailleurs que sur la Terre ?*

Est-ce que le vivant est quelque chose qui s'est adapté à l'évolution de la Terre telle qu'elle est ? Ou bien est-il suffisamment robuste pour avoir pu s'adapter à d'autres évolutions ?

En 1990 on s'est aperçu qu'il y a un siècle, H. Poincaré avait parlé du chaos. Les lois ont

beau être les mêmes partout vous ne pouvez jamais prévoir l'avenir. Le système considéré n'est jamais isolé. Des perturbations peuvent modifier les conditions initiales et le système aura une évolution qui ne peut-être prédictible. Jacques Laskar a montré que la Lune jouait un rôle essentiel dans l'évolution de la Terre. En particulier en stabilisant l'obliquité de la Terre à une valeur proche de 23°. S'il n'y avait pas la Lune, l'obliquité de la Terre varierait comme pour les autres planètes ; par exemple les pôles pourraient se retrouver face au Soleil ce qui ne serait pas sans conséquence !

On arrive à cette conclusion : La Terre apparaît de plus en plus comme unique.

*« Il y a une origine commune de faits, une séquence de processus, à l'origine d'une variété d'ingrédients, dans lesquelles la diversité des chemins d'évolution prend naissance. »*

### **La généricité**

Est-ce que le vivant est lié à la Terre ou non ? Actuellement on connaît environ 4 000 exoplanètes et les degrés de diversité sont considérables, inédits. Il y a une infinité de cas possibles.

À partir d'une origine commune on parvient à une grande diversité des mondes.

À partir de l'universalité des lois on assiste à une généricité (structures, lois) des processus.

Par la diversité des formes prises, il apparaît une spécificité contingente de l'évolution.

L'évolution du système solaire a permis que soient préservées des traces de l'ensemble des étapes qui l'ont jalonnée.

L'astrophysique contemporaine tente de reconstruire la séquence des processus qui mènent de l'effondrement turbulent d'un nuage interstellaire à la formation des systèmes stellaires et à l'émergence de la vie, sur des planètes « terrestres ». Dans cette planétologie comparative, Mars, les comètes et les astéroïdes jouent un rôle majeur. Ce sont les mêmes processus partout, ils sont génériques, ce sont les mêmes interactions, les mêmes chocs, la même diversité des formes. Ce qui compte ce ne sont pas les processus, c'est la forme que prennent ces processus qui vont forger autant de chemins d'évolution, tous équiprobables quelque part. Nous sommes aujourd'hui au cœur d'une profonde révolution de notre représentation de la Terre, de l'espace et du temps, de son histoire et de son évolution ; à toutes ces échelles de temps, elle irrigue des pans entiers de l'activité humaine.

### **Les grandes lignes du processus**

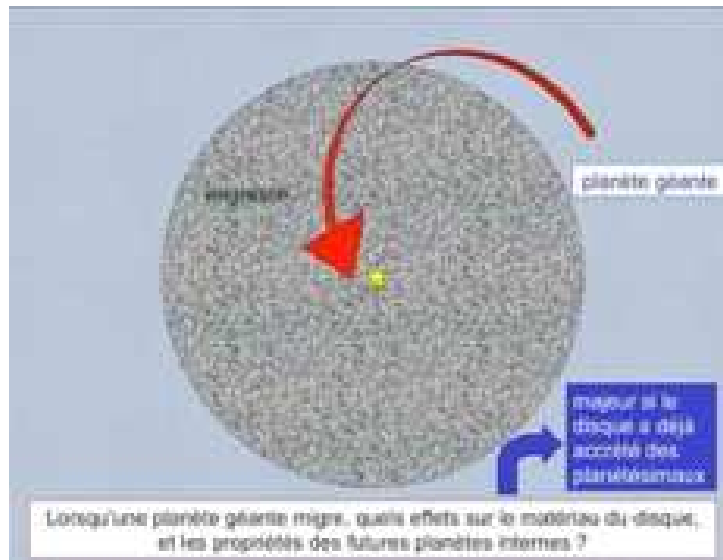
On part de l'effondrement d'un nuage.

#### **1ère phase : les collisions**

Elles provoquent l'accrétion des cométésimaux et des planétésimaux. La forme dominante

solide est la glace dès que celle-ci est stable. Les planètes géantes se forment à l'extérieur de la « *ligne des glaces* » (1) car pour accréter du gaz il faut avoir un gros noyau et pour avoir un gros noyau il faut qu'il se forme vite, là où la glace est stable donc loin de l'endroit où se forme la protoétoile.

## 2ème phase : la migration planétaire



Cette histoire de migration est apparue avec la découverte des premières exoplanètes. En 1995 Michel Mayor et Didier Queloz découvrent la première exoplanète. Celle-ci tourne autour de son étoile (51 Peg) en 4,23 jours terrestres ; sa masse est considérable 0,46 fois la masse de Jupiter (la plus grosse de notre système solaire). Après coup on comprend facilement que pour bousculer son étoile il fallait une grosse planète proche. Mais comment une planète aussi massive peut-elle se trouver si proche de son étoile ? Cela ne ressemble en rien à notre système solaire.

### ***Les planètes géantes proches de leur étoile y ont migré.***

On sait que les planètes géantes se forment loin de leur étoile et pourtant on en trouve à proximité. On a récemment mis en évidence un phénomène de migration. Cette migration a lieu lorsqu'une planète interagit avec le disque de gaz autour d'une étoile.

Quels sont les effets sur le matériau du disque et les propriétés des futures planètes internes ? Il n'y a aucun effet si cela se fait très vite. Si le disque est essentiellement constitué de gaz, la planète va rentrer presque jusqu'au centre du disque et il ne se passera rien. Mais si la planète met du temps, on commence à avoir dans le disque des planétésimaux de l'ordre du kilomètre. Au fur et à mesure que la planète pénètre dans le disque, elle vide tout sur son passage. L'accrétion ultérieure des planètes comme la Terre devient impossible jusqu'à vider

complètement la cavité. Si cela va jusque-là on n'est plus là pour en parler. La question est donc pourquoi sommes-nous là quand même ?

Est-ce que le fait que l'on soit là pour en parler est lié au fait que Jupiter et Saturne n'ont pas migré puisqu'on les voit très loin. Et si c'est le cas pourquoi n'ont-elles pas migré alors que les autres semblent migrer ? La réponse est donnée par le « *scénario de Nice* ».

Pour aboutir à une bonne distribution en masse, l'accrétion des planètes internes doit partir d'un disque confiné en dessous d'une unité astronomique. Une des manières d'obtenir cela est de faire migrer Jupiter jusqu'à peu près la limite actuelle de l'orbite de Mars. Saturne va rejoindre Jupiter dans un rapport de masse 3/2.

La migration est un processus très générique ; il a vraisemblablement également pris place dans le système solaire primordial, imposant « ses conditions initiales » à l'évolution ultérieures des mondes planétaires. Cependant les formes planétaires prises, dues aux propriétés spécifiques du disque protoplanétaire (structure, composition...) ont conduit à un système solaire « unique ».

### **3<sup>e</sup> phase : L'accrétion planétaire**

Les protoplanètes internes, composées majoritairement de minéraux anhydres ont incorporé des grains riches en glace du système externe. Cette glace, transportée vers la surface par un événement ultérieur, a engendré des océans d'eau.

### **4<sup>e</sup> phase : Des impacts géants**

À la fin de la période des impacts géants, qui se mesure en dizaines de millions d'années, on obtient une cinquantaine d'embryons dans le système solaire et toutes les collisions vont se faire avec ces objets-là. La taille de ces objets est de l'ordre de quelques milliers de kilomètres. Pour l'essentiel ils ont presque tous disparus lors de chocs frontaux.

La Terre a ainsi subi un choc géant qui a joué un rôle majeur. Si ce choc gigantesque avait été frontal nous ne serions pas là pour en parler ; si ce choc avait été très tangentiel on ne serait pas là non plus, parce qu'il y aurait très peu d'objets éjectés avec une vitesse inférieure à la vitesse de libération. Il n'y aurait pas eu de disque circumterrestre à partir duquel la Lune aurait pu s'accréter.

La géométrie de l'impact a été telle que des fragments, éjectés du manteau terrestre, mélangés au matériau de l'impacteur, ont construit un disque circumterrestre, dans lequel la Lune s'est accrétée. La Lune a ensuite eu un rôle critique sur l'évolution du climat de la Terre. C'est en effet la Lune qui stabilise l'obliquité de la Terre et permet de maintenir un climat pérenne sur des milliards d'années.

L'impact géant a effacé tout ce qu'il y avait d'antérieur, l'instant zéro de la recristallisation c'est maintenant celui-là. Même quand est arrivé le « *grand bombardement tardif* » (Late Heavy Bombardement LHB), il n'y a qu'une fraction des océans qui a disparue. On est resté pour l'essentiel avec des océans stables. Ultérieurement l'impact de comètes dans les océans a pu les ensemercer, des molécules carbonées complexes permettant l'émergence du vivant. Ces processus sont-ils spécifiques à la Terre, ou ont-ils pu former ailleurs des chemins d'évolution similaires conduisant à l'émergence du vivant ?

J.P. Bibring développe longuement le cas de la planète Mars. Il montre que Mars a préservé la mémoire de la plupart des étapes ayant jalonné son histoire. Certains terrains gardent la mémoire de ce qui s'est passé avant le LHB. Pour J.P. Bibring : « *on ne forme pas de vie à partir du non vivant* ».

### **En guise de conclusion**

Nous sommes aujourd'hui au cœur d'une profonde révolution de notre représentation de la Terre dans l'espace et dans le temps et de son évolution à toutes les échelles de temps. Les questions exo-biologiques entrent réellement dans l'ère scientifique, dans un cadre inédit où la diversité des chemins d'évolution planétaire devient l'objet de recherches et d'observations en bousculant la sphère proprement scientifique.

Ce qui a changé c'est la question de l'unicité ou de la diversité des chemins d'évolution vers la vie. C'est quelque chose qui est en train de se construire. Plus on va vers l'interprétation et la compréhension des processus qui ont mené à ce que nous sommes aujourd'hui plus les scientifiques acceptent cette idée que la diversité des formes prises par les mêmes processus entraîne des chemins d'évolution. Et c'est ce que l'on trouve sur les exoplanètes maintenant. À nouveau, cela ne veut pas dire que -dans des environnements différents- ce que l'on appelle le vivant ne va pas avoir des capacités d'adaptation qui font qu'un même genre de forme peut se trouver ailleurs.

Ce qui va disparaître, c'est l'idée qu'il y a un chemin d'évolution unique, déterministe, qui à partir des quarks ne peut qu'aboutir au cerveau humain. Je pense qu'il faut qu'on abandonne cette idée-là. Ce n'est pas parce qu'actuellement il n'y a qu'un seul univers observable que pour rendre compte de l'évolution telle qu'on la pense actuellement qu'il faut passer des quarks au cerveau humain. En fait il a fallu des conditions très particulières. Si on change un petit peu les conditions, on aboutit à un résultat différent. De là est née l'idée que, puisqu'il y avait quelqu'un qui voulait en arriver là, il a tout réglé pour cela ; ce n'est pas parce qu'en changeant les conditions initiales on arrive à autre chose que ces conditions étaient prévues.



Ce n'est pas parce qu'il a fallu une collision particulière qui a donné naissance à la Lune, que la collision a pris cette forme-là. Il se trouve que ladite forme a donné naissance à la Lune qui, en stabilisant le climat, a permis l'adaptation de la vie.

Nous allons progressivement nous habituer à cette diversité des chemins de l'évolution : un petit nombre d'interactions, mais dans une diversité des champs d'interaction qui sont liés aux aspects chaotiques auxquels on a fait allusion ci-dessus, qui est tout à fait fondamental. Là-dessus va se greffer le vivant. Ma propre idée, c'est que le concept même de vivant va évoluer à la même vitesse que la recherche dans ce domaine. On utilise souvent des notions nées bien avant que l'on comprenne la réalité.

Il peut paraître évident de faire la distinction entre une pierre et un arbre, mais quand on va de plus en plus au fond, on s'aperçoit que les distinctions sont difficiles.

Les connaissances sur le vivant évoluent : la notion même de vivant va évoluer.

L'exobiologie expérimentale, qui entre dans une nouvelle ère, conduit justement à tenter de challenger (selon le terme anglosaxon) le concept lui-même.

La vache folle, c'est le prion, le prion c'est le vivant ou pas ? Où arrêtez-vous la molécule ? Etc.

On réunit dix personnes dans une pièce et on leur demande de définir le vivant ; on obtiendra des définitions très différentes, mais il y a des éléments qu'on ne retrouvera plus. Par exemple la question de la duplication. La notion de duplication qui apparaissait comme une caractéristique du vivant n'est pas une propriété du vivant mais des molécules que le vivant utilise. C'est cela que l'on cherche.

Avec Rosetta, on cherche s'il n'y a pas des molécules qui, du point de vue abiotique, ont la particularité de se dupliquer.

Il faut s'extraire du poids idéologique actuel qui est dominant dans la manière de voir les choses. La seule manière de la dépasser, c'est de faire des prévisions observationnelles et d'aller voir et de comprendre. S'extraire des pesanteurs qui imposent des points de vue et qui sont celles sur lesquelles nous avons construit notre vie.

*(1) La ligne des glaces marque la limite séparant, au sein d'un disque protoplanétaire, la composante gazeuse des molécules associées au [carbone](#) (C), à l'[azote](#) (N) et à l'[oxygène](#) (O) de leur composante solide. Cette limite est définie par la température de condensation de l'eau. Elle marque la séparation entre les [planètes telluriques](#) et les [planètes géantes](#), celles-ci ne pouvant se former qu'au-delà de la ligne des glaces.*

Rédaction : Christian Larcher