

L'univers et les grandes étapes de la formation du système solaire

Tristan FERROIR (<http://tristan.ferroir.free.fr>)

Pour des informations plus importantes sur ce qui concerne ce sujet, vous pouvez consulter une correction d'écrit blanc entièrement rédigée que j'ai mise en ligne ici : **Origines et originalités de la planète Terre** et dont le lien PDF est aussi disponible sur la même page.

NOTE : La correction semble longue mais c'est parce qu'il y a beaucoup d'images !

Introduction

Le système solaire a une configuration bien connue. Certes, les découvertes de ces dernières années notamment d'objets dans la ceinture de Kuiper ont conduit au déclassement de Pluton mais le système solaire est bien connu depuis la découverte de Pluton en 1930 par Clyde Tombaugh. Les questions qui restent cependant ouvertes sont les mécanismes ayant conduit à la formation du système solaire. C'est en regardant notre environnement proche ou lointain, l'univers qu'il est possible de proposer différentes étapes dans la formation du système solaire. Par ailleurs, outre les étapes, il nous faut également expliquer la structuration du système solaire ainsi que sa composition chimique qui découle de l'histoire présolaire de l'endroit où se trouve notre système.

I Les constituants principaux de l'Univers

A Les étoiles et la formation des atomes

- Une étoile est un objet sphérique assez massif pour pouvoir briller par lui-même. Une étoile est en équilibre entre la gravitation qui tend à la faire s'effondrer et l'énergie de fusion thermonucléaire contrant la gravité.
- Une étoile a une vie déterminée par sa masse. On peut ranger l'évolution des étoiles dans le diagramme d'Hertzsprung-Russell qui est basée sur l'observation d'un grand nombre d'étoiles.

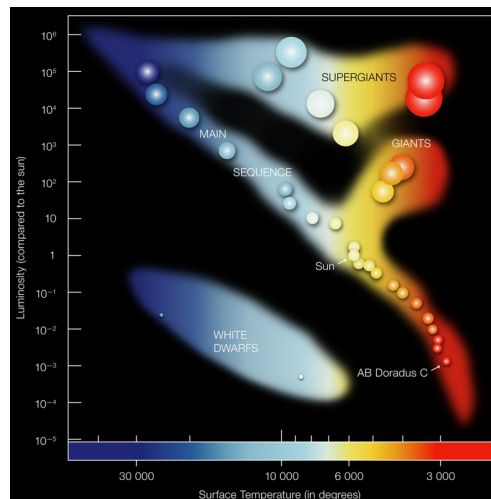


FIGURE I.1 – Le diagramme d'Hertzsprung-Russell permet de classer les étoiles. Le soleil se situe sur la séquence principale comme 90% des étoiles.

- Les étoiles peuvent se rassembler en amas ou en nébuleuse

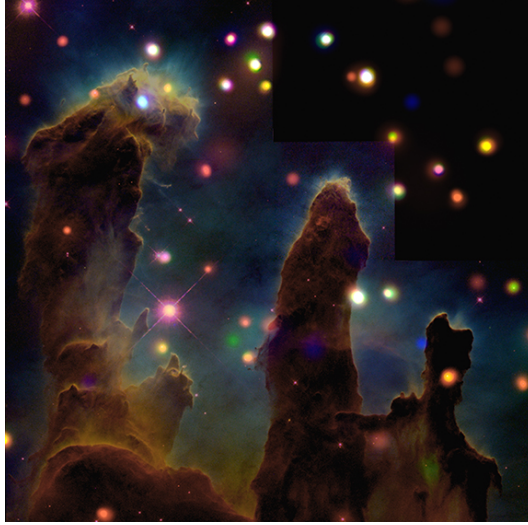


FIGURE I.2 – Les "Piliers de la création" de la nébuleuse de l'Aigle. Dans ces piliers de gaz de l'ordre de trois années-lumière de long naissent les étoiles de l'amas.

- Une étoile est le siège de réaction thermonucléaire qui se découpe en différents cycles selon la masse et la température de l'étoile. La durée de chaque étape peut être appréhendée par le nombre de ses représentants observables : plus une étape est longue, plus on doit pouvoir voir d'étoile dans cet état. Les prédictions théoriques suivantes sont confirmées par deux observables : le flux de neutrinos solaire ainsi que la sismologie stellaire.
 - $> 10 \cdot 10^6 \text{K}$ - Cycle proton-proton : bilan $4\text{H}^1 \rightarrow \text{He}^4$ et émission de neutrino pour des étoiles de taille comparable au soleil ($< 1.5 M_{\odot}$). Le soleil est actuellement dans cette phase.
 - $> 15 \cdot 10^6 \text{K}$ - Cycle CNO (car intermédiaire de C, de N et de O) : bilan $4\text{H}^1 \rightarrow \text{He}^4$ pour des étoiles de taille supérieure à celle du soleil ($> 1.5 M_{\odot}$)
 - $> 100 \cdot 10^6 \text{K}$ - Cycle triple alpha ($3\text{He}^4 \rightarrow \text{C}^{12}$)
 - $> 600 \cdot 10^6 \text{K}$ - Fusion du carbone qui peut former de l'oxygène, du néon ou du magnésium (stage géante rouge : le Soleil dans 5Ga). Pour le Soleil, c'est la fin de son histoire d'étoile.
 - $> 1.5 - 3 \cdot 10^9 \text{K}$ - Pour les étoiles plus massives ($> 6 M_{\odot}$), la fusion de l'oxygène donne du silicium, du phosphore et du soufre. Enfin, le silicium et l'hélium peuvent se combiner pour former les atomes allant jusqu'au fer.

B Les cadavres stellaires

- Dans le cas d'étoile comme le Soleil, l'étoile éjecte ses couches externes formant une nébuleuse planétaire. Le cœur se transforme progressivement en naine blanche et se refroidit progressivement.

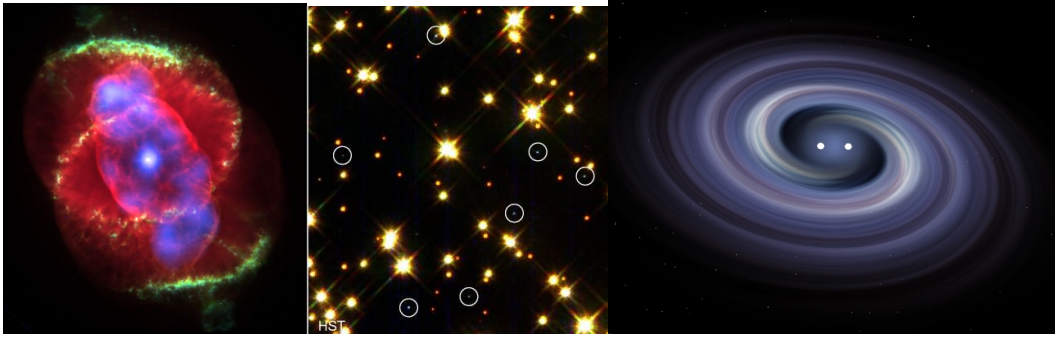


FIGURE I.3 – A gauche, la nébuleuse de l'Œil de Chat (NGC 6543) est une nébuleuse planétaire située dans la constellation du Dragon. L'étoile centrale bleue a perdu son enveloppe externe il y a 1000 ans. Sur la photo du milieu sont entourées des naines blanches, évolution ultime des étoiles comme notre Soleil. A droite, une vue d'artiste représentant un système binaire de naines blanches.

- Pour les étoiles les plus massives ($> 1.6 M_{\odot}$), leur fin de vie amène à la formation de supernova qui correspond à une explosion des couches externes de l'étoile. ceci produit un flash lumineux pouvant aller jusqu'à des luminosités 10 milliards de fois celle du Soleil. L'énergie produite peut permettre la formation des atomes plus lourds que le fer.



FIGURE I.4 – Trois photographies montrant l'explosion de la supernova SN1987A.

- Après le stade de supernova, les étoiles ayant une masse $< 3 M_{\odot}$ conservent leur coeur qui n'est alors fait que de neutrons, d'où l'appellation d'étoile à neutrons.

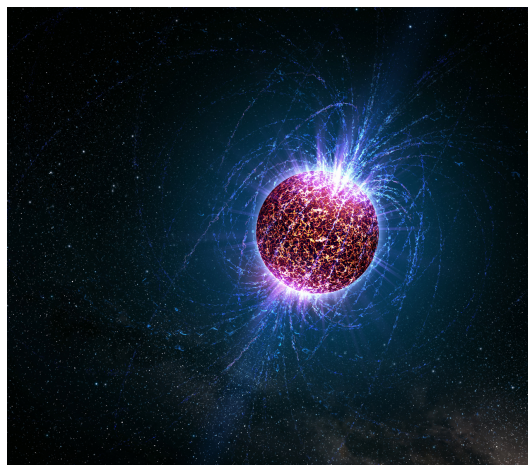


FIGURE I.5 – Vue d'artiste d'une étoile à neutrons.

- Pour les étoiles encore plus massives ($> 3 M_{\odot}$), leur densité devient telle qu'elles dégèrent en trous noirs.

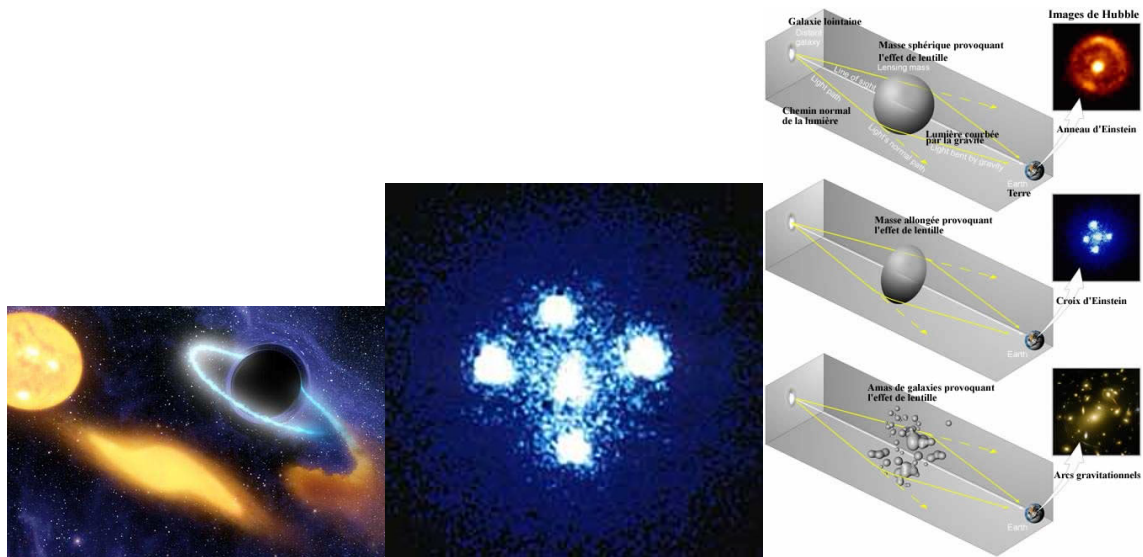


FIGURE I.6 – A gauche, une vue d’artiste d’un trou noir. Au milieu, ce qui est observable lorsqu’une étoile est “cachée” par un trou noir : la croix d’Einstein. A droite, l’explication de la croix d’Einstein.

C Les nébuleuses (nuages moléculaires) : un aperçu du mode de formation des étoiles

- La nébuleuse de la Carène, située à 8000 années lumière montre des gaz et des poussières interstellaires fournissant la matière première pour former les étoiles

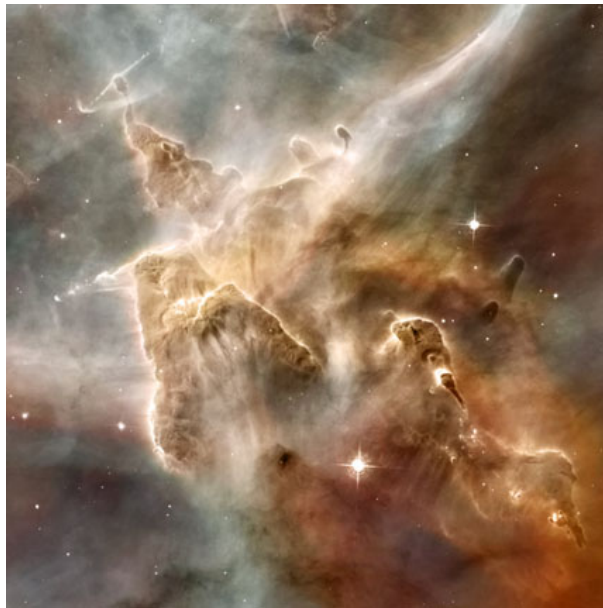


FIGURE I.7 – Photographie de la nébuleuse de la Carène.

- Le nuage de Barnard 68 ressemble à un tunnel au milieu d’étoiles étincelantes. En fait, il s’agit d’un nuage de gaz et de poussières et de molécules complexes propice à la formation d’étoiles et de planètes.



FIGURE I.8 – Photographie du nuage de Barnard 68. La zone noire correspond à une zone où la lumière ne passe pas, il y a à cet endroit un nuage de poussière qui empêche la lumière de traverser cette zone.

- La nébuleuse d’Orion est le siège de la formation de milliers d’étoiles. C’est un énorme réservoir de gaz et de poussières. En son sein, l’existence de grumeaux froids et plus denses permet la mise en place de zones à gravitation plus forte. Ce grumeau peut s’effondrer sur lui-même et former une boule de matière dense et chaude capable de déclencher les réactions thermonucléaires contrant les forces de gravité.



FIGURE I.9 – Photographie de la nébuleuse d’Orion dans une zone où des systèmes stellaires se mettent en place.

- La nébuleuse du Crabe, un reste de Supernova observé par les Chinois en 1054. Son explosion alimente le milieu interstellaire en nouveaux atomes.

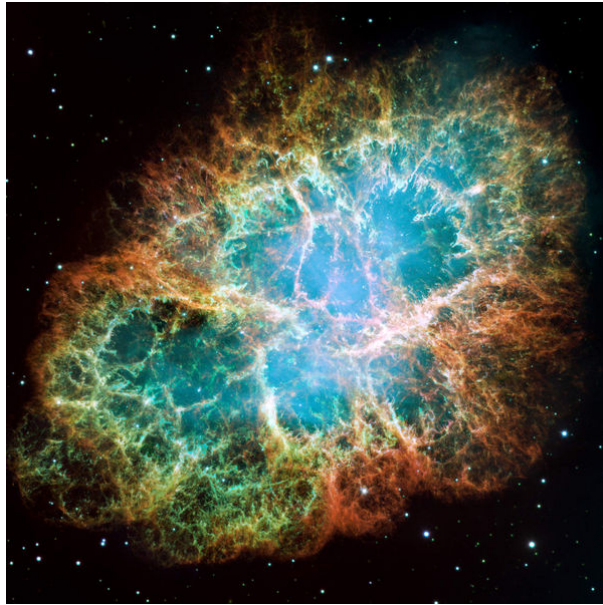


FIGURE I.10 – Photographie de la nébuleuse du Crabe. Le système solaire possédant des atomes plus lourds que le fer, notre système solaire a du être ensemencé par des supernovae.

- On peut parfois observer une étoile entourée d'un disque de poussières

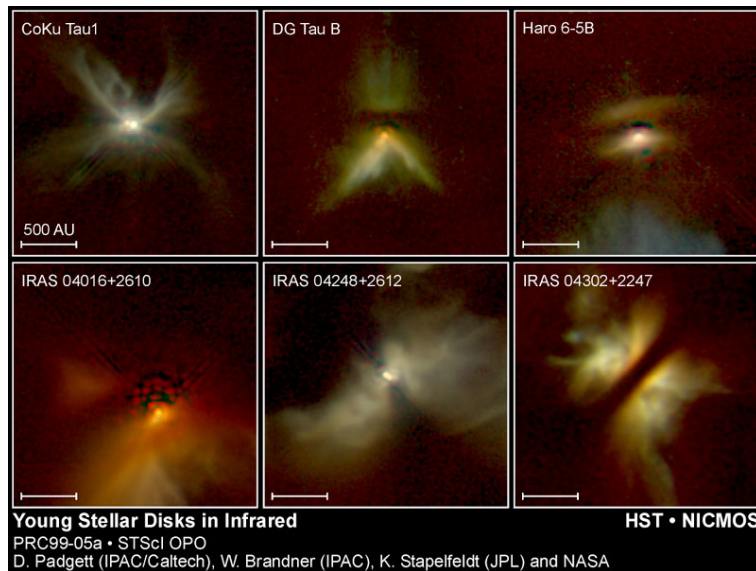


FIGURE I.11 – Photographies de systèmes stellaires en formation. On observe des disques de poussières entourant une étoile centrale et occultant sa lumière.

D Les galaxies

- Un premier type de galaxie correspond aux galaxies spirales. C'est le cas de notre voie lactée.
- Le deuxième type de galaxie est représentée par exemple par la galaxie M87 au centre de l'amas de la Vierge. Il s'agit d'une galaxie elliptique
- Enfin, le troisième type est ce qu'on appelle les galaxies irrégulières comme le Grand Nuage de Magellan.



FIGURE I.12 – Les différents types de galaxies

II La formation des constituants du système solaire : du Big-Bang à la nébuleuse protosolaire

L'observation des objets les plus lointains de l'Univers (des galaxies) permettent d'obtenir un âge de l'Univers d'environ 13,7 Ga. Hubble avait remarqué que les galaxies s'éloignent les unes des autres : Lemaitre en remontant l'histoire proposa le Big Bang. La découverte d'étoiles très vieilles ayant la composition chimique prédit par le Big Bang ainsi que le fond de rayonnement cosmologique confirma le Big-Bang.

A Du Big Bang à la formation des premiers atomes

- Notre connaissance de l'Univers se limite à 10^{-43} s après le Big Bang à cause des limitations théoriques de la Physique
- Entre 10^{-43} s et 10^{-36} s : Epoque pendant laquelle la gravité apparaît.
- Entre 10^{-36} s et 10^{-12} s : inflation primordiale de l'Univers. Sa taille est multipliée par 10^{27} . Les quarks, les électrons et les neutrinos se forment.
- Entre 10^{-12} s et 10^{-6} s : les quatre grandes forces (gravité, interaction forte, interaction faible et électromagnétisme) apparaissent.
- Entre 10^{-6} s et 3min : Les quarks se combinent pour former des protons et des neutrons
- Entre 3min et 20min : La densité de l'univers devient assez faible pour que les photons puissent voyager mais ont des interactions fréquentes avec les premiers noyaux atomiques. La température est assez faible pour que les premiers noyaux atomiques se forment.
- Entre 240 000 ans et 310 000 ans : Création des premiers atomes d'hydrogène et d'hélium. Les photons peuvent voyager librement.
- Ces photons existent encore actuellement mais ont perdu tellement d'énergie qu'ils sont devenus très froids. On en a une trace à l'heure actuelle : le rayonnement de fond cosmologique qui représente la consécration de la théorie du Big-Bang.

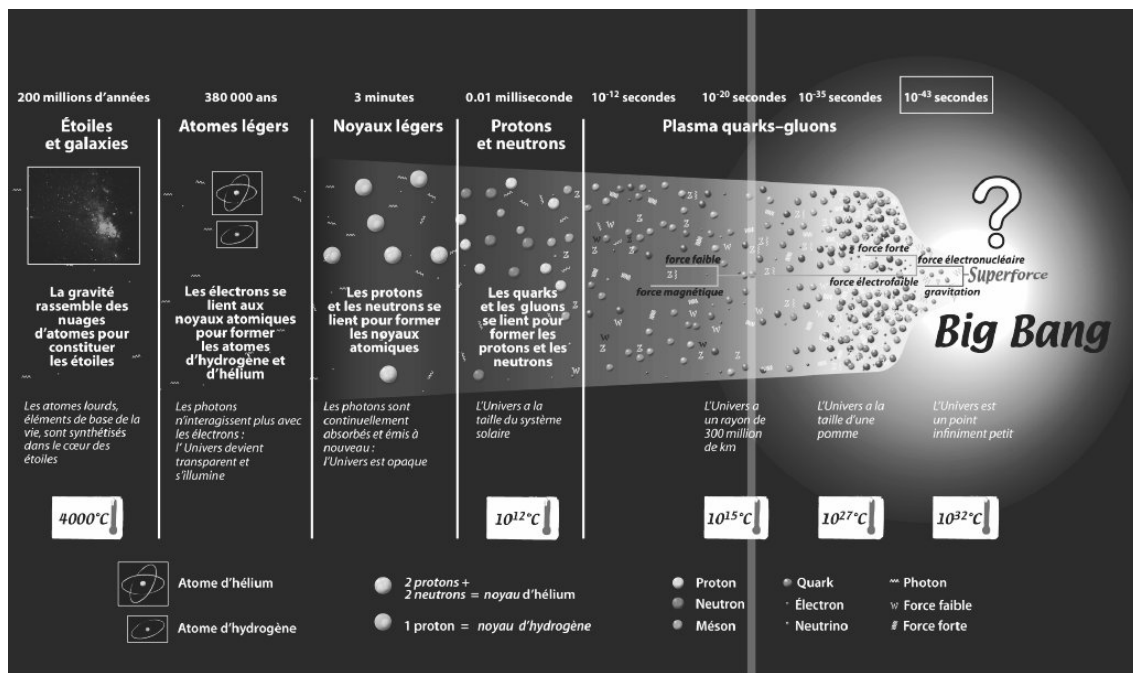


FIGURE II.1 – Frise chronologique des différentes étapes de la formation de l'univers

B Des premiers atomes à la nébuleuse proto-solaire

- Les premières étoiles vont former les atomes plus lourds au cours de leur cycle de vie.
- La gravité rassemble des étoiles qui vont constituer des galaxies ou bien des nuages galactiques se forment et se contractent permettant l'allumage d'étoiles.
- La nébuleuse présolaire aurait eu un diamètre initial de 100 UA et une masse de 2 à 3 fois la masse actuelle du Soleil. Avec le temps, la gravité a causé la condensation du nuage gazeux et l'émergence d'une proto-étoile au centre de la nébuleuse.
- Après 10 millions d'années, la température dans la proto-étoile a atteint un niveau tel que les réactions thermo-nucléaires se sont déclenchées - la proto-étoile devint alors le Soleil.



FIGURE II.2 – Observations de 4 jeunes étoiles entourées d'un disque protoplanétaire avec très certainement des planètes en formation.

C Les grains présolaires, témoins de l'environnement stellaire

- Dans certaines météorites, on retrouve des grains possédant des caractéristiques isotopiques qu'on ne peut rencontrer dans le système solaire actuel. Ceci permet de connaître l'environnement stellaire au moment de la formation du système solaire.

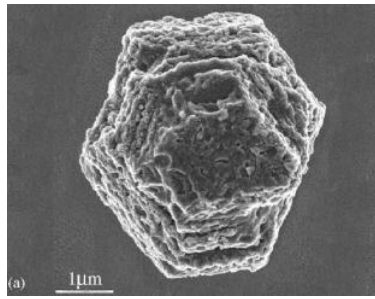


FIGURE II.3 – Photographie d'un grain présolaire.

- La contraction de la nébuleuse présolaire pourrait avoir été provoquée par une supernova voisine.

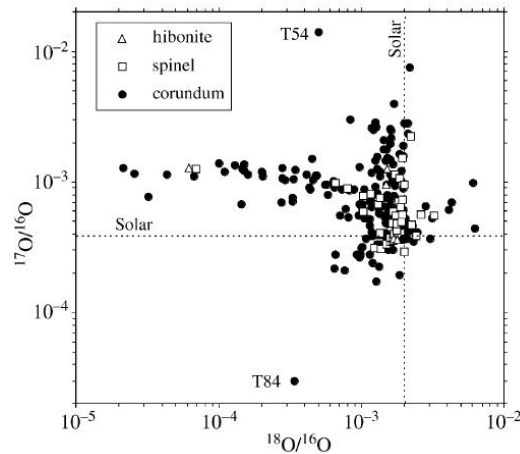


FIGURE II.4 – Diagramme présentant les anomalies isotopiques découvertes dans des grains pré-solaire témoignant de la présence de supernovae et de géantes rouges à proximité.

III De l'allumage de l'étoile Soleil à la formation des planètes

A 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%



FIGURE III.1 – Caractéristiques des chondrites

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 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.

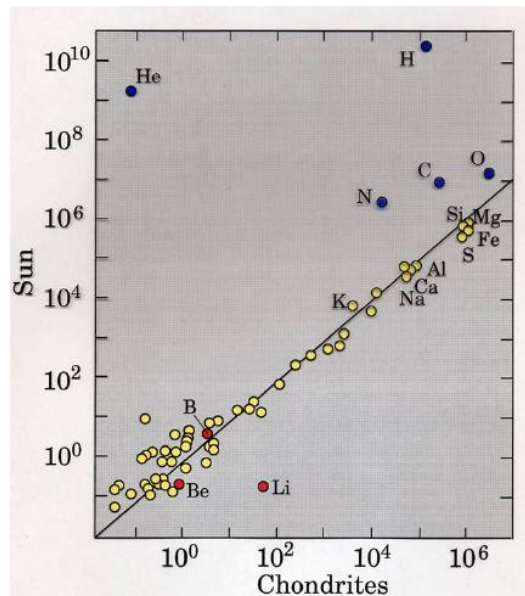


FIGURE III.2 – Abondance relative normalisée au Si des chondrites et de la photosphère solaire

B 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.

	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	

TABLE 1 – Comparaison de la composition des chondrites CI et de la Terre globale

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

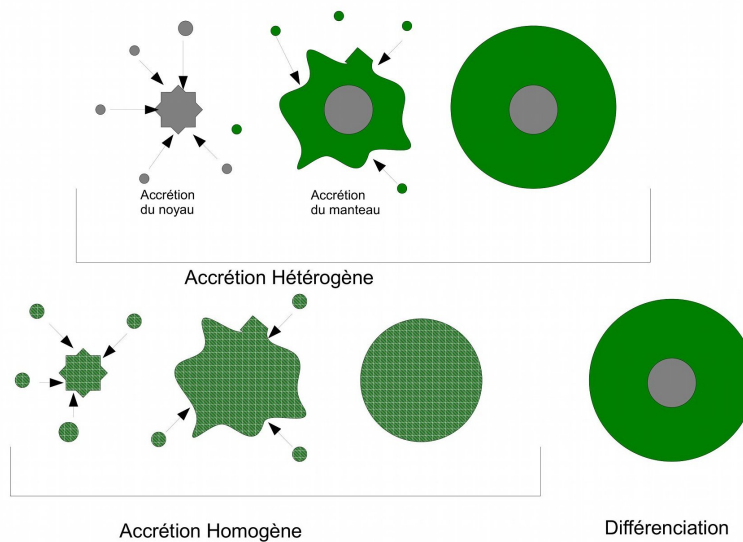


FIGURE III.3 – Les deux modèles d'accrétion permettant de former la planète Terre à partir des météorites

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 .

C 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.

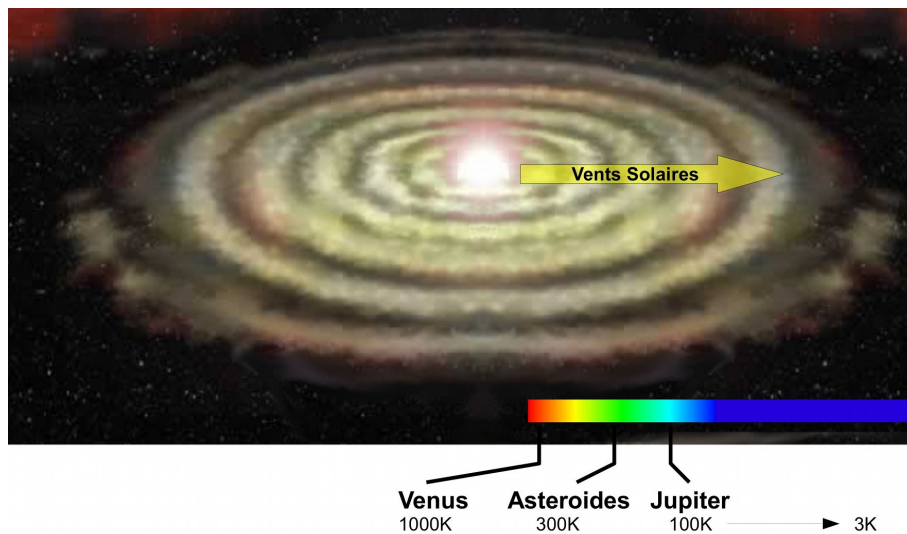


FIGURE III.4 – Profil de température dans la nébuleuse protosolaire en lien avec la constitution des planètes

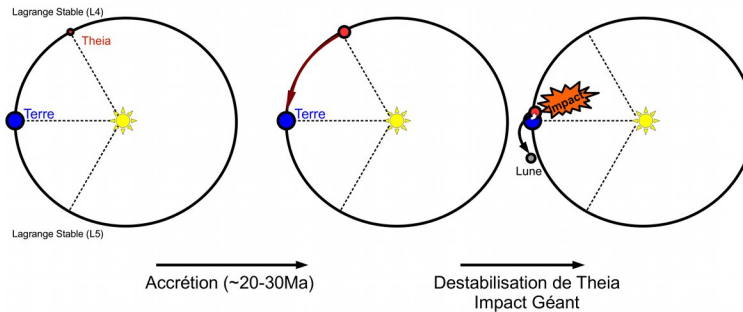
D Les premiers tourments du système solaire

- Dès le début de son histoire, les planètes du système solaire subissent un bombardement très intense comme en témoigne la surface de Mercure ou de la Lune qui participe à l'accrétion.
- Parmi les chocs majeurs, un corps de la taille de Mars aurait heurté la Terre et engendré la formation de la Lune.



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 Theïa, 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 Theïa 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.

- Un bombardement tardif, vers 4Ga, serait dû à une destabilisation de la ceinture d'astéroïde à cause du mouvement des orbites de planètes géantes