

Origine et originalités de la planète Terre

Tristan FERROIR

Parties du programme se rapportant au sujet

Notions	Précisions/limites
1-1 La planète Terre dans le système solaire	
- Structure et fonctionnement du Soleil et des planètes - Spécificité de la planète Terre. - Météorites et différenciation chimique des planètes telluriques	L'étude se limitera à la composition des planètes et des atmosphères planétaires, ainsi qu'à leur activité interne. La connaissance du mouvement des planètes se limitera aux lois de Kepler
1-4 Géodynamique interne du globe	
- Dynamique du noyau et champ magnétique - Dynamique mantellique : convection et panaches. Tomographie sismique, arguments géochimiques. Elaboration d'un " modèle Terre "	On se limitera à la composante dipolaire du champ sans développement mathématique La convection ne fera l'objet d'aucun développement mathématique ; on se limitera à la signification physique du nombre de Rayleigh.
2-2 Géochronologie absolue	
Radiochronologie : bases géochimiques, exemples de calculs d'âges, domaines d'application ; cas particulier des isotopes cosmogéniques	On se limitera aux couples Rb/Sr , U/Pb, et à l'isotope cosmogénique ^{14}C
3-1 L 'évolution précoce de la planète Terre	
- L'univers et les grandes étapes de la formation du système solaire - Différenciation chimique : formation du noyau et du manteau primitif. Dégazage du manteau, formation de l'atmosphère et de l'hydrosphère primitives. - Genèse et croissance de la croûte continentale. Evolution géochimique du manteau	On se limitera à quelques étapes de la nucléosynthèse, ainsi qu'à la formation de la planète Terre On se limitera à la distinction d'un manteau primitif et d'un manteau appauvri sur la base de la distribution des éléments incompatibles et du seul couple Rb / Sr.
3-3 Les fossiles : témoins de l' évolution biologique et physico - chimique de la Terre	
- Premiers vestiges de l'activité biologique et hypothèses sur l'origine de la vie.	

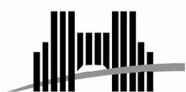


Table des matières

I	<u>Origine de la planète Terre dans le système solaire</u>	3
A	La planète Terre est une planète tellurique	3
B	Origine des éléments constituant la planète Terre	4
C	De la formation de la nébuleuse protosolaire au planétésimal Terre	4
1	Les chondrites : les premières pierres du système solaire	4
2	De la condensation de la nébuleuse à la formation des roches du système solaire	5
3	L'accrétion des chondrites en planètes	5
4	Importance de la place de la Terre dans le système solaire sur sa constitution	7
5	Importance de l'environnement stellaire dans la formation de la Terre	7
D	La différenciation de la Terre en enveloppes concentriques	8
1	La différenciation noyau-manteau	8
2	La différenciation de l'atmosphère et de l'hydrosphère	9
3	Quel modèle de Terre ?	10
II	<u>Les originalités primaires de la planète Terre</u>	11
A	La présence d'eau en surface sous ses trois états	11
1	Les origines de l'eau sur Terre	11
2	Diagramme de phase de l'eau et conditions p,T sur Terre	11
3	L'eau sur les autres planètes	12
B	Un champ magnétique intense	13
1	Origine et particularités du champ magnétique terrestre	13
2	Le champ magnétique des autres planètes	13
C	Un satellite, la Lune, stabilisateur de paramètres orbitaux	13
1	La formation de la Lune	14
2	La stabilisation des paramètres orbitaux de la Terre	14
3	L'extrême fin de l'accrétion vue par la Lune	15
III	<u>Les originalités secondaires de la planète Terre</u>	16
A	La présence de Vie diversifiée en surface	16
1	Conditions d'existence de la Vie sur une planète	16
2	Les arguments géologiques permettant de dater les origines de la Vie	17
3	Les hypothèses sur l'origine de la Vie sur Terre	17
4	Comment passer des molécules prébiotiques à la véritable Vie ?	18
5	La Vie sur les autres planètes	18
B	La présence de dioxygène et d'une faible quantité de CO ₂ dans l'atmosphère	19
1	La composition des atmosphères planétaires	19
2	Le piègeage du CO ₂ dans les carbonates et les roches carbonées	19
3	La formation du dioxygène	20
C	Des plaques lithosphériques à croûte partiellement granitique animées d'une tectonique	20
1	Quelques arguments en faveur de la tectonique des plaques	20
2	Tectonique des plaques, convection mantellique et comparaison aux autres planètes	21
3	Une croûte granitique sur Terre	23

Introduction

La quête des origines a toujours été au cœur des préoccupations de l'Homme. Par exemple, les civilisations judéo-chrétiennes se sont au départ essentiellement basées sur la Bible pour répondre aux différentes questions quant aux origines de la Terre et de la Vie. D'ailleurs, au sein même du Livre, trois genèses distinctes sont envisagées, ce qui démontre aussi l'influence des autres civilisations et l'avancée de la recherche dans l'évolution de la pensée. Notre planète, la Terre, fait partie d'un ensemble plus vaste, le système solaire constitué de différents corps. Parmi eux, les planètes sont les objets les plus massifs juste après l'étoile centrale qu'est le Soleil. Suite aux débats et réunions des astronomes, la définition d'une planète a été modifiée pour aboutir à la suivante :

- une planète doit être un objet sphérique
- une planète doit être en orbite autour d'une étoile centrale
- une planète doit être gravitairement maîtresse de son orbite, c'est à dire être le centre de gravité de l'ensemble des corps présents sur cette orbite

A partir de cette définition, huit corps sont à l'heure actuelle considérés comme étant des planètes dans le système solaire.

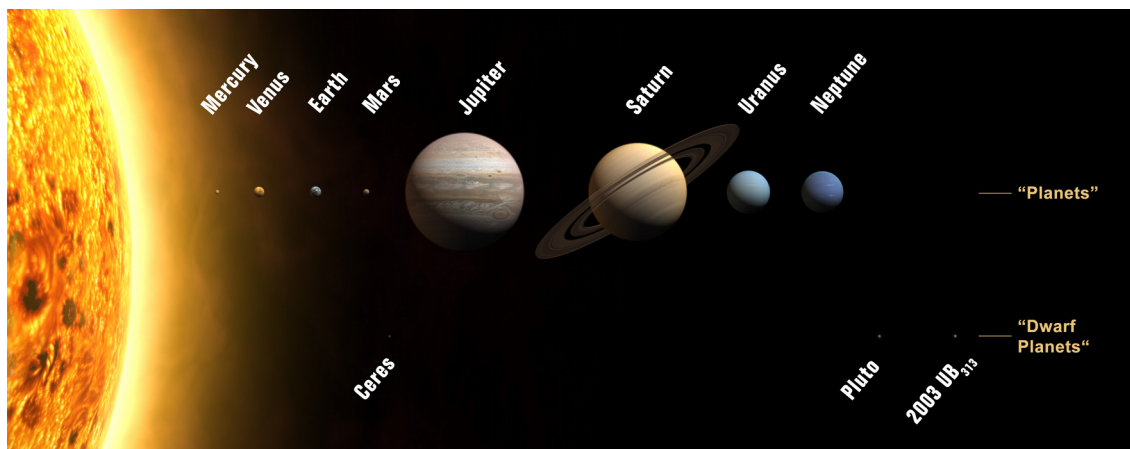


Fig. 1: Enchaînement des différentes planètes au sein du système solaire. Les planètes telluriques, les quatre premières, sont situées dans la zone interne alors que les planètes géantes gazeuses sont situées dans la zone externe.

Parmi ces 8 planètes, la planète Terre est située en 3ème position, à une unité astronomique du Soleil, soit 150 millions de kilomètres. Son histoire est liée à l'ensemble de celle du système solaire, tant pour son origine que pour sa composition. Comment la Terre s'est-elle formée ? Quelles caractéristiques communes partage-t-elles avec ses voisines ? Malgré une origine commune, sa position particulière lui a permis d'acquérir certaines originalités. Sa plus grande originalité, dont découlent quasiment toutes les autres est la présence d'eau sous les trois états de la matière en surface. Comment expliquer cette originalité ? Quelles sont les originalités qui s'en suivent ? Quelles autres originalités présentent-elles ? Par ailleurs, la présence de Vie sur Terre est aussi une interrogation pour les scientifiques : c'est à partir des différentes origines de cette Vie et des originalités de la planète Terre que sont recherchés d'autres mondes habitables/habités. Il semble ainsi nécessaire de s'interroger sur l'origine de la planète Terre. Connaissant cette origine, nous nous attacherons à identifier les originalités qui proviennent de ces origines et nous verrons en quoi elles ont pu permettre l'apparition de la Vie. Fort de toutes ces réflexions, nous concluerons quant à la potentielle existence de Vie ailleurs dans le système solaire et dans l'Univers.

I Origine de la planète Terre dans le système solaire

A La planète Terre est une planète tellurique

Parmi les différents objets du système solaire, on peut noter trois types de corps principaux dont nous donnons les caractéristiques ci-après. Il s'agit des planètes telluriques, des planètes gazeuses et des satellites de glace. Connaître leurs caractéristiques respectives semble indispensable afin de pouvoir montrer les différentes originalités de la Terre.

La Terre fait partie des planètes telluriques au même titre que Mercure, Vénus et Mars. La structure interne de la Terre a été obtenue essentiellement par les différents travaux de sismologie menés entre autres par

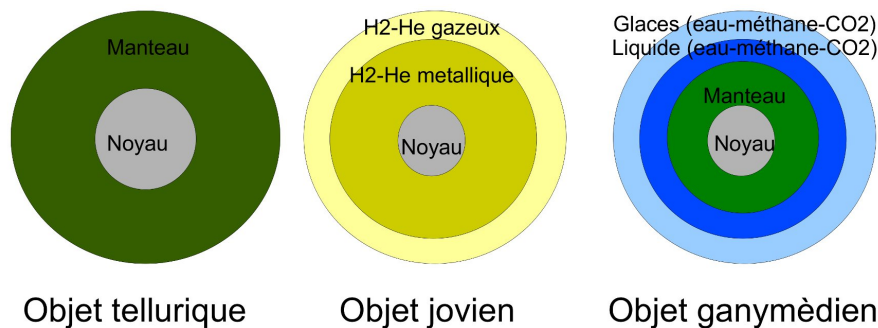


Fig. 2: Les différents gros objets différenciés constituant le système solaire

Mohorovicic (limite croûte-manteau), Gutenberg (limite manteau-noyau) et Lehman (limite noyau externe-graine). La composition des différentes enveloppes ainsi définies peut être obtenue par échantillonnage dans le cas des croûtes qui sont granito-gneissique pour la croûte continentale ou basaltique pour la croûte océanique. Le manteau est composé de péridotite (roche à olivines et pyroxènes) qu'on peut trouver à l'affleurement en enclaves dans des roches volcaniques (basaltes). Enfin, la composition du noyau terrestre, a pu être déduite d'une part de l'existence de matériaux denses en profondeur comme en témoigne un moment d'inertie plus faible que celui d'un corps homogène (0,33 contre 0,4) ainsi qu'une densité de surface des roches d'environ 3 alors que la densité moyenne de la Terre est de 5,5. Tout ceci a conduit à supposer l'existence d'un noyau dense dont la nature a été suggérée par Birch comme étant ferreuse. Cette réflexion est basée sur la relation entre vitesse des ondes sismiques dans le noyau et masse molaire des matériaux : le fer semblait le meilleur candidat. Nous verrons par ailleurs que l'existence d'un champ magnétique est un argument supplémentaire dans cette proposition.

B Origine des éléments constituant la planète Terre

L'histoire de l'Univers commence avec le Big Bang il y a environ 13,5Ga. A la suite de cette explosion gigantesque, les premières particules élémentaires puis les premiers éléments (H, He) apparaissent. La formation des éléments plus lourds que ces derniers est liée à la formation des étoiles. Ainsi, le carbone, l'azote, l'oxygène, tous les éléments jusqu'au fer sont formés par la nucléosynthèse stellaire le long de la séquence principale ($H \rightarrow He$ avec des intermédiaires de C, N, O) puis au cours de la phase géante rouge (atome du carbone au fer). Tous les éléments avec des numéros atomiques supérieurs au ^{56}Fe sont produits par l'explosion d'étoiles massives que sont les supernovae.

La Terre, en tant qu'entité constituée de l'ensemble des éléments présents dans la classification de Mendeleiev, a reçu sa matière des systèmes stellaires précédents : le système solaire est donc un système de deuxième génération au moins.

C De la formation de la nébuleuse protosolaire au planétésimal Terre

1 Les chondrites : les premières pierres du système solaire

Les chondrites sont des météorites indifférenciées constituées des éléments suivants :

- Les chondres, composés d'olivine et de pyroxène, sont des structures rondes, de taille comprise entre 100 μm et 1mm témoignant d'une fusion puis d'une cristallisation en apesanteur et donc en l'absence de gros corps exerçant une gravité intense
- La matrice cimente tout ces chondres les uns aux autres et est aussi composée d'olivine et de pyroxène dans le cas des chondrites ordinaires ou de silicates hydratés et d'un peu de matière carbonée dans le cas des chondrites carbonées
- Les CAI (inclusions réfractaires constituées de minéraux contenant du calcium et de l'aluminium comme les feldspaths et le corindon) mais qui ne sont présents que dans certaines chondrites carbonées
- Du fer pur sous forme métallique qui n'est présent que dans les chondrites ordinaires dans une proportion d'environ 30%

Le Soleil représente plus de 99% de la masse du système solaire. Or, si on compare la chimie de la photosphère solaire obtenue par spectrométrie et la composition moyenne des chondrites de type CI, on constate que la chimie des chondrites et celle du soleil sont très proches. Bien sur, il y a une différence importante en ce qui concerne les éléments volatils (~ceux qui passent facilement sous forme gazeuse du fait de la nature même

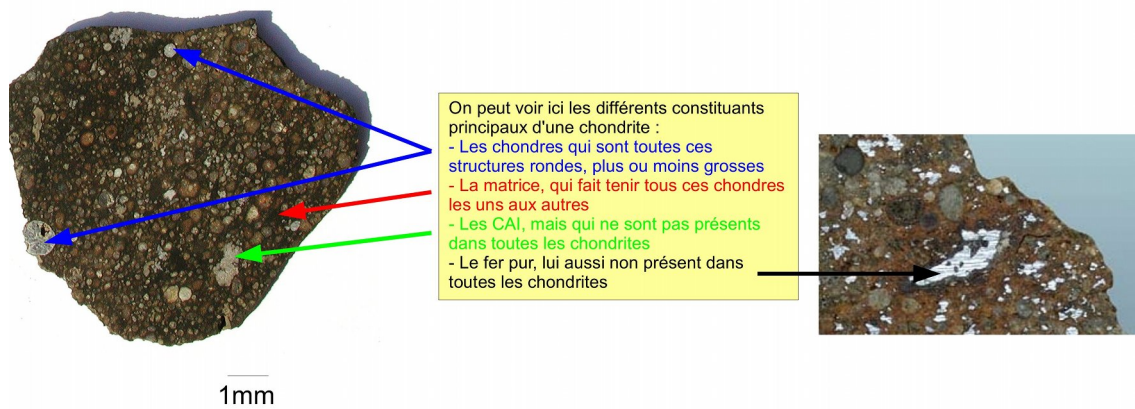


Fig. 3: Caractéristiques des chondrites

du Soleil). Cela veut donc dire que les chondrites représentent bien la chimie moyenne des corps rocheux du système solaire à partir desquels les planètes ont pu se former.

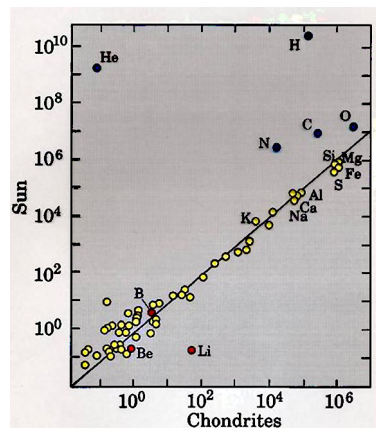


Fig. 4: Abondance relative normalisée au Si des chondrites et de la photosphère solaire

2 De la condensation de la nébuleuse à la formation des roches du système solaire

Nous avons vu que les chondrites représentent globalement la chimie du système solaire.

L'observation de systèmes stellaires lointains comme la nébuleuse d'Orion montre que le système se forme à partir d'un nuage moléculaire. Ce dernier se condense et lorsque le couple pression/température au centre du nuage est suffisant l'étoile s'allume : on passe d'une nébuleuse obscure à une nébuleuse claire. Tout autour, différents minéraux se condensent en fonction de leur température de condensation propre d'une part et de la température qui règne dans le milieu d'autre part. La séquence théorique est présentée sur la figure 5.

On obtient ainsi différents minéraux. Cette séquence théorique est par ailleurs confirmée par les observations faites dans les chondrites : les CAIs qui sont des inclusions réfractaires et qui ont donc une température théorique de condensation plus élevée, ont des âges plus anciens que ceux des chondres qui sont des silicates. L'ensemble de ces météorites permet de vérifier le couple observation-théorie réalisé sur des systèmes stellaires lointains mais aussi de dater la formation du système solaire à 4,567Ga (méthode Plomb-Plomb). Les différents minéraux ainsi condensés vont, par des mécanismes encore mal contraints, se rassembler en chondrites.

3 L'accrétion des chondrites en planètes

Nous avons vu que les chondrites carbonées ont la composition globale du Soleil. Cependant, en calculant la composition moyenne de la Terre globale et en la comparant aux chondrites ordinaires, on constate une formidable correspondance. Si cela pose problème sur le type de chondrite à choisir pour former la Terre, cela ne change pas la proposition générale.

On peut donc mettre en avant l'hypothèse d'une accrétion dite homogène : les petits corps chondritiques se seraient aggrégés à la faveur de choc se produisant sur leurs orbites et qui auraient permis la formation de

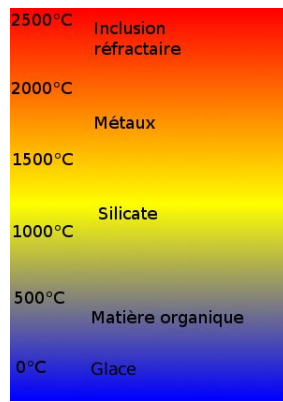


Fig. 5: Séquence de condensation théorique des différents minéraux

	Chondrite ordinaire	Moyenne de la Terre	Croute continentale	Croute océanique	Manteau	Noyau
SiO ₂	36	35-40	60	47	44	
Fe + FeS	21	20-25	0	0	0	>80
FeO	10	7-10	4	11	10	
MgO	24	20-25	3	12	36	
Al ₂ O ₃	2	2-3	15	14	4	
CaO	2,5	2-3	5	9	3	
Na ₂ O+K ₂ O	1	1	6	2,5	1	

Tab. 1: Comparaison de la composition des chondrites CI et de la Terre globale

corps de plus en plus gros. Ce modèle impose ensuite de proposer un scénario de différenciation ainsi que des sources d'énergie permettant cette séparation en différentes enveloppes concentriques.

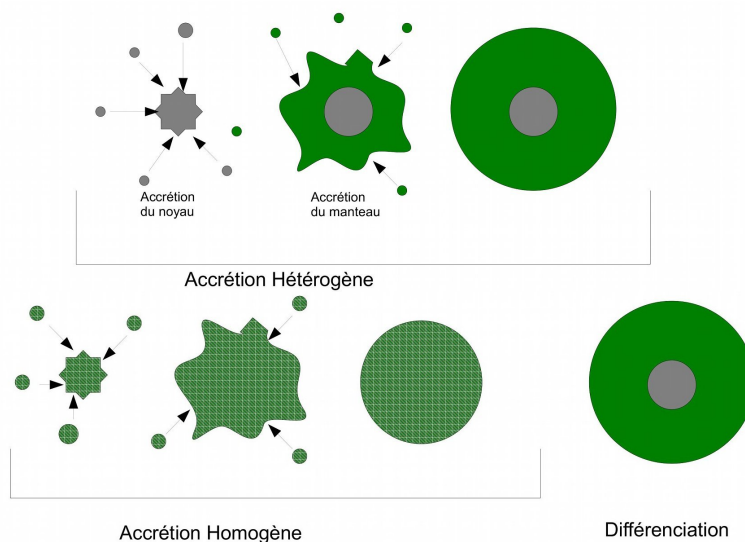


Fig. 6: Les deux modèles d'accrétion permettant de former la planète Terre à partir des météorites

Un deuxième modèle qui est basé sur l'existence d'achondrites pierreuses de nature proche de celle du manteau terrestre et d'achondrites ferreuses de pétrologie proche de celle du noyau proposait une accrétion hétérogène. Dans ce scénario, les sidérites formant le noyau se seraient accrétées puis les achondrites formant le manteau. Cette hypothèse beaucoup plus improbable a été abandonnée pour les planètes telluriques. Il reste cependant d'actualité pour les planètes gazeuses.

L'âge de la Terre a longtemps fait débat et plusieurs méthodes distinctes ont été employées afin de le déterminer. En 1953, Clair Patterson montre, à partir de la méthode uranium/plomb, que la Terre et les météorites se sont formées au même moment à partir d'un réservoir identique, il y a 4,55 milliards d'années.

4 Importance de la place de la Terre dans le système solaire sur sa constitution

En tant que troisième planète du système solaire, la Terre se situe dans la zone interne. Lorsqu'on observe la répartition des corps au sein du système solaire, on constate que le système solaire interne est constitué des planètes telluriques alors que le système solaire externe est formée des planètes géantes gazeuses et des satellites de glace. Il semble donc y avoir une dichotomie compositionnelle entre ces deux parties. L'explication tient à la température qui régnait aux alentours du Soleil au moment de son allumage. Etant donné la séquence de condensation que nous avons mise en avant, le système solaire interne, plus chaud, n'a pu condenser que des parties rocheuses et liquides. Vers l'extérieur, aussi bien les roches que les glaces ont pu se condenser. On peut donc ainsi créer des planètes telluriques vers le centre du système solaire et des satellites de glaces et des comètes vers l'extérieur. Les planètes géantes sont quant à elle pour partie le fruit de la dynamique du Soleil au moment de son allumage. Au cours de cette phase, appelée T-Tauri, de violents vents solaires peuvent balayer l'ensemble du système solaire en partant de l'étoile centrale. Ces vents ont en partie emporté les gaz présent dans le système solaire interne vers le système solaire externe. La présence de glace fait que cela augmente la matière disponible pour la formation des planètes par 3 ou 4 et donc augmente la taille potentielle. La gravitation est donc d'autant plus importante et permet donc de retenir plus facilement les gaz. Ainsi, la position de la Terre dans le système solaire est donc un point clé de sa constitution et de ses originalités comme nous le verrons plus tard.

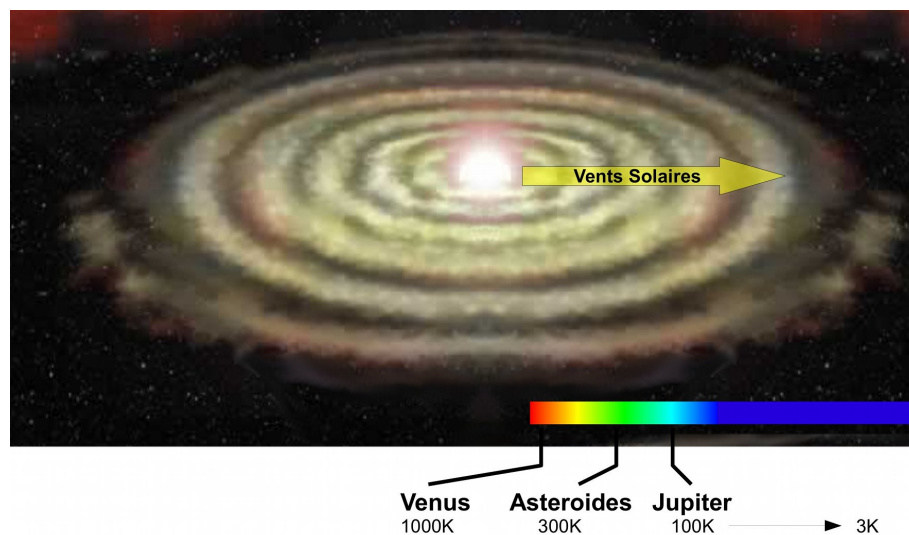


Fig. 7: Profil de température dans la nébuleuse protosolaire en lien avec la constitution des planètes

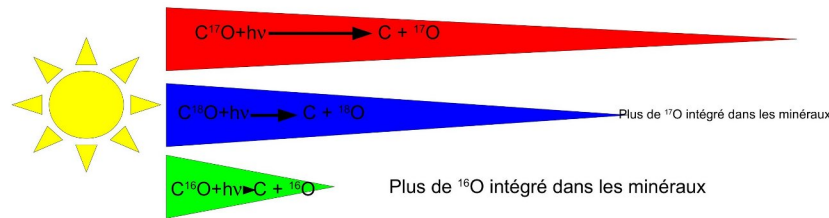
5 Importance de l'environnement stellaire dans la formation de la Terre

Nous avons signalé que le système solaire était né de l'effondrement gravitaire d'une nébuleuse. Le déclencheur de cette naissance pourrait être l'explosion d'une supernova qui, par propagation de l'onde de choc, aurait entraîné l'effondrement du nuage moléculaire. Cette théorie est mise en avant suite aux observations d'anomalies isotopiques au sein des chondrites. On trouve en effet une trop grande concentration de ^{26}Mg . Cet isotope est produit par la désintégration radioactive à courte période de ^{26}Al dont la période de demie-vie est de 0.73Ma et qui n'est produit que dans les supernovae. Cela signifie donc qu'au moment de la formation des chondrites, il existait encore du ^{26}Al et donc qu'une supernova avait explosé il y a moins de 7Ma. Un raisonnement similaire peut être fait pour les anomalies des isotopes de l'oxygène présentes dans les CAIs qui témoignent de la présence d'au moins une géante rouge aux alentours. Ainsi, lors de sa formation, le système solaire et la Terre avait un environnement complexe qui ont fortement influencé leur mise en place.



Une hypothèse alternative des anomalies isotopiques en oxygène : le self-shielding

Pour expliquer les anomalies isotopiques en oxygène dans les chondrites, un nouveau modèle a été proposé. Ce modèle propose que la molécule de CO très abondante dans le système solaire aurait pu être photodissociée par le jeune Soleil. Or, le $C^{16}O$, $C^{17}O$ et le $C^{18}O$ sont photodissociés pour des longueurs d'onde différentes. Comme il y a beaucoup de $C^{16}O$ puisque l'atome d' ^{16}O est le plus abondant, les rayons ayant la longueur d'onde requise sont vite absorbés : il n'est possible d'intégrer du ^{16}O que dans les minéraux proche du Soleil. A l'opposé, il y a peu de ^{17}O : le rayonnement qui peut photodissocier le ^{17}O se propage plus loin : le ^{17}O pourrait être intégré dans les minéraux sur une plus grande distance à partir du Soleil. On peut ainsi créer des minéraux avec des rapports isotopiques en oxygène distincts.



D La différenciation de la Terre en enveloppes concentriques

1 La différenciation noyau-manteau

Nous avons rappelé que le noyau était constitué de fer et le manteau de silicate de type olivine et pyroxène. Ainsi, la composition minéralogique même de la Terre manteau+noyau est très proche de celle des chondrites ordinaires. Il est donc envisageable qu'une fois la proto-Terre accrétée sous forme d'un corps chondritique, elle se soit différenciée en enveloppes concentriques. Pour avoir une différenciation entre le noyau et le manteau, il faut une fusion importante permettant la séparation de la phase ferreuse de la phase silicatée. Cette fusion va conduire à la formation de deux liquides immiscibles, l'un constitué de fer et qui contiendra aussi tous les éléments sidérophiles et un liquide silicatée contenant quant à lui les éléments lithophiles. Par le simple fait d'une différence de densité, le liquide ferreux, plus dense, va se retrouver au centre de la planète tandis que le liquide plus léger, silicaté, va se retrouver en périphérie. On forme ainsi le noyau et le manteau terrestre. L'énergie permettant la fusion de la proto-Terre a deux origines : d'une part la chaleur d'accrétion provenant des chocs entre les planétésimaux qui ont formé la proto-Terre et, d'autre part, la radioactivité qui était plus active car il y avait plus d'éléments radioactifs à cette époque que ce soient les radioactivités à longue période (U/Pb par exemple) ou l'existence de radioactivité à courte période comme ($^{26}Al \rightarrow ^{26}Mg$)

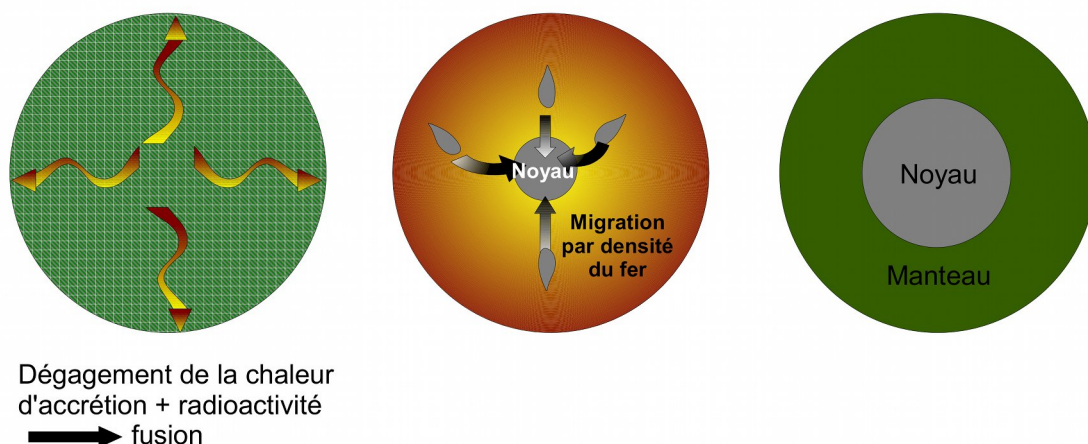


Fig. 8: Schéma de la différenciation entre le noyau et le manteau : une Terre complètement fondue ségrège deux liquides immiscibles dont le plus dense migre vers le centre de la planète

Comment approcher le moment auquel s'est faite cette différenciation ? Les mesures isotopiques faites sur les couples U/Pb ($^{238}U \rightarrow ^{206}Pb$ et $^{234}U \rightarrow ^{208}Pb$) montrent que le noyau s'est formé très tôt dans l'histoire de la Terre, au moins durant les 300 premiers millions d'années. Il semble donc judicieux, pour obtenir un âge plus précis d'utiliser un couple d'isotope radioactif qui a d'une part une période radioactive adaptée ($10.T_{1/2} < 300Ma$) et, d'autre part, un comportement permettant de dater une séparation entre une phase

métallique et une phase silicatée. Dans ce cadre, le couple $^{182}\text{Hf} \rightarrow ^{182}\text{W}$ semble particulièrement adapté : la période radioactive de ce couple est de 9Ma (si cette période est bien inférieure à celle requise, l'absence de noyau dans la Lune et son existence dès 4,4Ga montrent que le noyau a dû se former en réalité durant les 100 premiers millions d'année [cf. C]) et l'élément Hafnium (Hf) est lithophile alors que le Tungstène (W) est sidérophile. Ainsi deux scénarios sont envisageables :

- si la différenciation est précoce, il restera beaucoup de ^{182}Hf dans le manteau puisque seul le ^{182}W sera emporté dans le noyau. Après la désintégration complète du ^{182}Hf , il y aura alors un rapport $\frac{^{182}\text{W}}{^{184}\text{W}}$ élevé dans les roches mantelliques (fig. 9, schéma du haut)
- si la différenciation est tardive, alors le ^{182}Hf se sera beaucoup désintégré et il en restera donc peu dans le manteau au moment de la séparation noyau-manteau. Après la désintégration complète de la faible quantité de ^{182}Hf restante, le rapport $\frac{^{182}\text{W}}{^{184}\text{W}}$ des roches mantelliques sera faible (fig. 9, schéma du bas).

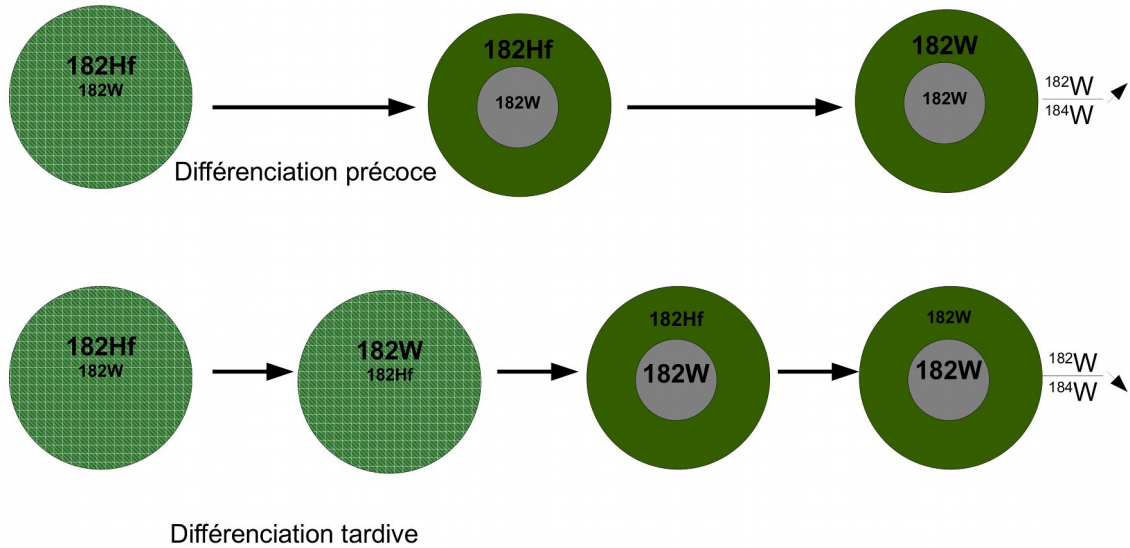


Fig. 9: Principe de la datation de la formation du noyau par le couple $^{182}\text{Hf}/^{182}\text{W}$

En pratique, les mesures isotopiques montrent que le rapport est élevé et traduit une différenciation qui date d'environ 60Ma après la formation de la Terre.

2 La différenciation de l'atmosphère et de l'hydrosphère

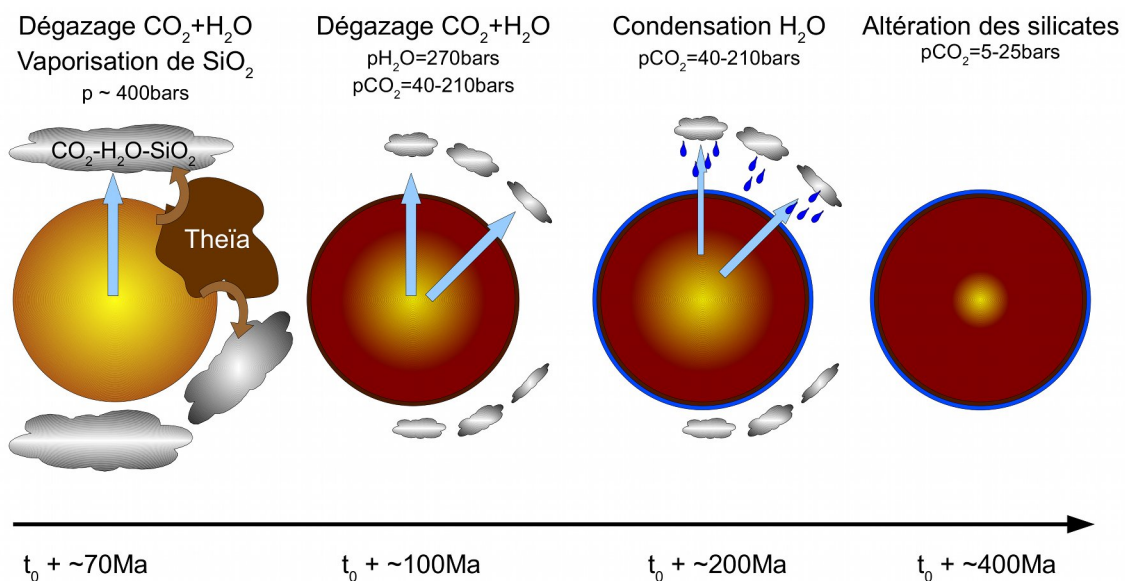


Fig. 10: Les principales étapes de la différenciation de l'atmosphère par dégazage puis de l'océan par condensation d'une partie de l'atmosphère.

L'atmosphère terrestre s'est formée essentiellement par dégazage du manteau. Cependant, l'impact géant qui

forma la Lune a aussi jouer un rôle au début de l'histoire de la Terre en vaporisant une partie des silicates formant ainsi une atmosphère faite de CO_2 , de vapeur d'eau et de vapeur silicatée. Après une diminution rapide de la quantité des vapeurs de silicates présentes dans l'atmosphère celle-ci était extrêmement ténue ($p \sim 400$ bars soit 400 fois la pression atmosphérique actuelle) et composée majoritairement de CO_2 et d' H_2O . Les océans ont ensuite précipité rapidement (en quelques milliers d'années) comme en témoignent certains zircons datés de 4,4Ga qui semblent avoir interagi avec de l'eau océanique. Ces océans étaient encore très chauds ($\sim 70^\circ C$ comme le montre le fractionnement des isotopes du silicium dans les silex) et certainement plus salés étant donnée la grande quantité d' HCl rejetée par les éruptions volcaniques et la quantité de Na disponible par altération des feldspaths basaltiques. Pour information, des inclusions fluides dans des roches datées de l'archéen montrent que la concentration en NaCl des océans devait être trois fois supérieure à la salinité actuelle.

Afin d'ancrer tout ceci dans une chronologie absolue, la première méthode a été de faire des modèles de refroidissement de la Terre ; c'est ce qui a permis de reconstituer en partie la séquence présentée au schéma 10. Un autre moyen a été de dater la formation de l'atmosphère terrestre grâce au couple $^{40}K \rightarrow ^{40}Ar$ qui a un temps de demi-vie de 1.7Ga. Le potassium (K) est lithophile alors que l'argon (Ar) est atmosphérique. En ceci, ce couple isotopique est un bon choix pour étudier la séparation manteau-atmosphère. Les résultats de ces études montrent que l'atmosphère s'est formée très tôt dans l'histoire de la Terre durant les 100 premiers millions d'années.

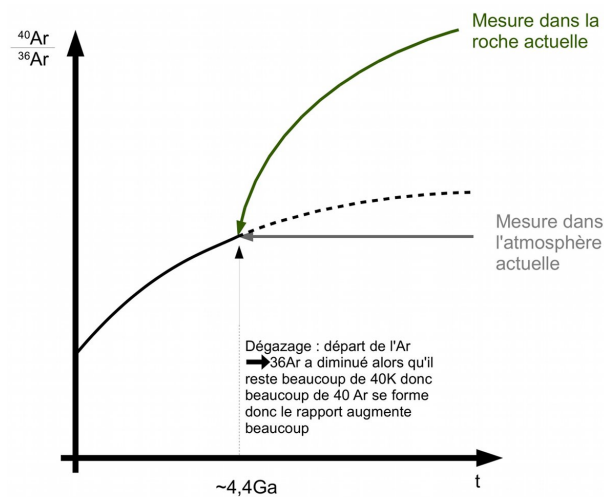


Fig. 11: Principe de datation de la formation de l'atmosphère terrestre

3 Quel modèle de Terre ?

Nous avons déjà effleuré ce problème lorsque nous avons comparé la composition chimique de la Terre à celle des chondrites. En effet, la composition du Soleil semble très proche de celle des chondrites carbonées de type CI. Pourtant, lorsqu'on compare la composition chimique de la Terre avec celle des chondrites ordinaires celles-ci sont en bien meilleur accord. Par ailleurs, d'autres arguments tendent à rapprocher la Terre des chondrites à enstatite. Nous proposons dans le tableau ci-après les points en faveur ou en défaveur de tel ou tel modèle. A l'heure actuelle, le modèle propose en fait que la Terre soit un mélange de ces chondrites.

La Terre s'est donc formée par accréation de planétésimaux de composition globalement chondritique. De façon contemporaine à cette accréation, s'est produite la différenciation de la planète permettant la formation d'une dualité manteau-noyau et hydrosphère-atmosphère. Cette origine est finalement sans originalité véritable puisque la Terre partage l'ensemble de ses mécanismes de formation et de différenciation avec les autres planètes telluriques et les satellites de glace. Les planètes géantes ont quant à elle une accréation plus poché de l'accréation hétérogène. Cependant, la place même de la Terre dans le système solaire a conditionné son devenir futur et l'apparition de certaines originalités par rapport à ses "semblables"

Type de chondrite	Points positifs	Points négatifs
Chondrites carbonées	- Composition chimique proche du Soleil et donc du système solaire en général - Position dans le diagramme des isotopes de l'oxygène	Problème sur la quantité de fer réduit (quasiment inexistant alors qu'il en faut 30% pour former le noyau. La réduction du fer oxydé par le carbone présent [~10% de la météorite] ne permet pas de résoudre le problème
Chondrites ordinaires	- Composition chimique de la Terre globale - Quantité de fer suffisante pour former un noyau	- A une composition chimique différente de celle du Soleil - N'est pas en bonne position sur la droite des isotopes de l'oxygène
Chondrites à enstatite	Position dans le diagramme des isotopes de l'oxygène compatible avec un réservoir parent avec celui de la Terre	- Composition différente de celle de la Terre et du système solaire - Météorites trop réduites

Tab. 2: Les différents arguments quant au modèle de Terre

II Les originalités primaires de la planète Terre

A La présence d'eau en surface sous ses trois états

1 Les origines de l'eau sur Terre

L'origine de l'eau sur Terre est sujette à débat. Quatre hypothèses sont envisagées :

- La première origine est une eau provenant des météorites de type chondrite carbonée. En effet, la plupart d'entre elles contiennent de l'eau et surtout des minéraux hydratés (serpentines, argiles) qui en étant chauffés peuvent relarguer de l'eau.
- La deuxième origine proposée est une eau provenant des comètes. Ces objets sont en effet un mélange de roches et de glaces dont la glace d'eau. Elles auraient donc pu aussi contribuer au transport de l'eau sur Terre.
- La troisième hypothèse est la théorie du dégazage que nous avons présenté en 2.
- La quatrième hypothèse, beaucoup plus discutée et discutable est l'apport par des micrométéorites qui sont certes très petites mais qui tombent en grande quantité sur Terre.

L'hypothèse la plus favorisée à l'heure actuelle est celle des météorites. Quand on parle ici de météorites, ce sont plus des objets de tailles astéroïdales (10 à 40% de la masse terrestre) qui faisaient partie d'embryons planétaires situés au niveau de la ceinture d'astéroïdes. Cette hypothèse est basée d'une part sur des simulations numériques de formation du système solaire et d'autre part sur des arguments géochimiques, notamment le rapport D/H. Dans le cas des chondrites carbonées (et donc de la ceinture d'astéroïde), ce rapport est très voisin de celui de la Terre ($\frac{D}{H} = 150.10^{-6}$) alors que celui des comètes est deux fois plus élevé. Ainsi, l'origine probable de l'eau sur Terre est météoritique ou un dégazage du manteau, la Terre résultant de l'accrétion de chondrites, il est difficile de discriminer les deux.

2 Diagramme de phase de l'eau et conditions p,T sur Terre

L'eau est présente sous ses 3 états à la surface de la Terre :

- solide sous la forme de la cryosphère matérialisée par les glaciers, les calottes et les inlandsis
- liquide sous la forme des océans, des rivières et des nappes phréatiques
- gazeuse, en faible quantité dans l'atmosphère

Une comparaison avec les autres planètes telluriques montre que ces dernières ne présentent pas cette originalité. En regardant le diagramme de phase de l'eau on constate que deux points sont importants dans l'existence de l'eau sous ses 3 formes : la pression et la température. Nous allons tenter d'expliquer quelle est l'origine des différences entre les couples p,T des différentes planètes fondant l'originalité "aquatique" de la Terre.

1. La température dépend en partie de la distance au Soleil. Ainsi, Mercure qui est la première planète du système solaire a une température de surface trop élevée pour avoir la possibilité d'avoir de l'eau liquide. Dans le cas de Vénus, l'énorme effet de serre dû à la présence d'une atmosphère ténue augmente drastiquement la température de surface, ce qui pose le même problème que sur Mercure. La distance entre la Terre et le Soleil, combinée à l'effet de serre relativement modéré fait que la Terre a une température autorisant la présence d'eau liquide.

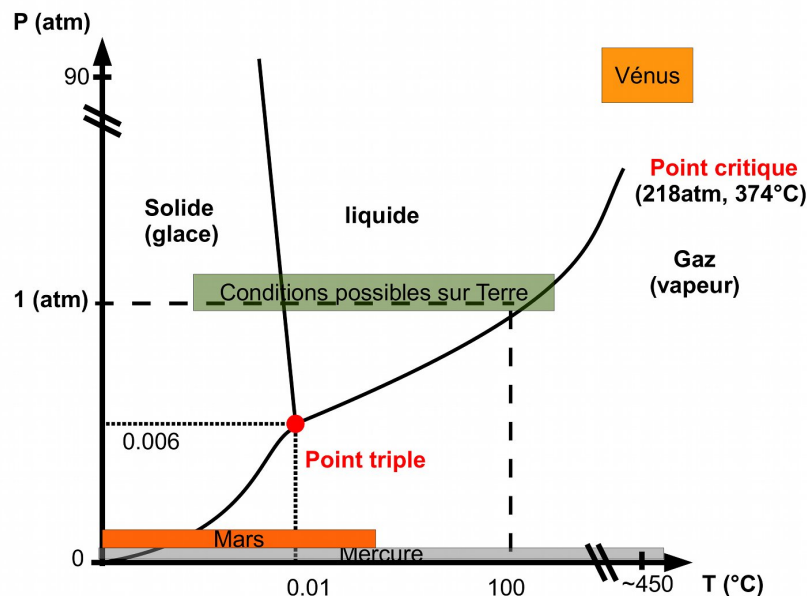


Fig. 12: Le diagramme de phase de l'eau avec les différentes conditions pression-température régnant sur les planètes telluriques

- Le deuxième paramètre qui joue un rôle important est la pression. On peut s'en rendre compte en comparant la Terre et Mars. Si les gammes de température réalisées sur les deux planètes sont assez voisines, la pression atmosphérique martienne est très faible. Ceci engendre une impossibilité pour Mars d'avoir de l'eau liquide à sa surface contrairement à la Terre. Nous expliquerons plus en détail la faible pression atmosphérique terrestre comparée à celle de Vénus au paragraphe B et martienne ci-après.

Ainsi, c'est le couple pression température qui joue fortement sur l'état physique de l'eau en surface et on ne peut résumer uniquement la présence d'eau au paramètre p ou au paramètre T. Ainsi, même avec une température plus modérée, l'eau liquide ne pourrait exister sur Vénus étant donné sa trop forte pression atmosphérique.

Ceci nous amène donc à nous poser la question de savoir ce qui gouverne la pression atmosphérique et donc la présence d'une atmosphère. Il s'agit en fait d'une simple question de taille de la planète. Plus la planète est grosse, plus elle est massive et plus sa gravité est importante. Ainsi, elle peut retenir plus facilement les gaz. En l'occurrence, Mars est trop petit pour avoir retenu une atmosphère importante et celle-ci a donc fui. C'est aussi le cas de Mercure qui est en plus soumis au "soufflage" constant en provenance du Soleil. A contrario, Vénus et la Terre ont une taille assez importante pour avoir retenu une atmosphère. Par ailleurs, la température a aussi un rôle important puisque plus la température est élevée, plus l'agitation moléculaire est forte et donc plus les molécules ont une vitesse importante leur permettant de s'échapper de l'attraction gravitationnelle de la planète. Dans tous les cas, l'atmosphère, par le mécanisme de l'effet de serre, a tendance à augmenter de façon plus ou moins importante la température de la planète. Ainsi, l'atmosphère importante de Vénus (90 bars) fait passer la température d'équilibre de la planète (c'est à dire la température ne tenant compte que de la distance au Soleil sans l'influence de l'atmosphère) de -20°C à +477°C alors que l'atmosphère moins dense (1 bar) de la Terre n'augmente la température d'équilibre que de -20°C à +20°C.

3 L'eau sur les autres planètes

Nous avons donc vu que les conditions de pression et de température gouvernent fortement l'état de l'eau à la surface des planètes. Cependant, étant donné le mode de formation commun entre toutes les planètes telluriques, il semble pertinent de se demander où est passé l'eau des autres planètes telluriques.

Pour Mars, nous avons déjà partiellement répondu à la question ; les conditions p,T font que l'eau en surface est soit sous forme solide, ce qu'on observe au niveau des calottes polaires, soit sous forme gazeuse. Dans le cas de la forme gazeuse, nous avons précisé au paragraphe précédent que la plupart des molécules s'échappaient de l'atmosphère martienne, l'eau en fait partie. Par contre, il faut envisager qu'en profondeur, la pression soit suffisante pour qu'il y ait de l'eau sous forme liquide telle que des nappes. Enfin, dans un passé lointain, Mars semble avoir eu de l'eau comme en témoigne l'existence de certains minéraux hydratés ou évaporitiques (gypse), de structures sédimentaires particulières (stratification entrecroisée par exemple) et des arguments morphologiques comme *Valles Marineris*.

Le cas de Mercure est analogue à celui de Mars. La présence d'eau est extrêmement réduite et se trouverait dans l'ombre des cratères qui ne verrait jamais le Soleil et où la température serait assez basse pour atteindre la condensation de l'eau en glace.

Enfin, pour Vénus, on devrait avoir une quantité phénoménale d'eau présente dans l'atmosphère. Or ce n'est pas le cas. Cela veut donc dire que cette eau est partie et pourtant la planète est assez massive pour la retenir dans son champ de gravité. L'hypothèse mise en avant est la possibilité d'oxydation de la surface Vénusienne par l'eau puis la perte du H_2 résultant par photodissociation et échappement.

On peut rappeler aussi que certains des objets ganymédiens présentent de l'eau sous ses trois états mais avec de l'eau liquide en profondeur comme nous l'avions souligné au A.

B Un champ magnétique intense

1 Origine et particularités du champ magnétique terrestre

La Terre possède un champ magnétique et son existence a été utilisée pour s'orienter dès le Xème siècle par les Chinois. Le champ magnétique de la planète Terre est essentiellement dipolaire avec un axe de dipôle aligné approximativement sur l'axe de rotation. Ce champ magnétique est intense, sa valeur va de 33 000 nT à l'équateur jusqu'à 70 000 nT aux pôles. La présence de ce champ magnétique a été un argument supplémentaire pour l'existence d'un noyau composé de fer. A l'heure actuelle, on propose que ce champ magnétique est produit par convection du noyau liquide externe selon le mode d'une dynamo autoentretenu : un conducteur, ici le fer liquide, est mis en mouvement et crée un champ magnétique. Un champ magnétique dans lequel se déplace un conducteur renforce le champ électrique : le champ est donc autoentretenu. La source du mouvement est ici la différence de température entre le noyau externe et la graine et le relargage d'éléments légers et d'énergie à la limite graine noyau externe.

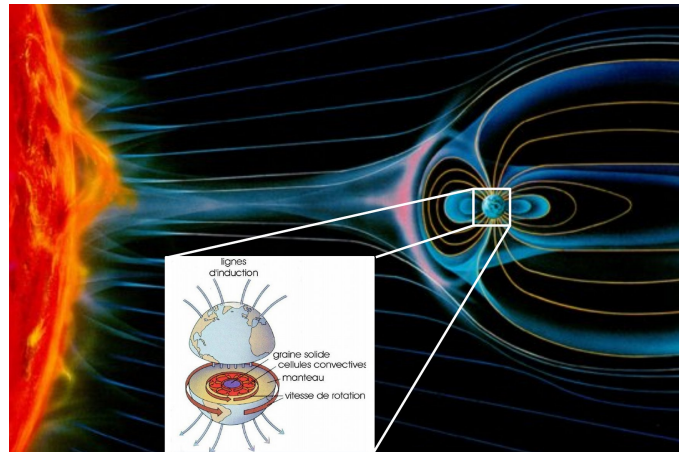


Fig. 13: Schéma de la genèse du champ magnétique terrestre et de la formation d'une magnétosphère

2 Le champ magnétique des autres planètes

A l'opposé, très peu de planètes telluriques possèdent un champ magnétique : Mars a un champ magnétique rémanent et on n'a jamais mesuré de champ magnétique sur Vénus. Seul Mercure possède un champ magnétique très faible (1% de celui de la Terre) ce qui conduit les scientifiques à se demander si oui ou non il est généré par effet dynamo. Si on peut supposer que Mars est trop petit pour avoir encore un noyau liquide et donc un champ magnétique, l'absence de champ magnétique sur Vénus est problématique puisque sa taille et donc l'énergie disponible est comparable à celle de la Terre.

Les planètes géantes possèdent toutes un champ magnétique beaucoup plus intense que celui de la Terre mais celui-ci est généré de façon différente puisque c'est au niveau des couches d'hydrogène et d'hélium gazeux puis métallique.

C Un satellite, la Lune, stabilisateur de paramètres orbitaux

La Lune est le satellite de la Terre situé à environ 380 000 km de nous. Elle est composée d'une croûte anorthositique, d'un manteau péridotitique et d'un noyau très réduit de sulfure de fer (l'existence du noyau lunaire est encore discutée). Parmi les planètes telluriques, seul Mars possède deux satellites, Phobos et

Deimos de même nature que leur planète. Cependant ces derniers sont plus petits et ne sont pas ronds. La Terre présente donc l'originalité d'avoir un satellite de nature compositionnelle identique et avec un mode de formation unique. Même déclassé, seul Pluton peut prétendre avoir un couple planète (naine) - satellite de nature identique.

1 La formation de la Lune

Les hypothèses sur la formation de la Lune ont été nombreuses :

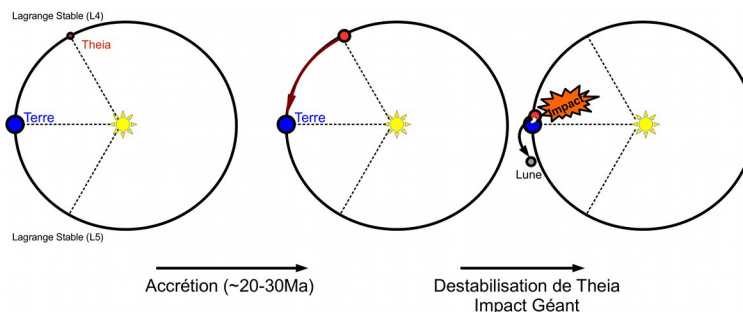
- L'hypothèse de la fission : l'idée était que la Lune s'était arrachée de la Terre à cause de la force centrifuge. Cette hypothèse est infirmée entre autre par le fait que la Lune ne se situe pas dans le plan équatorial de la Terre.
- L'hypothèse de la capture : la Lune se serait formée à un endroit différent de la Terre et aurait été capturée par cette dernière au cours de son passage. Cette hypothèse est infirmée, d'une part, par la difficulté de freiner la Lune pour la capturer et, d'autre part, par les isotopes de l'oxygène qui montre que la Lune dans un réservoir identique à celui de la Terre.
- L'hypothèse de la co-formation : la Lune se serait accrétée directement autour de la Terre. Le problème est que dans ce cas là, la Lune devrait avoir un noyau de taille beaucoup plus élevée et ne devrait donc pas être appauvrie en éléments sidérophiles.
- La théorie de l'impact géant : un corps de la taille de Mars aurait impacté la Terre au cours de son accrétion/différenciation et en aurait arraché un morceau. Cette hypothèse permet d'expliquer l'appauvrissement en sidérophile de la Lune, l'impact emportant essentiellement du manteau et la cogénicité démontré par les isotopes de l'oxygène.

La date de formation de la Lune est intimement liée avec la formation du noyau. Nous avons vu que le noyau s'était formé en environ 60Ma : ainsi, l'impact qui forme la Lune a dû se produire aux alentours de cette époque puisque la quantité de fer et d'éléments sidérophiles dans la Lune est très réduite. De plus, les échantillons ramenés par les missions Appolo ont montré que les roches lunaires avaient un âge maximum de 4.4Ga témoignant que la Lune s'était formée moins de moins de 150Ma après la Terre.



Theia : une protolune située sur un point de Lagrange impactant la Terre

Les points de Lagrange sont des points des orbites des planètes où peuvent se trouver des corps dans des positions plus ou moins stables. L'orbite terrestre présente deux points de Lagrange avec des positions stables. Certains pensent que Theia, l'impacteur qui produisit la Lune se trouvait sur l'un de ces points. Cette hypothèse est basée sur des simulations numériques qui montrent qu'une bonne partie de la Lune doit être formée par la matière de l'impacteur. Or la Terre et la Lune présentent des caractéristiques identiques au niveau de leurs isotopes de l'oxygène. Ceci signifie qu'elle se situait à la même distance du Soleil et donc que l'impacteur aussi. Pourquoi Theia est-il sorti de sa position stable ? Il semblerait que si le corps présent sur le point de Lagrange acquiert une masse trop importante, alors la stabilité est rompue et le corps le plus petit "tombe" sur le corps le plus grand. C'est ce qui serait arrivé pour le couple Terre-Lune.



Par ailleurs, l'hypothèse de l'impact géant pour la formation de la Lune est aussi confirmée par des indices isotopiques. Lorsqu'un corps subit un impact, une partie de la matière se volatilise. Pour un même atome, les isotopes les plus légers sont plus volatilisés que les isotopes lourds justement à cause de la légère différence de masse. Que ce soit sur Terre ou sur la Lune, on observe une anomalie des isotopes du fer : sur Mars et sur l'astéroïde Vesta le ^{54}Fe et le ^{57}Fe se trouvent en proportion identique alors que sur la Terre et sur la Lune, le ^{54}Fe est en proportion beaucoup plus faible que le ^{57}Fe . Ceci pointe donc aussi en direction d'un impact géant qui aurait plus facilement volatilisé le fer léger que le fer lourd conduisant à cette différence.

2 La stabilisation des paramètres orbitaux de la Terre

Deux paramètres orbitaux, l'obliquité et la précession, sont stabilisés par la présence de la Lune. En effet, la Lune exerce des forces de marée sur la Terre. Il se trouve que les bourrelets de marée sont légèrement

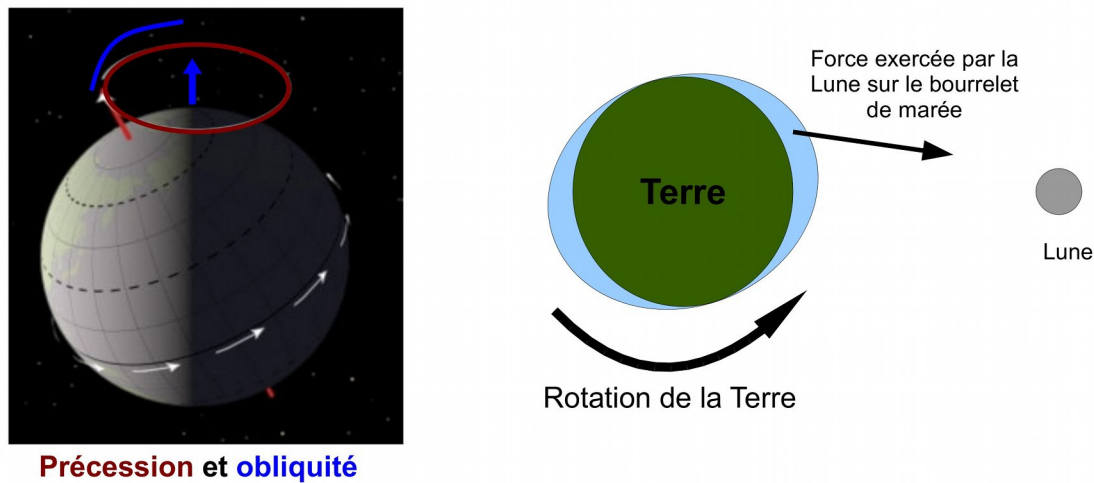


Fig. 14: Précession, obliquité et stabilisation des paramètres orbitaux de la Terre par la Lune

en avance par rapport à l'axe Terre-Lune à cause de la rotation de la Terre. L'attraction de la Lune sur ce bourrelet a tendance à ralentir la rotation de la Terre et en conséquence à stabiliser ces deux paramètres orbitaux.

3 L'extrême fin de l'accrétion vue par la Lune

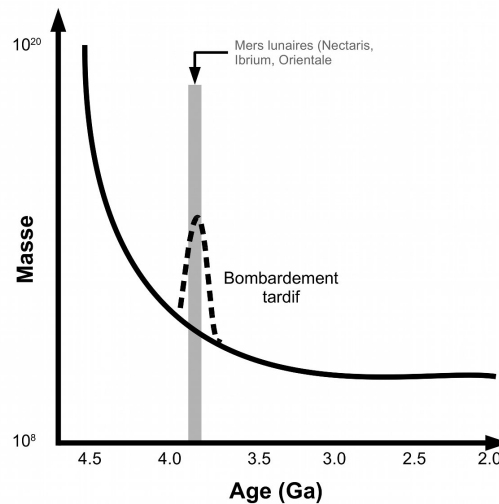


Fig. 15: Arguments géologiques extra-terrestres en faveur du bombardement tardif

La Lune possède une croûte anorthositique formée vers 4.45Ga. Cette croûte est criblée de cratères à l'intérieur desquels se sont mis en place des basaltes. La datation de ces basaltes aux alentours de 3.8Ga a fait penser qu'il avait dû exister un épisode de bombardement intense et tardif dans l'histoire du système solaire entre 3.8 et 3.9Ga. Ainsi, une quantité de matériel non négligeable semble avoir traversé le système solaire et impacté l'ensemble des corps du système solaire interne puisque Mercure est aussi très fortement cratérisé. Deux hypothèses sont proposées pour expliquer ce bombardement tardif

- La première hypothèse postule que les planètes géantes se trouvaient beaucoup plus proches du Soleil que maintenant (entre 5.5 et 15 U.A. avant contre 5.2 et 30 U.A à l'heure actuelle). De nombreux débris non accrétés se trouvaient aussi au delà de l'orbite du Neptune d'alors. Les modélisations physiques et informatiques montrent que les planètes géantes ont alors du interagir et aller prendre la place qu'elles occupent actuellement dans le système solaire. Ainsi, tous les débris non accrétés ont été éjectés pour partie hors du système solaire et pour partie vers le système solaire interne, provoquant le bombardement tardif.
- La deuxième hypothèse propose qu'étant donné la plus faible quantité de matière disponible dans la partie la plus externe du système solaire, Uranus et Neptune auraient été plus longs à se former. Ainsi, leur accrétion tardive aurait pu modifier les équilibres gravitaires et éjecter une partie des débris vers le

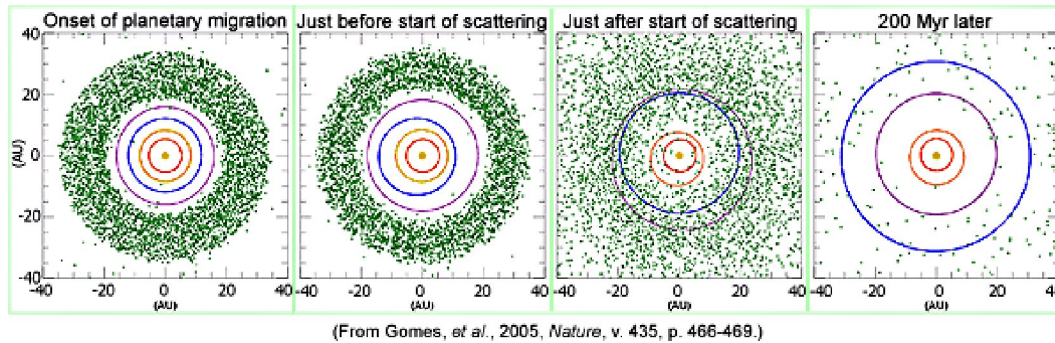


Fig. 16: Migration des planètes géantes et mise en place du bombardement tardif

Sur notre Terre, si nous n'avons pas de traces physiques comme des cratères de ce bombardement tardif, son existence permet de résoudre certains problèmes. Par exemple, si on regarde la quantité d'iridium présente sur Terre, il y en a trop. L'iridium est un élément extrêmement sidérophile : la quantité d'Iridium dans les roches du manteau et de la croûte devrait être extrêmement faible puisque l'ensemble de l'Iridium devrait avoir migré avec le fer dans le noyau. Or, on en retrouve en quantité trop importante : on peut donc penser que des météorites ont amené de l'iridium tardivement sur Terre. De même, ce bombardement tardif a une importance capitale dans l'origine de l'eau sur Terre puisque c'est lui qui aurait pu refournir de l'eau à la Terre après l'impact géant qui a créé la Lune et donc certainement amputé une bonne partie de la réserve d'eau terrestre.

Par sa position et son origine, la Terre a pu acquérir la présence d'eau sous ses 3 états à la surface. La faible modification des paramètres orbitaux de la Terre grâce à la stabilisation réalisée par la Lune a permis de minimiser les variations de température, permettant à l'eau de perdurer jusqu'à l'heure actuelle. L'existence de cette couche aquatique a eu de nombreuses conséquences qui ont conduit à des originalités qu'on pourrait qualifier de secondaires sur Terre. Ces originalités sont au nombre de 3 : l'apparition de la Vie certainement grâce au milieu aquatique, la modification importante de son atmosphère par la présence d'eau et de la Vie et enfin, la possibilité d'une tectonique des plaques.

III Les originalités secondaires de la planète Terre

A La présence de Vie diversifiée en surface

Parmi les originalités les plus visibles, outre l'eau, la Vie est aussi à plus d'un titre exceptionnelle. Sur notre planète, cette Vie est incroyablement diversifiée et a réussi à coloniser tous les milieux, aériens, aquatiques et même endogés. Cette conquête s'est accompagnée d'une grande diversification des plans d'organisation en rapport avec des adaptations spécifiques à chacune des contraintes associées aux différents environnements de vie.

1 Conditions d'existence de la Vie sur une planète

Différentes conditions sont nécessaires à l'établissement de la Vie telle que nous la connaissons sur une planète. Tout d'abord, la Vie nécessitant de l'énergie dans le cadre de la réalisation de ses fonctions métaboliques, il est nécessaire que la planète soit présente en orbite autour d'un certain type d'étoile dont fait partie le Soleil (les étoiles avec une luminosité trop faible sont donc à exclure). Ensuite, il faut aussi que cette planète soit située dans ce qu'on appelle la zone d'habitabilité c'est à dire une zone où l'eau peut exister sous ses 3 états. Dans le système solaire, cette zone entoure la Terre.

La Terre est donc à l'heure actuelle dans le système solaire, la seule planète candidate à la Vie en surface. Cependant, au début de l'histoire du système solaire, on sait que le Soleil avait une luminosité plus faible (70% de celle actuelle). La présence d'eau liquide est donc problématique. On pense que l'atmosphère avait plus de CO_2 et donc un effet de serre plus important qui permettait d'avoir de l'eau liquide. Ainsi, la notion de zone continuellement habitable qui est uniquement une vision stellaire se chevauche avec la notion d'habitabilité planétaire qui tient compte, entre autre, de la présence d'une atmosphère. Au début de son histoire, étant donné une atmosphère plus importante, Mars aurait pu être une planète habitable bien que hors de la zone continuellement habitable.

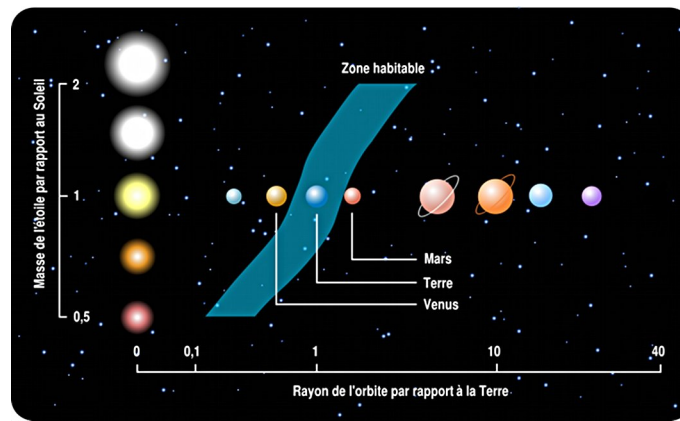


Fig. 17: Matérialisation de la zone continuellement habitable en fonction de la taille de l'étoile et de la distance entre l'étoile et la planète

2 Les arguments géologiques permettant de dater les origines de la Vie

La Vie a dû apparaître sur Terre de façon très rapide. Nous avons en effet déjà vu que l'océan, bien que chaud, avait dû être présent après la première centaine de millions d'années d'existence de notre planète. Diverses traces laissées par une Vie potentielle permettent de remonter à l'apparition d'une Vie très tôt dans l'histoire de la Terre :

- Arguments géochimiques : Il a été retrouvé dans les roches métamorphiques d'Isua au Groenland des inclusions de graphite. En étudiant la composition isotopique de ce graphite, on constate qu'il est pauvre en ^{13}C ($-25\text{‰} < \delta^{13}\text{C} < -6\text{‰}$). De telles signatures légères en carbone 13 sont habituellement observées lors de la photosynthèse. On peut donc penser que les organismes photosynthétiques auraient pu exister dès cette époque. Les détracteurs de cette théorie lui opposent la contamination possible par de la matière organique actuelle ou bien encore le fait que les réactions métamorphiques peuvent aussi conduire à des fractionnements isotopiques similaires.
- Arguments morphologiques : on retrouve dans des roches datant de 3.5Ga en Australie et en Afrique du Sud des formes qui ressemblent à des filaments bactériens. Etant donné que ce ne sont que des arguments morphologiques, ces interprétations sont fortement débattues.
- Arguments sédimentologiques : les stromatolithes, qui sont des constructions réalisées par des voiles microbiens, se retrouvent sous forme de fossiles datant de 2.7 à 3.8Ga. Ces traces de Vie sont dans l'ensemble assez acceptées par la communauté scientifique.

Ainsi, la Vie est apparue sur Terre au maximum moins de 700Ma après la formation de la Terre. Etant donné l'importance du bombardement tardif, on peut supposer que la Vie est même apparue très rapidement en environ 100Ma.

3 Les hypothèses sur l'origine de la Vie sur Terre

La question qui vient donc tout naturellement est comment cette Vie est-elle apparue, quelle est son origine ? Là encore, plusieurs théories sont échafaudées :

- L'origine atmosphérique : A l'époque de Stanley Miller (1952) on pensait que l'atmosphère primitive était composée d' H_2 , CH_4 , NH_3 et H_2O . Miller réalisa donc une expérience où il introduisit cette composition atmosphérique et sous laquelle il fit bouillir de l'eau et éclater des décharges électriques, analogues d'éclairs que l'on supposait être abondants dans l'atmosphère terrestre en ces temps reculés. Au bout de plusieurs mois de fonctionnement, des réactions entre tous les composés avaient produit de très nombreuses molécules organiques, dont des acides aminés que l'on retrouvait en solution dans l'eau. Si cette expérience permettait de produire ces molécules, on sait maintenant que l'atmosphère primitive ne contenait pas de CH_4 et de NH_3 .
- L'origine océanique : Le manteau, principalement constitué d'olivines et de pyroxènes, ou bien des basaltes ont rapidement interagit avec l'eau des océans. Ce manteau devait être beaucoup plus chaud que le manteau actuel, des circulations hydrothermales devaient s'établir, et l'eau devait réagir avec l'olivine et permettre la formation de serpentine et de H_2 . L'hydrogène ainsi libéré peut réagir avec du CO_2 ou du N_2 dissout dans l'eau et former du méthane, de l'ammoniac (exemple : $4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$), qui peuvent ensuite réagir entre eux pour être à la base d'une synthèse de molécules organiques type acides aminés ou bases azotées. On peut opposer à cette proposition pour l'origine de la Vie la faible stabilité des molécules d'ARN et d'ADN à haute température.

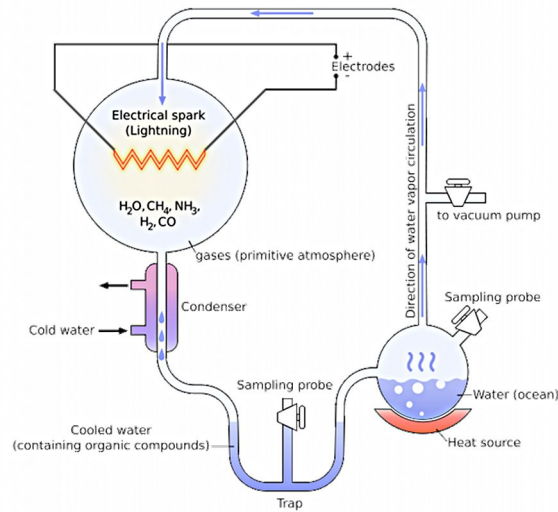


Fig. 18: Schéma de l'expérience menée par Stanley Miller en 1952

- L'origine extraterrestre : les comètes et les chondrites carbonées contiennent de la matière organique et celle-ci peut être plus ou moins complexe. On trouve bien sûr de l'eau sous différentes formes mais aussi des molécules organiques que ce soient des acides aminés (glycine et alanine par exemple) ou des bases azotées (purine et pyrimidine). Si cette matière est arrivée sur Terre lors du bombardement tardif, elle pourrait bien avoir aussi un rôle dans l'origine de la Vie.

4 Comment passer des molécules prébiotiques à la véritable Vie ?

Une fois ces premières molécules prébiotiques arrivées sur Terre, il a fallu ensuite les polymériser ce qui n'est pas forcément le plus facile. Certains pensent que les surfaces minérales auraient pu avoir un rôle important dans ce mécanisme. En effet, les molécules organiques peuvent s'adsorber sur les surfaces de argiles et ainsi être mises en contact les unes avec les autres permettant ainsi leur polymérisation. Ces argiles, lorsqu'il y a trop d'eau peuvent même séparer les feuillets dont elles sont constituées. Si ce feuillet s'assemble avec un autre feuillet sur lequel il n'y a pas de molécules organiques, celles d'en face vont donc se disposer en créant une séquence complémentaire : certains pensent que l'origine de la réplication pourrait venir de là. D'autres pensent au contraire que le monde a été au départ uniquement à ARN surtout après la découverte d'ARN autocatalytique que sont les ribozymes dans les années 80.

5 La Vie sur les autres planètes

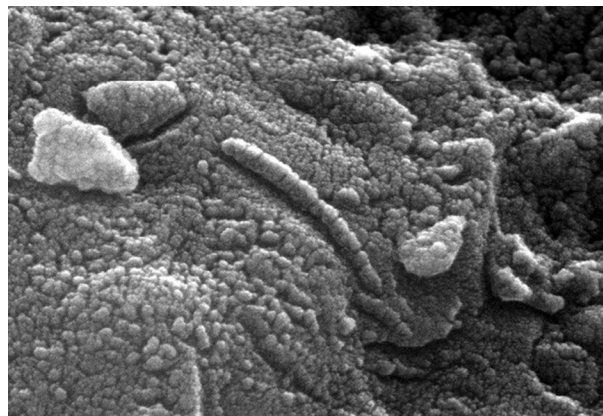


Fig. 19: Image obtenue au microscope électronique à balayage dans la météorite ALH84001

Etant donné les origines diverses évoquées pour la Vie, notamment celle extraterrestre, et la possibilité d'existence d'eau liquide au sein de certains corps du système solaire, il n'est pas impossible que la Vie ait existé ou existe ailleurs dans le système solaire. Cette dernière aurait cependant une différence majeure avec celle de la Terre, elle n'est pas visible. On peut notamment signaler que l'existence d'océan liquide dans les

satellites de glace pourrait renfermer de la Vie surtout après la découverte de formes bactériennes dans le lac Vostok situé en Antarctique et qui est situé sous 4000m de glace. La découverte aussi du quadruplet fossile morphologique + carbonate + matière organique + magnétite ressemblant à celle produite par les bactéries magnétosensible dans la météorite martienne ALH84001 ne permet pas d'exclure une vie endogée sur Mars. Enfin, la présence de méthane sous forme liquide, gazeuse et solide sur Titan fournirait un analogue de l'eau terrestre dans lequel pourrait ou aurait pu apparaître la Vie. De plus, la présence d'ammoniac rendrait possible les réactions de Miller et permettrait de créer des molécules prébiotiques.

B La présence de dioxygène et d'une faible quantité de CO₂ dans l'atmosphère

Nous avons déjà évoqué l'existence de l'atmosphère terrestre lorsque nous avons expliqué sa formation. Nous avons aussi mentionné que deux autres planètes telluriques possèdent une atmosphère, à savoir Vénus et Mars. Cependant, l'atmosphère terrestre a subi une évolution différente de ces deux planètes du fait de la présence d'eau liquide et de la Vie.

1 La composition des atmosphères planétaires

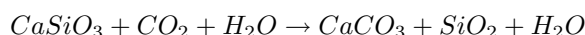
	Vénus	Terre	Mars
CO ₂	96%	0,035%	95%
H ₂ O	traces	0-4%	traces
N ₂	3,5%	78,1	3%
O ₂	0	21%	traces
Gaz rares (Ar, Xe...)	traces	~1%	~2%
Pression atmosphérique (bars)	90	1	0,008

Tab. 3: Comparaison de la composition des atmosphères planétaires

La simple observation du tableau 3 montre que si Vénus et Mars ont des compositions atmosphériques similaires, la Terre est quant à elle complètement originale. Etant donné la formation commune de ces trois planètes il nous faut expliquer l'origine de ces différences qui est une originalité de la planète Terre.

2 Le piègeage du CO₂ dans les carbonates et les roches carbonées

Nous savons qu'au début de l'histoire de l'atmosphère terrestre, celle-ci était riche en CO₂ et en eau. Nous avons aussi vu que l'eau avait rapidement précipité sous la forme d'océan relativement chaud. La mise en place d'une croûte océanique basaltique à cette époque a certainement permis de piéger une bonne partie du CO₂ atmosphérique au sein des océans par altération des pyroxènes :



Après l'apparition de la Vie, la photosynthèse a pu aussi piéger une partie du CO₂ sous forme de carbone organique. Si ce carbone organique est enfoui sans dégradation, alors le CO₂ se retrouve piégé dans les couches sédimentaires sous forme de roches carbonées telles que le pétrole et le charbon. Enfin, la création des tests/squelettes des êtres vivants, notamment les organismes aquatiques tels que les foraminifères, les coccolithophoridées ou bien encore les coraux ont permis de déplacer l'équilibre de précipitation des carbonates vers la droite par leur consommation de CO₂ au cours de la photosynthèse par exemple.

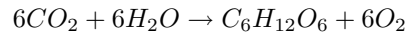


Ces différents phénomènes permettent donc d'expliquer la forte diminution de la quantité de CO₂ au cours des temps géologiques ainsi que son faible taux comparé aux autres planètes telluriques. La deuxième originalité de la composition atmosphérique de la Terre est la présence de dioxygène.

Etant donné que les carbonates font partie des minéraux témoignant soit de la présence d'eau liquide, soit de réaction de type photosynthétique, ils sont activement recherchés sur les autres planètes. A l'heure actuelle, seuls des résultats très controversés ont été apportés pour Mars montrant que de la poussière de carbonates est présente par certains endroits. Enfin, les carbonates présents dans la météorite ALH84001 semblent être dus à l'altération terrestre et donc non originaires de Mars.

3 La formation du dioxygène

Le dioxygène est intimement lié à la présence de Vie sur Terre. Nous avons déjà discuté de ce mécanisme qu'est la photosynthèse au paragraphe précédent en précisant qu'il consomme du CO_2 et permet la formation de matière carbonée. L'un des déchets de cette photosynthèse est justement le dioxygène qui constitue 21% de notre atmosphère planétaire. Ce dioxygène a permis l'émergence de Vie aérobie qui utilise à son tour l' O_2 comme source de pouvoir oxydant. On peut résumer le bilan de la photosynthèse par la réaction suivante :



Ainsi, il est aussi important de savoir quand la photosynthèse est apparue. Les premiers arguments géochimiques montrant des bassins localement oxydants et donc pouvant potentiellement résulter d'une activité photosynthétique ont été trouvés dans des sédiments du Groenland : il s'agit d'anomalies isotopiques en carbone (voir 2) et en plomb. Cependant, ces interprétations sont sujettes à débat.

Par contre, la présence de BIF (*Banded Iron Formation* ou Fers rubanés) datés de 2.7Ga témoigne du passage d'un océan réduit à un océan oxydant et donc à un événement d'oxydation généralisé : une grande quantité de fer réduit a pu être accumulée dans les océans avant 2.7Ga à cause de l'absence d' O_2 ; dès que le dioxygène est apparu massivement, celui-ci a pu précipiter sous forme de BIFs. Par ailleurs, ces résultats sont confirmés par des études réalisées sur les isotopes du soufre qui montrent un changement de fractionnement isotopique. Cette modification serait à relier à l'apparition de la couche d'ozone, issue de réaction impliquant le dioxygène. En effet, les sulfures et les sulfates peuvent être dissociés par les rayons UV. Dès la mise en place de la couche d'ozone, cette dissociation devient impossible et le fractionnement isotopique s'en trouve modifié puisque les mécanismes changent.

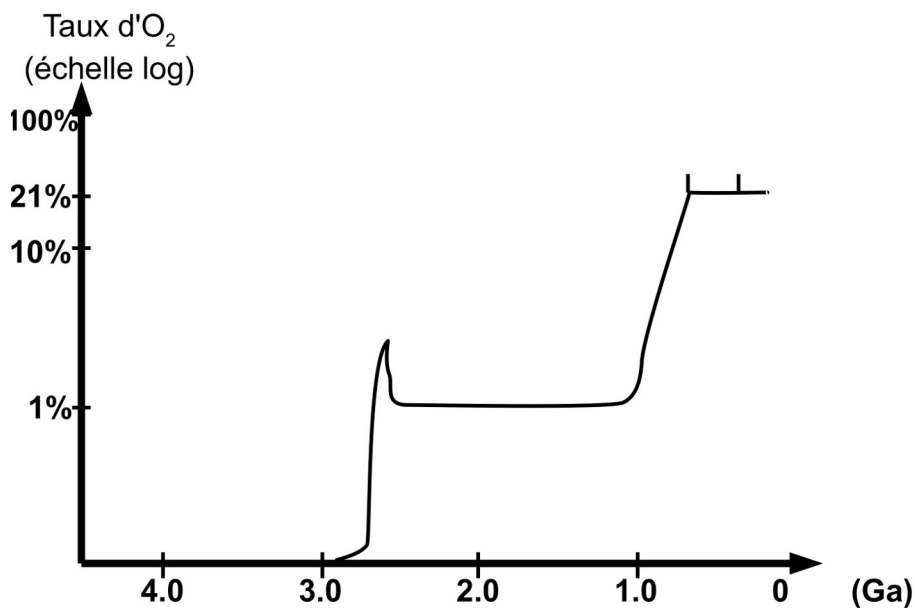


Fig. 20: Evolution de la quantité de dioxygène dans l'atmosphère terrestre

Par ailleurs, on peut mentionner que la mise en place de cette couche d'ozone qui arrête les UVs a permis la sortie des eaux et la conquête des milieux terrestres

C Des plaques lithosphériques à croûte partiellement granitique animées d'une tectonique

1 Quelques arguments en faveur de la tectonique des plaques

La dérive des continents, prélude à la théorie de la tectonique des plaques a été introduite par Alfred Wegener. Celui-ci avait en effet remarqué que les côtes de l'Amérique du Sud et de l'Afrique pouvaient s'emboîter et qu'il existait certaines continuités géologiques entre les deux continents. Par ailleurs, l'existence d'espèces fossiles (le glossoptéris qui est une fougère fossile présente sur tous les continents ou le Mésosaure qu'on retrouve en Amérique du Sud et en Afrique par exemple) sur différents continents à l'heure actuelle séparés a confirmé cette théorie. En 1962, Hess postula que l'origine de cette tectonique était la création de plancher océanique

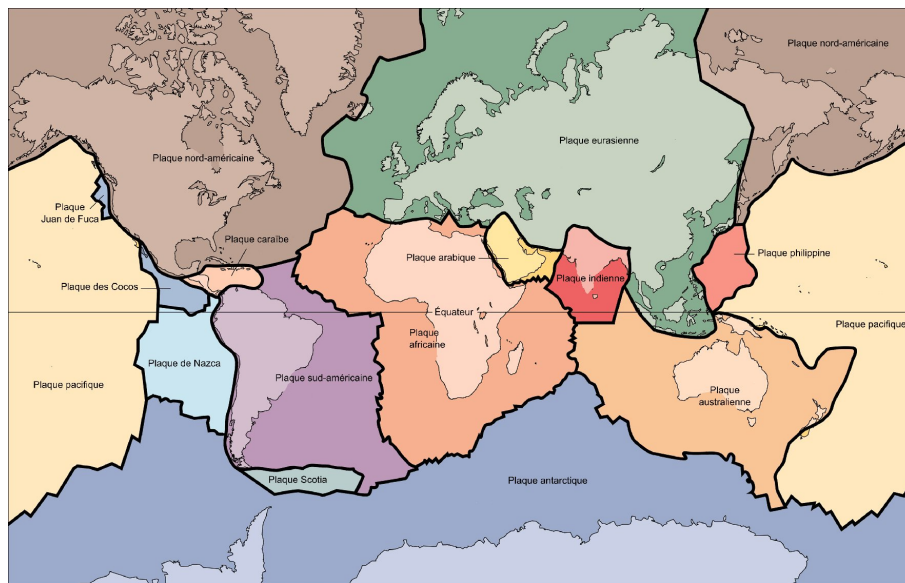


Fig. 21: Subdivision de la Terre en plaques lithosphériques

au niveau des dorsales médio-océaniques à la manière d'un tapis roulant. En 1963, Vine et Matthews, par la mesure d'anomalies du champ magnétique enregistrées dans les basaltes confirma cette proposition.

La Terre est découpée en plaques lithosphériques qui sont des calottes d'environ 100 km d'épaisseur et qui sont limitées latéralement par des zones actives. Le découpage s'est fait en remarquant que la déformation et les manifestations telluriques (seismes et volcanismes) sont concentrées en certains endroits de l'écorce terrestre qu'on considère comme étant ces frontières de plaques.

2 Tectonique des plaques, convection mantellique et comparaison aux autres planètes

L'origine de cette tectonique des plaques provient de la dissipation de la chaleur terrestre (essentiellement générée par radioactivité). La quantité d'énergie disponible est globalement fonction de la taille de la planète. Ainsi, la tectonique des plaques ne devrait pas être une originalité terrestre : Vénus devrait aussi présenter une telle dynamique. Tout d'abord, rappelons que le transport de la chaleur terrestre est réalisée au sein du manteau par convection. Cette convection peut prendre différentes formes sur Terre : une convection sous forme de cellule dont la partie descendante est matérialisée par les zones de subduction (cette convection tient son origine d'un refroidissement par le haut et un chauffage diffus dans le manteau par radioactivité) et une convection plus modeste sous forme de panache due à un chauffage faible par le bas (évacuation de la chaleur en provenance du noyau). On comprend donc que la présence de plaques à la surface de la Terre gouverne donc le type de convection : essentiellement des cellules et quelques panaches.

Cette convection en cellules est due à la possibilité d'un découplage mécanique entre la lithosphère et l'asthénosphère : la lithosphère est rigide alors que l'asthénosphère est ductile. L'asthénosphère est donc capable de convecter contrairement à la lithosphère qui ne peut qu'être cassante. On touche là encore à une originalité de la Terre. En effet, la présence d'eau modifie fortement le comportement des roches, notamment leur viscosité. En l'occurrence, l'existence d'eau dans le manteau terrestre a tendance à diminuer sa viscosité contrairement à la lithosphère. On obtient ainsi une différence de deux ordres de grandeurs au niveau de la viscosité qui permet de créer ce découplage.

Sur Mercure, la planète est semble-t-il trop petite pour avoir eu une tectonique. Sur Mars, on ne peut pas véritablement parler de tectonique puisqu'on ne constate que quelques volcans ça et là. Le Dôme Tharsis, qui est le champ de volcans martiens le plus important résulte sans doute de l'action d'un point chaud. Dans tous les cas, il n'y a pas de plaque. Reste Vénus, que nous pouvons considérer de plus en plus comme une sœur de la Terre. Cette dernière présente des volcans actifs un peu partout à la surface. Cependant, ces volcans sont répartis de façon aléatoire contrairement aux alignements qui existent sur Terre et qui forme certaines bordures de plaques.

On peut proposer deux raisons pour lesquelles il n'y a pas de tectonique des plaques sur Vénus :

- Nous avons déjà précisé que l'eau était complètement absente de Vénus. Le manteau n'est donc pas hydraté et il n'y a pas de découplage possible entre une lithosphère rigide et une asthénosphère ductile empêchant ainsi l'individualisation verticale de plaques.
- Par ailleurs, la température de surface de Vénus étant d'environ 470°C, la lithosphère doit donc être moins visqueuse et plus ductile. La déformation peut donc être accommodée de façon plastique et non cassante

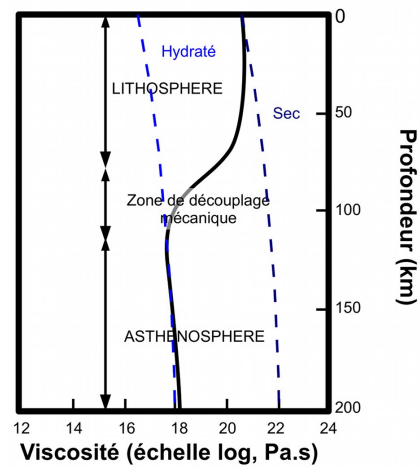


Fig. 22: Effet de l'eau sur la viscosité des matériaux terrestres et découplage lithosphère asthénosphère

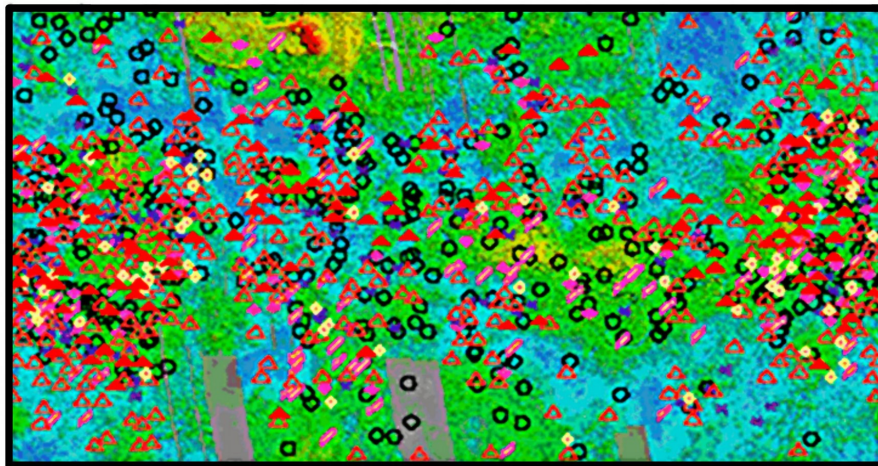


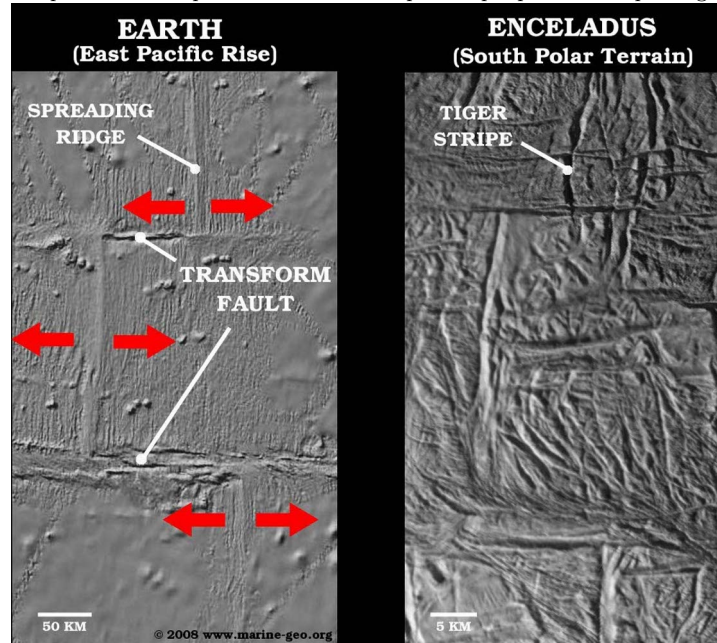
Fig. 23: Répartition des volcans à la surface de Vénus obtenus grâce aux image de MAGELLAN. Même si on note différents types d'édifice (signifiés par les différents symboles), aucun ne semble caractéristique d'une tectonique des plaques

comme à la surface de la Terre. On constate en effet par endroit des reliefs qui proviennent du mouvement de convergence de la lithosphère vénusienne et des zones volcaniques qui par endroit proviennent de mouvement de divergence. Enfin, la répartition des volcans laissent penser que la convection est là encore de type point chaud.



Une tectonique des plaques sur Encelade ?

Encelade est un des satellites de Saturne. Malgré sa faible taille, il présente une activité tectonique importante. L'hémisphère Nord est constitué principalement de terrains cratérisés et donc anciens. L'hémisphère Sud n'est que peu cratérisé et est donc jeune. Près du pôle Sud, une zone circulaire centrée sur le pôle et s'étendant approximativement à l'intérieur du parallèle -60° lat. Sud est occupée par des terrains sans cratère d'impact : c'est la zone des rayures de tigre. Ces rayures de tigris correspondent à des fractures (nommées sulcus) par où s'échappent des jets de vapeurs d'eau riches en matière organique. Cette zone des rayures de tigre est ceinturée d'une chaîne de montagnes dites circumpolaires. Par analogie avec la Terre, les géologues de la NASA ont interprété ces zones de volcanisme aquatique comme étant des vallées axiales bordées par des zones plus montagneuses qui pourraient constituer la dorsale. Encelade pourrait donc présenter une tectonique des plaques à lithosphère glacée.



3 Une croûte granitique sur Terre

Lorsqu'on regarde la répartition des élévations des différentes planètes telluriques on constate que la Terre présente une courbe bimodale qui peut suggérer une différence de pétrologie et chimie entre des reliefs négatifs et des reliefs positifs. A l'opposé, Vénus ne présente qu'une courbe de type normale (au sens mathématique) et Mars une courbe assez aplatie.

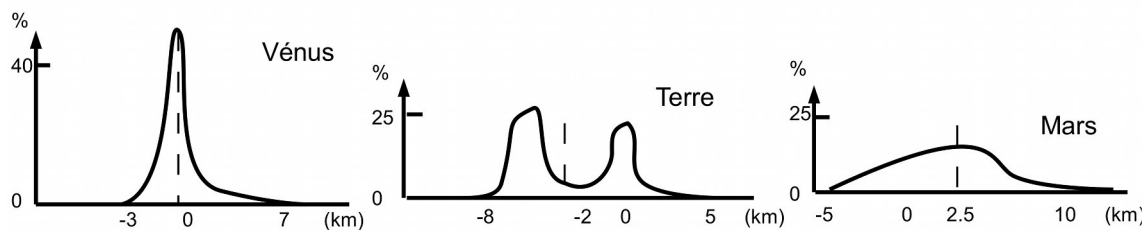


Fig. 24: Répartition de l'élévation des terrains sur Vénus, la Terre et Mars

De plus, lorsqu'on regarde la chimie des surfaces de ces planètes, on constate une différence de taille : sur Terre, il existe une croûte dite continentale d'affinité chimique granitique alors que la croûte de Vénus est exclusivement basaltique et celle de Mars essentiellement basaltique aussi avec quelques dépôts sédimentaires. Ainsi, la Terre a aussi une croûte originale. Cette croûte s'est essentiellement mise en place à l'Archéen vers 2.5 à 3Ga. Cependant les premières traces de croûte granitique remonte à 4Ga comme en témoignent des inclusions de quartz à l'intérieur de zircons datés de cette époque.

La mise en place de la croûte continentale granitique a été permise par la tectonique des plaques : à l'archéen, le gradient géothermique était plus élevé (attesté par des assemblages sapphirine+quartz témoignant de température de 900°C à 60km de profondeur + l'existence et la chimie des komatiites qui témoignent d'un manteau plus chaud) et permettait la fusion de la croûte océanique hydratée. La fusion de cette croûte

hydratée permet la genèse de magma de type TTG qui ont des compositions chimiques et minéralogiques voisines de celles des granites actuels.

Conclusion

La planète Terre partage une origine commune avec l'ensemble des planètes du système solaire. Les grandes lignes de sa formation ont été les mêmes que ses voisines telluriques à savoir une accréation de corps chondritiques, une fusion partielle due à la grande quantité d'éléments radioactifs qui a mené à une différenciation en enveloppes concentriques : noyau-manteau-atmosphère et hydrosphère. Cependant, une première originalité a été mise en place au cours de cette différenciation, à savoir l'impact géant qui forma son satellite, la Lune, qui permet de stabiliser certains paramètres orbitaux de la Terre. La position de la Terre dans le système solaire a permis l'apparition d'eau liquide en surface ce qui a conduit à la mise en place d'originalités par rapport aux autres planètes. Grâce à cette eau, la Vie a pu se développer, une tectonique des plaques unique dans le système solaire s'est mise en place et enfin l'atmosphère s'en est trouvée profondément modifiée. La Vie a en retour conduit à la formation de nouvelles originalités comme l'apparition du dioxygène dans l'atmosphère. En plus de permettre le développement de Vie aérobie, ce dioxygène a participé à la formation de la couche d'ozone qui couplée à l'action protectrice d'un champ magnétique intense a permis la sortie des eaux et la colonisation du milieu aérien.

Ce sont ces caractéristiques uniques qui conditionnent l'existence de la Vie et donc la possibilité de Vie extra-terrestre. Ainsi, les observations en direction des exoplanètes se font de plus en plus actives et la découverte d'une ou des originalités que nous avons présentées, particulièrement celles liées à la présence d'eau, permettront peut-être de répondre un jour à la question "Sommes nous seuls dans l'Univers?".