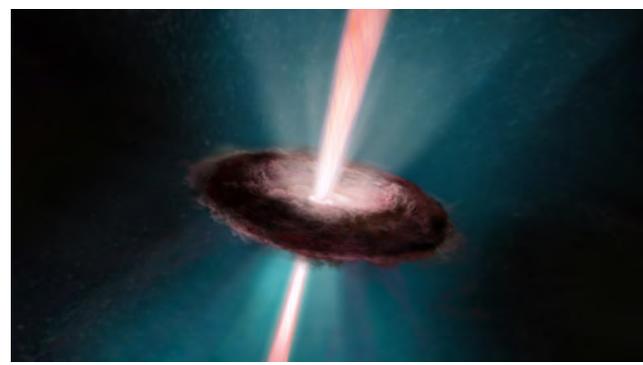


LE SYSTÈME SOLAIRE



Pierre BOUTELOUP

I- Formation du Système solaire

1- Âge. Les chondrites sont des météorites (petit caillou tombant sur la Terre depuis l'espace) qui se sont formés à la formation du Système solaire. Ils ont donc le même âge. Ils ont été datés par la radioactivité à $4,566 \pm 0,002$ milliards d'années.

2- Formation. Le Système solaire s'est formé par l'effondrement gravitationnel, en 100 000 ans environ, d'un immense nuage moléculaire de gaz et de poussière faisant partie d'une nébuleuse.

Les nuages moléculaires sont formés par la compression provoquée par le passage dans l'onde de densité d'un bras spiral de la galaxie.

Les grains de poussières contenant beaucoup de carbone et d'oxygène sont formés à la surface relativement froide des étoiles en fin de vie et qui sont au stade de géante rouge ou de supergéante rouge, un peu comme les grains de suie qui s'échappent d'une flamme de bougie. Ces grains sont lancés dans le milieu interstellaire par la pression de radiation. On voit ainsi comment la matière fabriquée dans les étoiles est recyclée. Ces nuages moléculaires opaques sont visibles dans le ciel sous la forme de poches noires sans étoiles appelées globules de Bok. Ci-dessous on voit le globule de Bok Barnard 68.



On peut donner comme exemple de tels nuages s'effondrant, les piliers de la création dans l'amas ouvert d'étoiles M16 enveloppé par la nébuleuse de l'Aigle à 6500 années-lumière de la Terre. Il naît en effet au même moment, de ce nuage, plusieurs milliers d'étoiles regroupées dans le ciel, qui constituent un amas ouvert. L'amas ouvert le plus facile à voir dans l'hémisphère nord est celui des Pléiades. L'image ci-dessous, obtenue avec le télescope spatial Hubble, est celle des piliers de la création. La forme des piliers est sculptée par la pression de radiation du rayonnement ultraviolet des grosses étoiles proches qui éjectent les éléments légers.

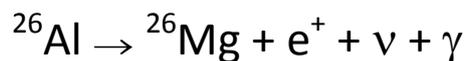


Des disques de gaz et de poussière sont observés près d'étoiles jeunes, de moins de un million d'années, appelées de type T Tauri, du nom de cette étoile visible dans l'amas des Hyades, bien qu'elle n'y soit pas, dans la constellation du Taureau. Ce sont des étoiles instables avec un vent stellaire violent qui n'ont pas encore allumé leurs réactions nucléaires. Ces étoiles émettent des jets, voir la partie VIII.

L'effondrement peut être causé par l'onde de choc d'une supernova (étoile qui explose en fin de vie), ou par le choc de deux tels nuages.

Effectivement, le Système solaire est aux confins d'une superbulle dont le bord est détecté par l'hydrogène neutre appelée la Bulle Locale et qui résulte de l'explosion d'une supernova. L'intérieur de cette bulle est à 10^6 K et est constitué de gaz ionisé. L'hydrogène neutre H1 est observé par les radiotélescopes qui détectent la raie de 21 cm de longueur d'onde qui correspond à la transition où les deux spins du proton et de l'électron sont parallèles ou antiparallèles.

Ce qui confirme cela est que les météorites contiennent beaucoup de ^{26}Mg . Or, ce magnésium provient de l'aluminium 26 par la réaction :



où le symbole ν représente le neutrino et le symbole γ un photon gamma. Or, l'aluminium 26 est produit pendant les explosions de supernovae. Les rayons gammas ainsi produits sont détectables par les télescopes à détection de rayons gamma. La période de l'aluminium 26 est de 0,7 million d'années. C'est le chauffage par cette réaction qui a permis la différenciation par décantation des différents matériaux des planétésimaux, le fer coulant au centre.

Au centre se forme l'étoile, notre Soleil. L'énergie potentielle gravitationnelle se transforme en chaleur. Quand le cœur atteint 15 millions de degrés, la réaction nucléaire transformant l'hydrogène en hélium et dégageant une énergie considérable se déclenche dans le cœur du Soleil. Sir Arthur Eddington fut le premier, dans le milieu des années 1920, à comprendre la durée de vie extrêmement longue des étoiles grâce à cette source d'énergie. Eddington s'est basé sur les résultats expérimentaux récents de Francis Aston, comme quoi quatre protons (noyau de l'atome d'hydrogène) ont une masse supérieure au noyau de l'atome d'hélium qu'ils produisent par fusion. S'appuyant ensuite sur la relation $E = m C^2$ d'Einstein, Eddington en déduisit l'énergie colossale dont disposaient les étoiles.

Il est intéressant à ce propos de raconter l'anecdote suivante, rapportée entre-autres par Feynman : Eddington était assis dehors par une douce soirée avec sa compagne, juste après avoir fait sa découverte. Tout à coup elle dit : « Regarde comme les étoiles rayonnent avec force ce soir ». Il lui répondit alors :

« Oui, et ce soir, je suis le seul sur la Terre qui sait pourquoi. » Cette anecdote est également racontée dans le livre *Le roman du Big Bang* de Simon Singh.

Le grand philosophe Immanuel Kant est le premier à avoir eu l'idée de cette formation du Système solaire par l'effondrement gravitationnel d'un nuage moléculaire de gaz et de poussière. Il publia ces idées dans l'ouvrage *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels*, c'est-à-dire *Histoire Universelle de la Nature et Théorie du Ciel*, en 1755 à 31 ans. Lors de l'effondrement il suggéra à juste titre que la rotation s'amplifie et que le disque devient plat. La région centrale forme le Soleil tandis que ce qui reste dans le disque forme les planètes. Kant avait lu les *Principia* de Newton et étudié les effets des marées sur la rotation de la Terre. Laplace reprit d'une manière plus quantitative ces idées en 1796 à 47 ans dans *Exposition du système du monde*. Mais il pensait à tort que les planètes furent éjectées du Soleil par la force centrifuge, lors de sa formation. Kant pensait au contraire à juste titre que les planètes se formèrent directement à partir du disque, et l'avenir lui donna bien raison.

Kant fut également le premier à considérer à juste titre, que certaines nébuleuses vues dans le ciel, comme la nébuleuse d'Andromède (appelée maintenant la galaxie d'Andromède) étaient des galaxies comme la nôtre, la Voie Lactée. À cette époque, les philosophes s'intéressaient aux sciences de la nature. Tandis que Sartre par exemple ne connaît rien aux sciences comme on le voit en lisant les phrases constellées d'erreurs quand il en parle. Sartre a une philosophie des sciences positiviste pure et dure comme on le voit dans la phrase tirée de *L'Être et le Néant* : *La pensée moderne a réalisé un progrès considérable en réduisant l'existant à la série des apparitions qui le manifestent*. Sartre dans *l'Existentialisme* dit que la nature humaine est un concept inexistant, niant ainsi notre déterminisme biologique et génétique.

3- Aplatissement. Si le nuage ne tourne pas sur lui-même, toute la matière s'effondre au centre en une étoile sans planète. Si le nuage tourne sur lui-même, la matière dans le plan perpendiculaire à l'axe de rotation et passant par le centre de gravité, est soutenue par la force centrifuge. Par contre, la matière en dehors de ce plan, oscille de part et d'autre de ce plan. À chaque fois qu'elle traverse ce plan, le frottement avec le nuage de gaz et de poussière la ralentit. L'oscillation transverse par rapport à ce plan diminue donc inexorablement, et le système devient pratiquement plan. Ce processus est achevé en quelques millions d'années permettant de rendre alors visible la partie centrale du disque d'accrétion d'où part le jet (voir VIII).

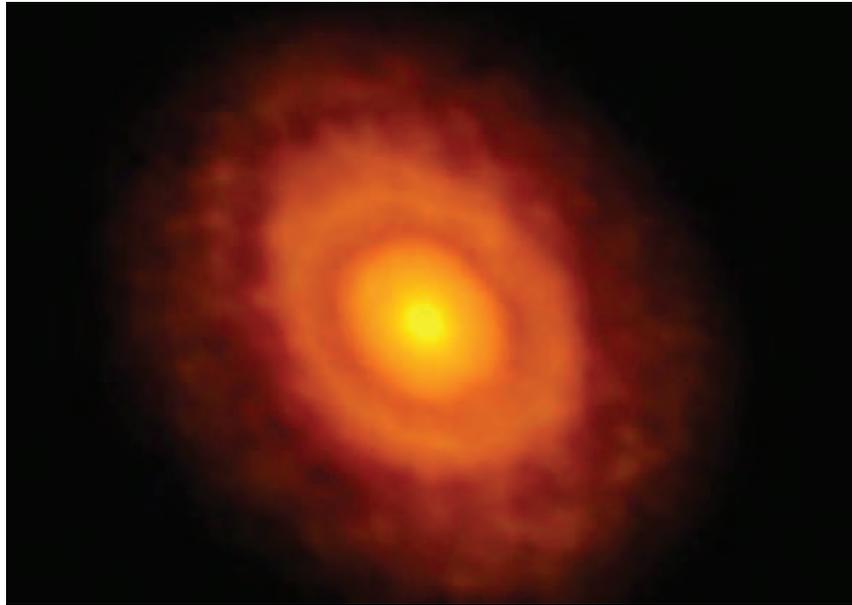
4- Formation des planètes. Les planètes provenant par concentration de ce nuage de gaz et de poussière tournant autour du Soleil, tournent bien évidemment toutes dans le même sens autour du Soleil. L'examen de systèmes planétaires autour d'autres étoiles montre que notre Système solaire est unique et tout à fait spécial, suite à une suite d'événements aléatoires très peu probables.

Dans un premier temps, le disque de gaz et de poussière en rotation avec en son centre le Soleil, contient beaucoup de gaz, essentiellement, en quantité, de l'hydrogène, puis de l'hélium et enfin aussi beaucoup de vapeur d'eau. Sa température est alors entre 20 K et 100 K.

Au début, il se forme la ligne de neige (ou de glace) à environ 8 fois la distance de la Terre au Soleil (8 U.A.) Il s'agit d'une coquille sphérique de ce rayon où la vapeur d'eau est suffisamment loin de la chaleur du Soleil pour se condenser en glace, produisant une augmentation de la densité de la nébuleuse par environ un facteur 5. En effet, la vapeur d'eau qui se condense à cet endroit, donne de la glace suffisamment lourde pour ne pas être éjectée par le vent solaire. Cette glace capte alors la vapeur d'eau qui continue à être éjectée par le vent solaire de la zone intérieure à cette coquille. Cette coquille forme alors une espèce de couvercle captant et bloquant à cet endroit tous les matériaux éjectés par le Soleil.

Les calculs montrent que, à cet endroit, un noyau rocheux d'une masse d'environ 10 fois la masse de la Terre se forme en 300 000 ans. Il peut alors provoquer l'accrétion gravitationnelle de l'hydrogène et de l'hélium de la nébuleuse, avant que ces gaz ne soient chassés en environ un million d'années par le vent solaire.

Sur la photographie ci-dessous, on voit la ligne de neige. C'est le premier anneau sombre (et le plus net) en partant du centre. Il s'agit de l'étoile V883 Orionis observée par le radiotélescope Alma.



On peut penser que les noyaux glacés de Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune se sont formés à des distances voisines du Soleil (la limite de neige). Jupiter, le plus près du Soleil, donc captant le plus de gaz, aurait alors éjecté les autres planètes géantes très tôt vers des zones plus éloignées contenant moins de gaz. Uranus et Neptune n'ont donc pratiquement pas réussi à capter de gaz de la nébuleuse.

Il ne faut donc pas parler des planètes gazeuses en général, mais des planètes géantes. En effet Uranus et Neptune sont des planètes glacées pratiquement dépourvues d'hydrogène et d'hélium (environ quelques masses terrestres de ces gaz).

Le fait que les orbites soient approximativement circulaires provient de l'interaction avec les planétésimaux et le gaz.

La phase initiale T Tauri violente du Soleil disperse le gaz en moins de 1 million d'années. Les planètes rocheuses comme la Terre n'ont pas eu le temps de se former que tout ce gaz a disparu. Le fait que Jupiter se soit formé avant les planètes rocheuses est prouvé également par le fait qu'il a empêché la formation d'une planète au niveau de la ceinture d'astéroïdes. Il a en effet empêché l'accrétion de ces astéroïdes pour former une planète de la taille de Mars.

Les planètes rocheuses comme la Terre se sont formées ensuite, en entre 10 à 100 millions d'années dans un environnement sans gaz par la lente accrétion des planétésimaux à cette distance du Soleil.

Au départ, les planétésimaux se forment par l'attraction électrostatique à très courte distance des petits grains de poussière, de la même manière que se forment les moutons de poussière dans une maison. Rappelons que l'attraction des molécules entre-elles est électrostatique. Le théorème de Hellman-Feynman prouve qu'une fois qu'on a calculé par la mécanique quantique la répartition des électrons dans une molécule en résolvant l'équation de Schrödinger, les forces intermoléculaires peuvent être calculées par la pure électrostatique. Ensuite, à partir d'une certaine taille, typiquement 10 km, la gravitation prend le relais. C'est à partir de cette taille qu'on a à proprement parler des planétésimaux. Les collisions de

planétésimaux de plus en plus gros au fur et à mesure de la formation du Système solaire ont renversé Uranus sur le côté, fait tourner Vénus en sens inverse, enlevé le manteau silicaté de Mercure, fait pencher Neptune et amené la Lune autour de la Terre par impact d'une planète de la taille de Mars.

L'eau de la Terre provient de la collision tardive de planétésimaux riches en glace venant de la ceinture externe d'astéroïdes entre Mars et Jupiter. La composition de l'eau terrestre en deutérium ne correspond pas à celle des comètes montrant que l'eau terrestre ne provient pas pour sa plus grande part des comètes. Vénus, plus près du Soleil que la Terre, ne reçut que quelques gouttes de cette averse. Vénus n'a donc jamais eu d'eau en quantité. La rareté du Système solaire provient déjà de la taille adéquate du Soleil, de la densité adéquate de la nébuleuse également. Si Jupiter s'était formé plus tôt, dans une nébuleuse plus épaisse, il aurait migré rapidement beaucoup plus près du Soleil par éjection à grande distance des planétésimaux, empêchant la formation des planètes terrestres. S'il s'était formé plus lentement dans une nébuleuse moins dense, il aurait été plus petit, captant beaucoup moins de gaz avant que la nébuleuse ne se dissipe en un million d'années sous l'action du vent solaire. Il n'aurait pas pu alors servir de bouclier pour protéger la Terre de l'impact de comètes ou météorites destructrices.

5- Rotation des planètes sur elles-mêmes. Juste après leurs formations, toutes les planètes tournaient sur elles-mêmes dans le même sens qu'elles tournaient autour du Soleil. Mais le processus de mise en rotation est différent pour les planètes rocheuses et les planètes géantes.

Les planètes géantes se sont formées par accrétion de gaz de la nébuleuse autour de noyaux rocheux. Par la chute gravitationnelle, ce gaz était très chaud donc très dilaté et ces planètes étaient alors énormes. Elles avaient le moment cinétique propre associé à la rotation globale du nuage de gaz et de poussière autour du Soleil. Donc elles tournaient lentement sur elles-mêmes par rapport aux étoiles lointaines dans le même sens. Lorsqu'elles se sont contractées par refroidissement, par conservation du moment cinétique, la vitesse angulaire de cette rotation a considérablement augmenté.

Pour les planètes rocheuses, la mise en rotation dans le même sens que la rotation autour du Soleil est plus subtile. Lors de leurs formations, l'accrétion des planétésimaux était dissymétrique. Les planétésimaux en orbite elliptique plus proches du Soleil que la Terre, avaient tendance à frapper la Terre en haut de leur orbite, donc avec une vitesse plus faible que celle de la Terre, poussant le côté de la Terre vers le Soleil en arrière. Les planétésimaux extérieurs, frappaient la Terre dans la partie basse de leur orbite, donc là ils étaient animés d'une vitesse supérieure à celle de la Terre. Ils ont alors poussé le bord de la Terre opposé au Soleil dans le sens du mouvement.

6- Formation de La Lune. Comme nous l'avons dit ci-dessus, la lune s'est produite par la collision frontale de la Terre avec une planète de la taille de Mars, la planète Théia. Une telle collision est extrêmement improbable. La preuve principale que la Lune vient d'un tel impact, est qu'elle n'a pratiquement pas de noyau de fer. Tout le fer est en effet rentré dans la Terre lors de l'impact, comme le confirment les modèles. Cela se voit par la faible densité de la Lune. D'autre part, le manteau lunaire a exactement la même composition isotopique que le manteau terrestre, ce qui est unique dans le Système solaire. De nouvelles analyses des échantillons des missions Apollo révèlent que le rapport entre les isotopes de l'oxygène O^{16} , O^{17} , et O^{18} est identique sur la Terre et sur la Lune. Ce n'est pas le cas pour Mars ou Vénus, ni pour les météorites. L'explication est que le manteau lunaire provient du manteau terrestre éjecté dans l'espace lors de la collision frontale entre Théia et la Terre. Ce n'aurait pas été le cas pour une collision oblique. Le moment cinétique actuel du système Terre Lune qui s'est conservé au cours du temps montre alors qu'avant la collision, la rotation de la Terre sur elle-même était très rapide. La Terre faisait un tour sur elle-même en 2,5 heures. Les débris de l'impact qui donnèrent naissance à la Lune

ont donc été lancés dans l'espace dans le sens de cette rotation, ce qui explique pourquoi la Lune tourne autour de la Terre dans le même sens que la Terre sur elle-même. Heureusement pour nous, car dans ce cas, la Lune s'éloigne lentement de la Terre par effet de marée. Si la Lune avait tourné en sens inverse, elle se serait rapprochée de la Terre, pour finalement retomber dessus et disparaître.

La Lune stabilise la direction de l'axe des pôles de la Terre, donc l'obliquité de l'écliptique (Jacques Laskar) et régule ainsi le climat. Elle est ainsi nécessaire pour l'apparition d'une vie évoluée.

La Lune chauffe le manteau terrestre par les marées lunaires. Les marées les plus grandes du manteau terrestre ont une hauteur de seulement 11 cm. Cette hauteur a cependant nécessité un réglage particulier de l'accélérateur de particules au C.E.R.N. à Genève. Avant que cet effet ne soit détecté, les dysfonctionnements associés sont longtemps restés un mystère. L'énergie dégagée dans le manteau terrestre par ce processus est de $3 \cdot 10^{19}$ J/an. C'est la même énergie que celle dégagée par l'isotope ^{232}Th . La vie sur la Terre qui nécessite le recyclage du gaz carbonique par la tectonique des plaques pour réguler la température, nécessite donc la présence de la Lune. La Lune est aussi nécessaire pour maintenir le noyau de fer liquide à l'origine des panaches de points chauds, en le chauffant par effet de marée. Rappelons que ce fer liquide est à l'origine du champ magnétique terrestre nécessaire à la préservation de l'atmosphère terrestre donc à la vie. Ce champ magnétique sert de bouclier pour le vent solaire. Sans ce champ magnétique, l'atmosphère serait soufflée dans l'espace. Vu la probabilité extrêmement faible de la collision à l'origine de la Lune, on voit donc l'extrême rareté qui en résulte pour une civilisation comme la nôtre dans l'Univers.

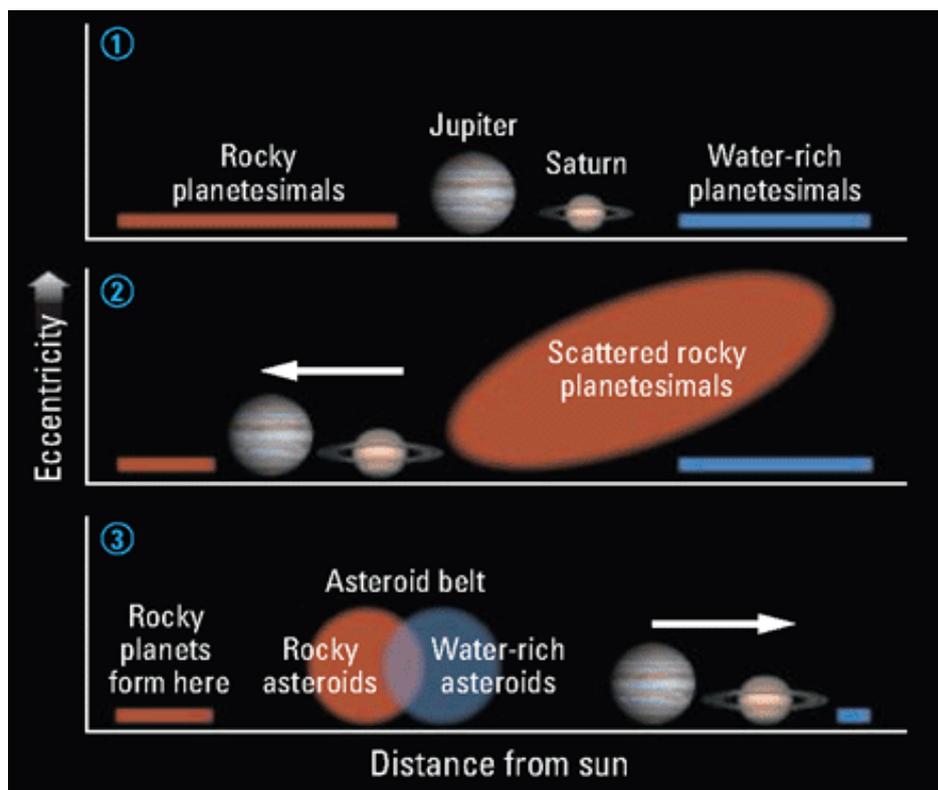
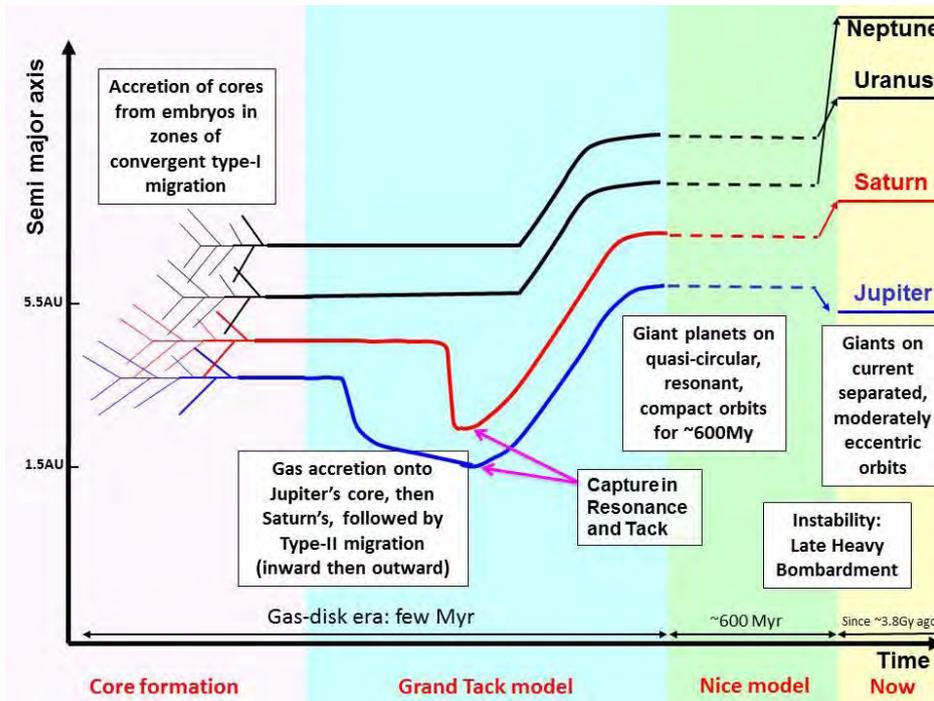
II- Les migrations dans le Système solaire primitif

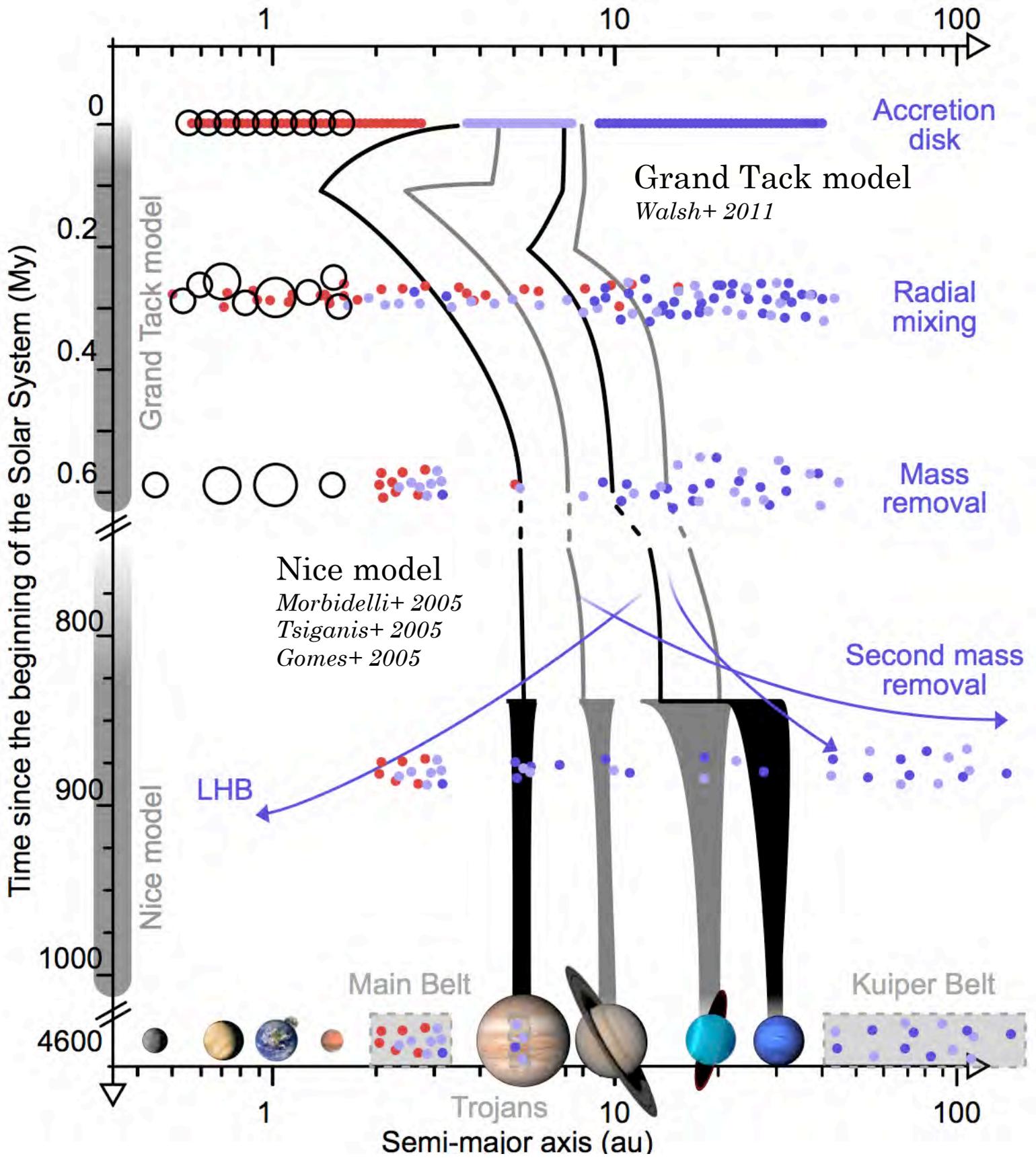
1- Difficultés de ce modèle simple de formation des planètes. Le scénario standard ainsi décrit pose toutefois quelques problèmes. Nous connaissons maintenant de nombreux autres systèmes planétaires dans notre galaxie. Aucun ne ressemble à notre Système solaire, ce qui montre son caractère tout à fait original. En particulier, quand un tel système possède des planètes rocheuses, elles sont beaucoup plus grosses que celles de notre Système solaire. Beaucoup de systèmes ont également des jupiters chauds, c'est-à-dire des planètes géantes de la taille de Jupiter, mais beaucoup plus près du Soleil. Par contre, la planète Mars est trop petite. À une telle distance de l'étoile, quand on trouve une planète rocheuse, autour d'une autre étoile, elle est beaucoup plus grosse que Mars.

L'eau de la Terre provient des météorites glacées venant de la ceinture externe d'astéroïdes. Cette ceinture externe est plus près du Soleil que Jupiter qui est à une distance d'environ 5 Unités astronomiques du Soleil. En effet, la ceinture d'astéroïdes est entre Mars et Jupiter. Or la limite de glace était à huit Unités astronomiques. Comment est-il possible qu'il y ait des astéroïdes glacés beaucoup plus près du Soleil que cette limite ? Notons que sans la présence de tels astéroïdes glacés, il n'y aurait pas d'eau sur la Terre, donc la vie ne pourrait pas y exister. On voit encore là que notre Système solaire est extraordinaire et a des propriétés tout à fait spéciales pour que la vie puisse y exister. Cela montre l'extraordinaire rareté de la vie dans l'Univers. Il faut expliquer, dans cette logique pourquoi la ceinture d'astéroïde se sépare en deux : la partie interne faite de corps rocheux, et la partie externe faite de corps glacés, alors que tous ces objets sont à des distances du Soleil, relativement proches les uns des autres.

2- Le Grand Tack. [Voir ce lien.](#) L'explication de tout cela serait que notre Système solaire a deux planètes géantes qui ont des masses voisines, Saturne étant plus petite que Jupiter. Par interaction avec le gaz, au début de la formation du Système solaire, Jupiter a migré vers le Soleil. Il aurait pu ainsi détruire les

planètes rocheuses et devenir un jupiter chaud. Mais, Saturne, bien que démarrant sa migration plus tard, l'a rapidement rattrapé, pour se bloquer avec lui dans la résonance 2/3, où Jupiter fait trois tours autour du Soleil, pendant que Saturne en fait deux. En effet, Saturne ayant une plus faible masse que Jupiter a migré plus vite et l'a rattrapé. Une fois un tel blocage par résonance obtenu, les deux planètes restent solidaires. Elles se mettent alors à migrer vers l'extérieur du Système solaire. C'est donc Saturne qui a empêché la formation d'un jupiter chaud. Mais cette migration en aller et retour a considérablement diminué la densité de planétésimaux ([voir ce lien](#)), diminuant la taille des planètes rocheuses. Au-delà de la Terre, ce nombre de planétésimaux était trop faible pour que Mars puisse grossir plus. C'est lors de cette migration que les astéroïdes glacés ont été mis à leur place actuelle, pouvant ensuite enrichir la Terre en eau et en faire ainsi la planète bleue que nous connaissons. Certains même ont été poussés par Jupiter jusqu'à l'orbite de la Terre, l'ensemencant à ce moment-là en eau. Les deux schémas ci-dessous résument cette migration, appelée Le Grand Tack. Que de ce jeu de billard à trois bandes résulte la Terre abritant la vie est extraordinaire au sens propre du terme.

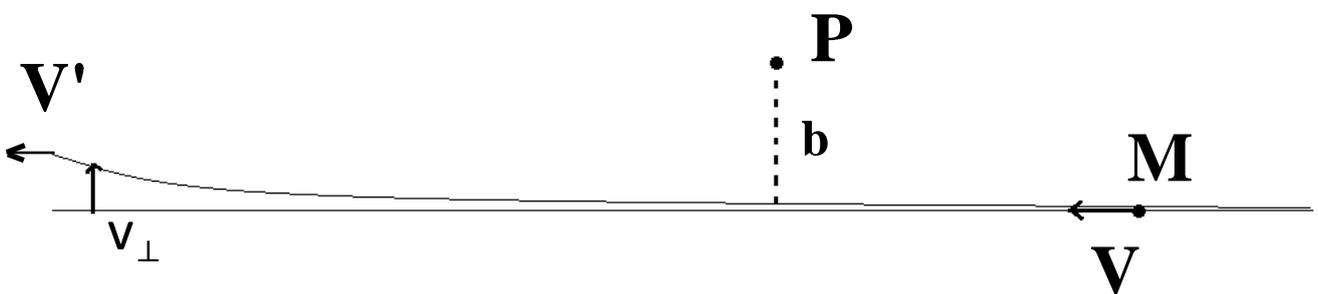
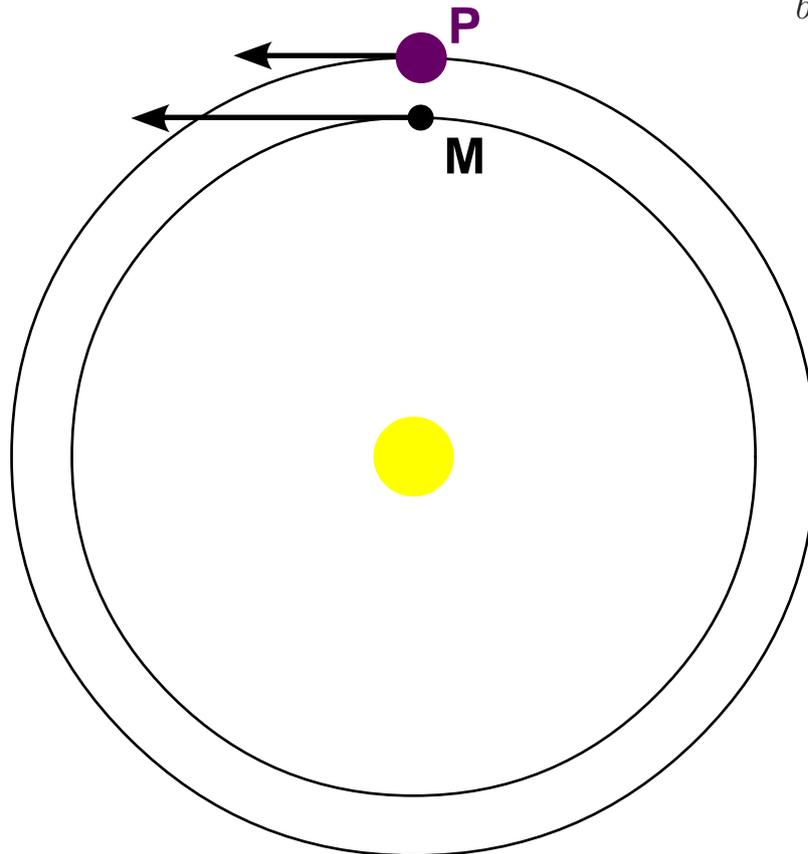




DeMeo &
Carry 2014

3- Interaction entre le disque de gaz et de poussière et une planète. On considère une planète P animée d'un mouvement circulaire uniforme autour de l'étoile. Une particule M du disque est également animée d'un tel mouvement. On considère une particule légèrement plus près de l'étoile que la planète. Elle va donc un peu plus vite et rattrape la planète. On se place maintenant dans le référentiel galiléen en translation rectiligne uniforme vers la gauche où la planète est immobile, on y a une rencontre avec la particule arrivant, de paramètre d'impact b . On suppose que la rencontre se fait à une distance suffisante pour que la déviation soit faible, ce qu'on appelle en anglais : Impulse approximation. La trajectoire de la particule reste donc très voisine d'une ligne droite. Dans ce cas, on peut calculer facilement la vitesse perpendiculaire acquise, et on trouve :

$$V_{\perp} = \frac{2GM_P}{bV}$$



G est la constante de la gravitation universelle, M_P la masse de la planète P , b le paramètre d'impact, et V la vitesse d'arrivée. V' étant la nouvelle vitesse après la rencontre, et loin de la planète. On a, d'après la conservation de l'énergie cinétique, et le théorème de Pythagore :

$$V^2 = V_{\perp}^2 + V'^2$$

La nouvelle vitesse orbitale V' est donc inférieure à V .

$$V^2 = V_{\perp}^2 + (V - \delta V_{\parallel})^2 \simeq V_{\perp}^2 + V^2 - 2V \delta V_{\parallel}$$

$$\delta V_{\parallel} = \frac{V_{\perp}^2}{2V} = \frac{4G^2 M_P^2}{b^2 V^2 2V} = \frac{2G^2 M_P^2}{b^2 V^3}$$

Δj étant la variation de moment cinétique par rapport à l'étoile, et a le rayon de l'orbite :

$$\Delta j = \frac{2G^2 M_P^2 a}{b^2 V^3}$$

Le moment cinétique de la particule du disque est donc diminué d'une grandeur proportionnelle à la masse de la planète au carré, et par conservation du moment cinétique autour de l'étoile, le moment cinétique de la planète en est augmenté d'autant. Donc la planète s'éloigne de l'étoile comme si elle était repoussée par cette particule du disque. Cela se comprend aisément quand on voit que la particule du disque, par sa déviation, passe devant la planète, et l'accélère donc sur son orbite, ce qui va mettre la planète sur une orbite plus lointaine, la particule étant elle-même freinée, donc envoyée sur une orbite plus basse.

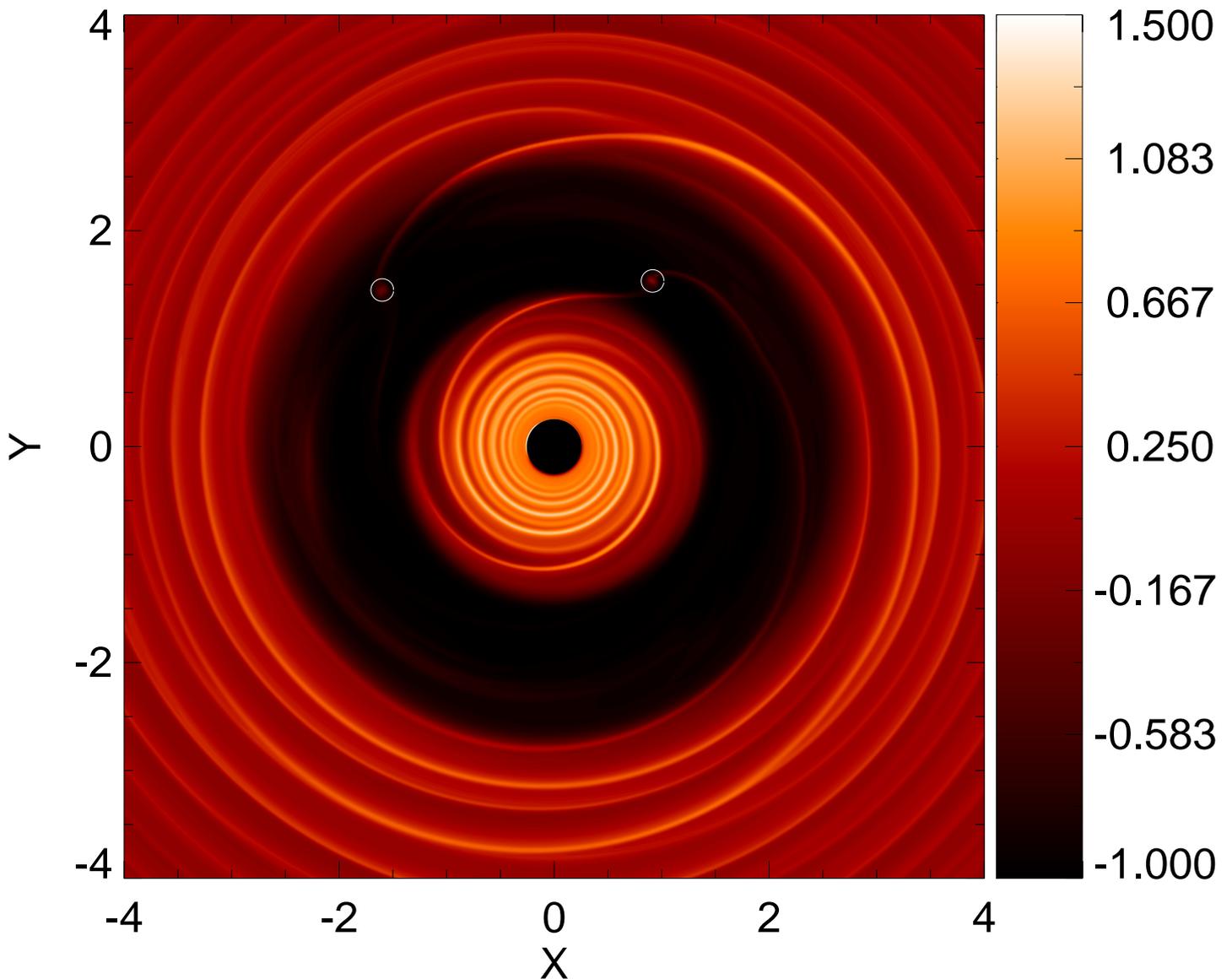
Considérons maintenant une rencontre avec une particule du disque plus éloignée de l'étoile que la planète. Elle va donc plus lentement que la planète. Dans le référentiel galiléen où la planète est immobile, cette fois-ci, la particule va vers la droite. Perdant de la vitesse par rapport à la planète, cela veut dire qu'elle a après, une vitesse horizontale plus proche de celle de la planète. Elle est donc accélérée. La planète est donc ralentie, et c'est bien normal, puisqu'elle est cette fois tirée en arrière. Elle se rapproche donc de l'étoile comme si, de nouveau, elle était repoussée par la particule du disque.

4- Migrations de type I et de type II. En éjectant plus loin de l'étoile les particules déjà un peu plus loin de l'étoile, et en éjectant plus près de l'étoile, des particules déjà plus près de l'étoile, la planète a donc tendance à créer un sillon vide de gaz et de poussière dans le disque. La planète nettoie donc son orbite du gaz et de la poussière qui y était. Cependant, la diffusion par viscosité turbulente a tendance à ramener de la poussière et du gaz à cet endroit. Les planètes rocheuses de faibles masses, n'arrivent pas à totalement nettoyer leur orbite. Elles sont donc soumises, par interaction avec le disque à des migrations dites de types I, par émission d'ondes de densité, que nous n'étudions pas ici. Par contre, les planètes géantes Jupiter et Saturne, nettoient complètement leur orbite et circulent dans cette zone vide de poussière et de gaz. Elles sont alors soumises à une migration de type II que nous étudions ci-dessous.

5- Migration de type II. Il y a deux conditions pour ouvrir un tel sillon vide menant aux migrations de type II des planètes géantes : la première condition est que le rayon de Hill qui correspond à la zone d'influence gravitationnelle de la planète soit au moins de la même taille que l'épaisseur du disque. La deuxième condition est que le moment appliqué par la planète sur le disque soit supérieur au moment visqueux à l'intérieur du disque.

La planète est alors maintenue dans son sillon, puisqu'elle est repoussée par le bord intérieur et également repoussée par le bord extérieur. Si le disque de gaz et de poussière a un moment cinétique supérieur à celui de la planète, il emporte la planète vers l'étoile à son rythme, par sa chute vers l'étoile par la viscosité turbulente. Pour une très grosse planète comme Jupiter, la chute vers l'étoile au centre est ralentie, le grand moment cinétique de la planète par rapport à celui du disque ralentissant la chute vers le centre.

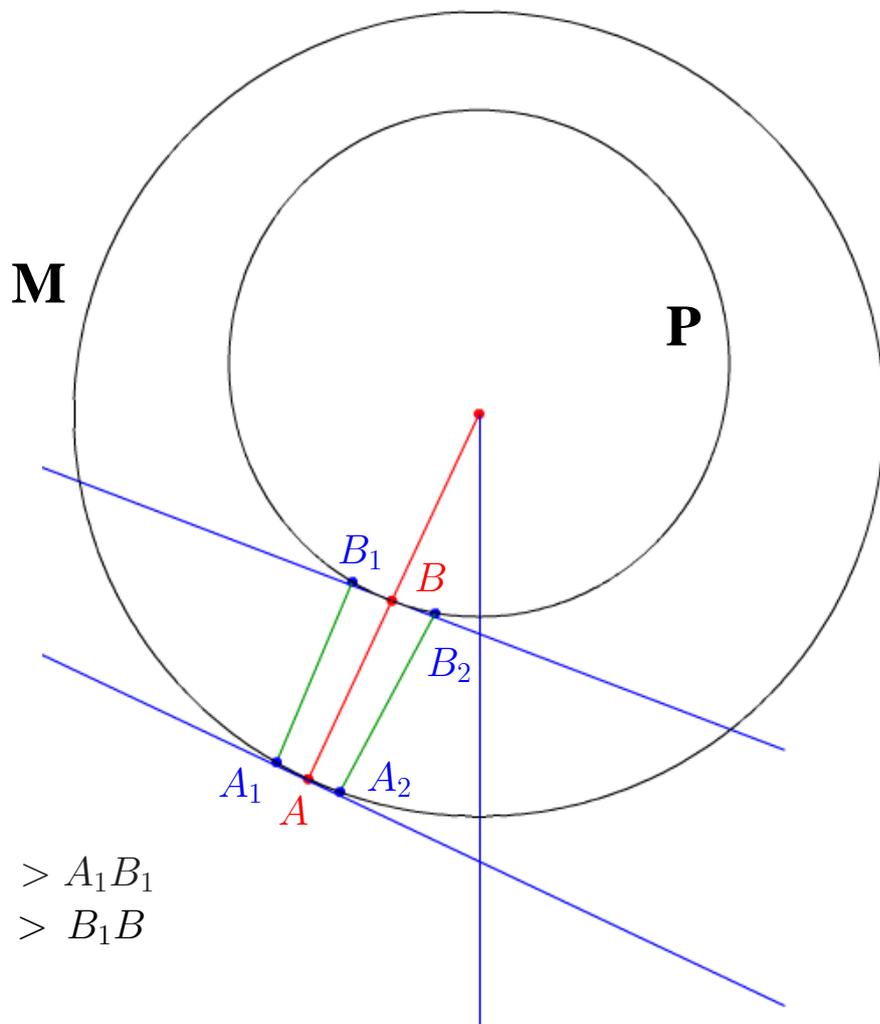
6- Conséquence, les migrations de Jupiter et Saturne. Suite à ce qui a été vu dans les paragraphes précédents, Saturne démarre sa migration vers le Soleil après Jupiter, puisqu'il lui faut plus de temps pour ouvrir le sillon, ayant une masse plus faible. Mais ensuite, Saturne rattrape Jupiter, toujours pour la même raison d'une masse plus faible. Vient un moment où Saturne est suffisamment près de Jupiter pour que ces deux planètes aient un sillon commun comme on le voit sur le schéma ci-dessous :



Il se trouve que c'est aussi à peu près à ce moment que ces deux planètes entrent dans la résonance 3/2 où Jupiter fait trois tours autour du Soleil pendant que Saturne en fait deux, ce qui bloque les deux planètes ensemble, les forçant à migrer de concert.

L'action sur le moment cinétique de la planète étant proportionnelle au carré de la masse de la planète, Jupiter est beaucoup plus vigoureusement repoussé et obligé de s'éloigner du Soleil par le bord intérieur du sillon, que Saturne est poussé vers l'intérieur par le bord extérieur du sillon. Puisque ces deux planètes sont bloquées ensemble par leur résonance, elles sont donc amenées à migrer en s'éloignant du Soleil.

7- La résonance bloque les deux planètes ensemble. Prenons l'exemple de la résonance 2/1 d'une planète massive M décrivant une orbite circulaire de rayon a , et d'une planète P légère n'ayant donc pas d'influence gravitationnelle sur la planète M , et décrivant une orbite elliptique de demi grand axe $b < a$ de période moitié de celle de la planète M .



$$\begin{cases} A_2B_2 > A_1B_1 \\ BB_2 > B_1B \end{cases}$$

Montrons qu'une conjonction près du péricentre est stable. Supposons donc que les deux astres soient en conjonction avant le passage au péricentre, respectivement en A et B . Les deux objets divergent l'un de l'autre, c'est-à-dire ont tendance à s'éloigner. Ainsi par exemple, la distance A_1B_1 pour la durée Δt avant la conjonction, est inférieure à la distance A_2B_2 pour la durée Δt après le passage à la conjonction. Lorsque la planète P passe en B , elle est soumise à une force tangentielle nulle. L'ellipse étant localement identique à son cercle osculateur, l'angle de projection de la force gravitationnelle appliquée par la planète M est le même pour une même distance à B . Mais comme les planètes s'éloignent l'une l'autre et que $A_1B_1 < A_2B_2$, la force tangentielle avant la conjonction qui augmente le moment cinétique de la planète P est supérieure à la force tangentielle après, qui diminue ce moment cinétique. D'autre part, la vitesse angulaire de la planète P est supérieure après la conjonction par rapport à ce qu'elle est avant la conjonction, puisqu'elle se rapproche du péricentre où cette vitesse est maximale. Donc la durée pendant laquelle s'applique la force tangentielle qui diminue le moment cinétique est inférieure à la durée pendant laquelle s'applique la force tangentielle qui augmente le moment cinétique. Cela se traduit par $BB_2 > B_1B$.

De ces deux phénomènes, il résulte que le moment cinétique de la planète P est augmenté, ce qui correspond à un éloignement de cette planète de l'étoile, donc à une augmentation de sa période, et une diminution de sa vitesse angulaire. La conjonction suivante aura donc lieu en retard, plus près du péricentre. On ferait un raisonnement analogue pour le cas où la conjonction se produirait après le péricentre.

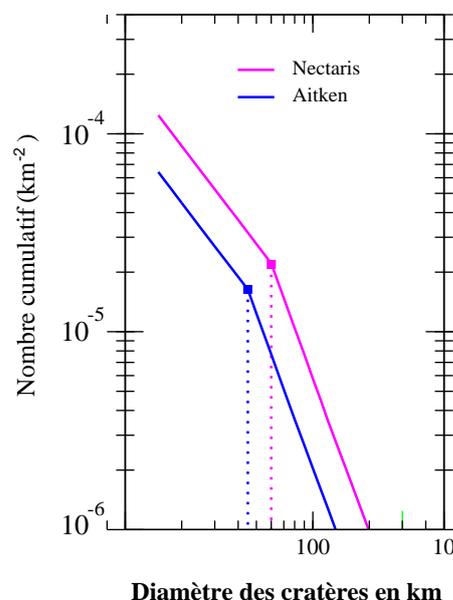
Les deux planètes sont donc bloquées dans cette résonance stable avec conjonction au péricentre. Si, à cause d'une interaction avec un disque de planétésimaux, la planète M s'éloigne de l'étoile et voit sa vitesse angulaire diminuer, ce qui a tendance à décaler la conjonction avant le péricentre, la planète P sera amenée ainsi, par les phénomènes précédents, à s'éloigner également de telle manière que la conjonction restera bloquée sur le péricentre. Mais alors, La force attractive, appliquée par M sur P , lors de la

conjonction avant le passage au périastre, donne à P une vitesse l'éloignant de l'étoile. Cette vitesse ainsi acquise, diminue le vecteur excentricité, donc l'excentricité e de la trajectoire de P . Dans le cas où M migre vers l'étoile, la force attractive appliquée lors de la conjonction, après le périastre, augmente l'excentricité, de telle manière qu'on a toujours $db/de < 0$ (invariant adiabatique). Ce serait l'inverse si l'orbite de P était extérieure à celle de M .

8- Le grand bombardement tardif. L'existence de cette arrivée brutale tardive de gigantesques météorites sur la Lune est déduite des vastes bassins d'impact qu'on appelle les mers lunaires. Ce bombardement est daté de 3,8 à 4,1 milliards d'années, soit environ 600 millions d'années après la formation du Système solaire. Environ 200 millions d'années après la formation de ces grands bassins d'impact, certains d'entre eux ont été le siège d'une activité volcanique intense. C'est à ce moment que ces grands bassins se remplirent de lave de basalte, d'où la teinte sombre et la topographie plate et lisse des mers lunaires. Ces impacts gigantesques ont en effet fracturé la croûte lunaire, et le magma présent en dessous par la chaleur naturelle de la Lune, a pu s'épancher en lave liquide par ces fractures.

On retrouve la trace de ce cataclysme dans l'étude statistique de la taille des cratères lunaires en différents endroits de la surface lunaire (ELSEVIER ; Earth and Planetary Science Letters 325-326 (2012) 27-38 : The onset of the lunar cataclysm as recorded in its ancient crater populations ; Simone Marchi ; William F. Bottke ; Davis A. Kring ; Alessandro Morbidelli).

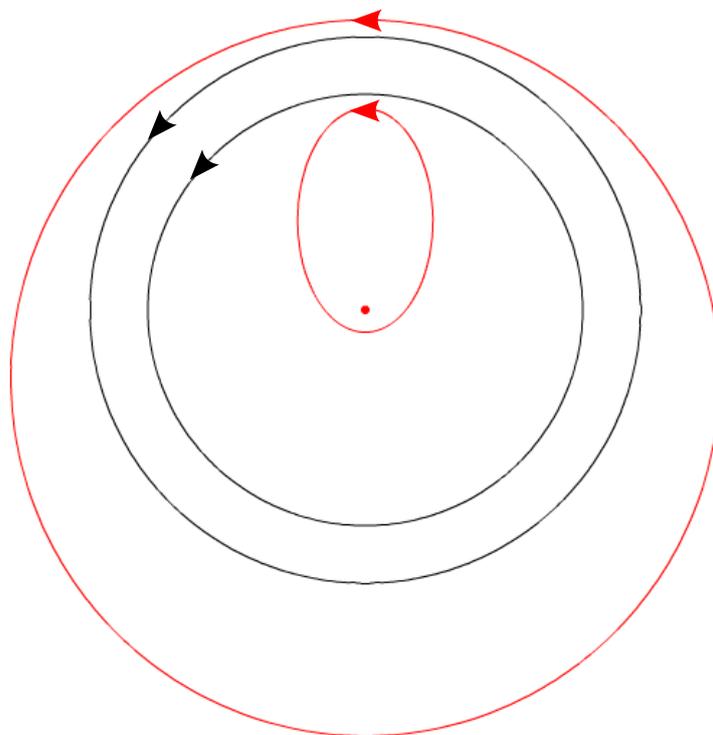
Il y a beaucoup plus d'astéroïdes de petites tailles que de grandes tailles. Pour une taille de cratère choisie, qu'on place en abscisse, on place en ordonnée, le nombre de cratères trouvés, dans un bassin d'impact choisi, dont la taille est supérieure à cette taille choisie. On trace le graphique en log-log, c'est-à-dire qu'on met en fait le logarithme décimal des quantités pour atténuer les grandes variations d'échelles en nombre et en taille des cratères. On a ci-dessous le résultat obtenu pour le bassin de Nectaris âgé d'environ 4 milliards d'années, et pour le bassin Aitken du pôle Sud qui est extrêmement ancien. Le bassin de Nectaris a été daté par les roches provenant des missions Apollo. Le bassin d'Aitken est beaucoup plus ancien, car constellé de cratères qui se superposent les uns les autres. D'autre part c'est un énorme bassin qui résulte d'un impact géant sans doute peu après la naissance de la Lune. On voit qu'on a un décalage de la rupture de pente. Si l'on fait l'hypothèse que la fréquence des astéroïdes en fonction de leur taille est la même pour les deux, le fait que la rupture de pente se fasse pour une taille de cratère de 60 km de diamètre pour Nectaris et pour 45 km pour Aitken s'explique par le fait que les astéroïdes bombardant Nectaris allaient plus vite. Le coude, d'après notre hypothèse, correspond en effet à la même taille d'astéroïde pour les deux, donc si le cratère est plus gros, c'est que l'astéroïde a frappé la Lune avec une plus grande vitesse. d étant le diamètre et v la vitesse, on a d proportionnel à $v^{0,44}$. Donc $v_n/v_a = (d_n/d_a)^{(1/0,44)} = (60/45)^{(1/0,44)} = 1,92$ voisin de 2. Les astéroïdes frappant Nectaris allaient donc deux fois plus vite que ceux frappant Aitken. Ils venaient donc de beaucoup plus loin du Soleil.



9- Le modèle de Nice. [Voir ce lien.](#) Ce modèle est basé sur la simulation avec un ordinateur très puissant de l'évolution du Système solaire. Il explique le grand bombardement tardif. Son nom vient de la publication du premier article sur ce sujet dans le numéro du 26 mai 2005 de *Nature* : Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System K. Tsiganis ; R. Gomes ; A. Morbidelli & H. L. Levison ; ces chercheurs travaillant à l'Observatoire de la Côte d'Azur à Nice. Au départ, Jupiter est placé à 5,45 UA. Saturne est placé à quelques dixièmes d'UA en deça de la position de la résonance 1:2 à 8,65 UA. La résonance 1:2 correspond à une période de Saturne double de celle de Jupiter. Neptune est placé environ à 12 UA et Uranus à 17 UA. Au-delà de l'orbite de ces planètes est placé un disque de planétésimaux, dont ce qui reste maintenant au-delà de l'orbite actuelle de Neptune s'appelle la ceinture de Kuiper, objets constitués de méthane, d'ammoniac et d'eau gelés. Mais il reste aussi des planétésimaux se baladant parmi toutes ces planètes, bien que le gaz ait disparu.

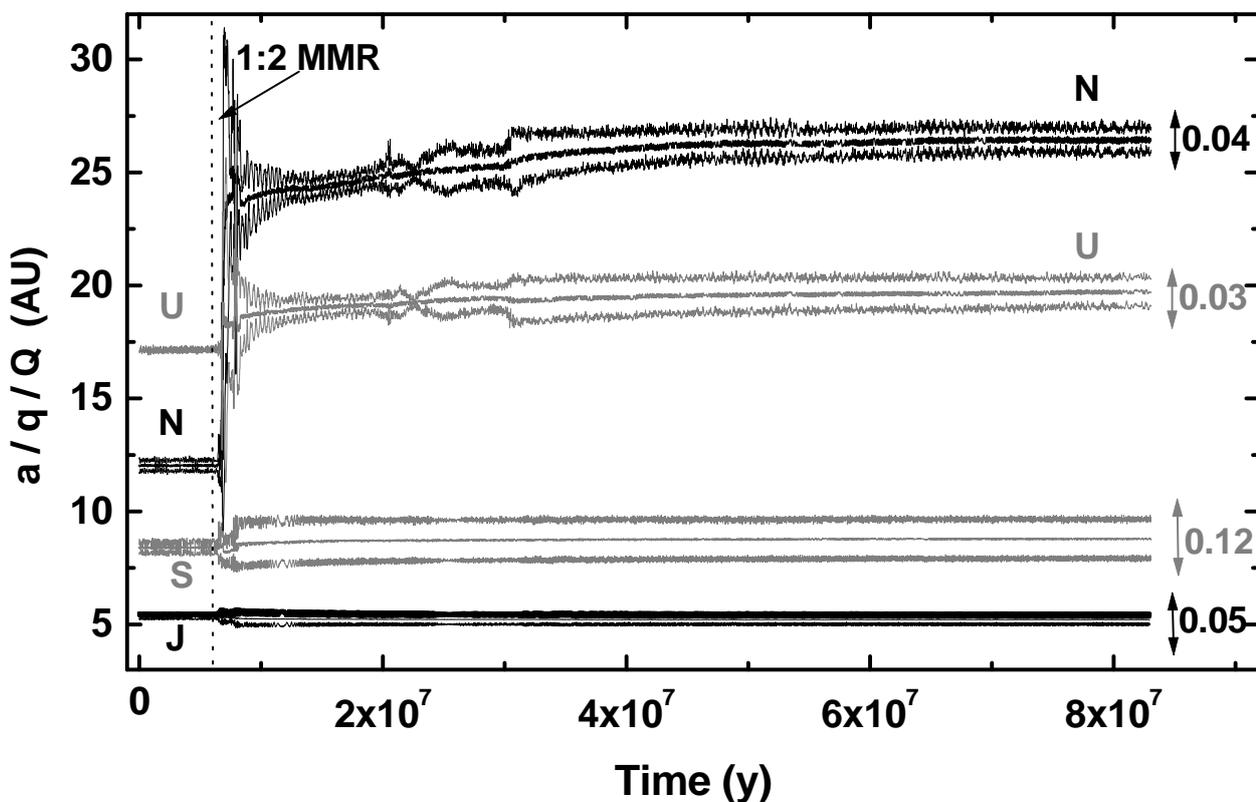
La situation est différente des migrations de type I et de type II dont on a parlé à propos du Grand Tack. Là il n'y a plus que des planétésimaux et il n'y a plus de gaz. Les orbites sont moins homogènes, car il n'y a plus de diffusion turbulente pour les homogénéiser, c'est-à-dire que les trajectoires ne sont plus circulaires mais peuvent être très elliptiques. Le résultat des interactions est statistique. L'interaction entre les planètes et ce disque de planétésimaux provoque d'abord une lente migration des planètes. Jupiter se rapproche lentement du Soleil. Les autres planètes s'éloignent.

Pour comprendre ce phénomène, prenons deux planètes ayant des orbites proches et circulaires. La planète intérieure entrera en interaction avec tous les planétésimaux en orbites elliptiques l'atteignant à leurs apoastres, donc là où ils vont moins vite que la planète. Donc ils vont la ralentir et la faire migrer vers l'étoile. De la même manière, la planète extérieure entrera en interaction avec les planétésimaux d'orbites elliptiques qui l'atteindront à leurs périastres, donc là où ils vont plus vite qu'elle, et ils vont donc l'accélérer, la faisant migrer vers l'extérieur et l'éloignant de l'étoile. On a donc un processus analogue de celui à l'origine de la mise en rotation des planètes rocheuses.



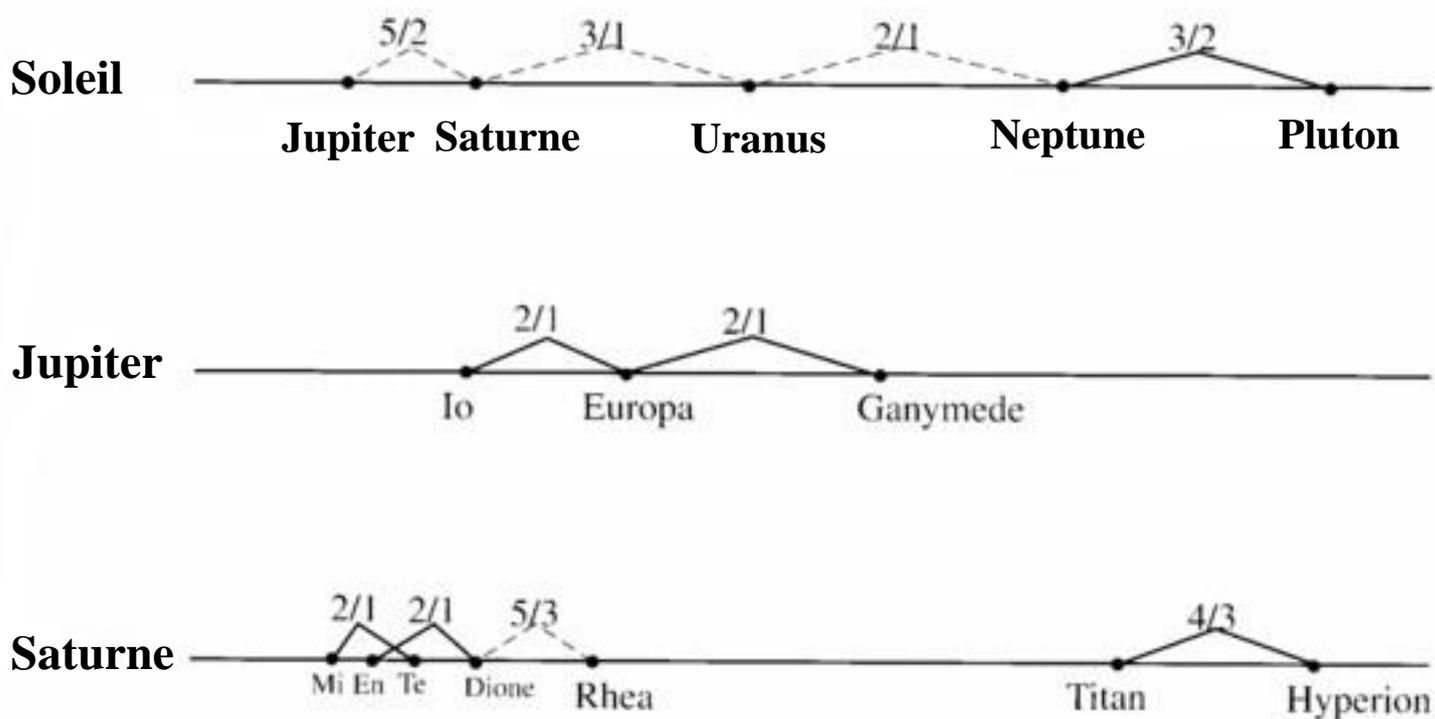
À 6,6 millions d'années, Jupiter et Saturne traversent la résonance 1:2. La théorie des invariants adiabatiques montre alors que leur orbite, de circulaire devient excentrique (ellipse) avec une excentricité voisine de celle observée actuellement. Le système des planètes Saturne, Uranus et Neptune, qui sont trop

rapprochées les unes des autres, devient alors chaotique, et des rencontres serrées entre ces planètes se produisent. Les planètes glacées Uranus et Neptune voient alors leur orbite devenir très excentrique. Elles peuvent donc pénétrer dans le disque de planétésimaux où elles creusent leur sillon. L'interaction à cet endroit avec les planétésimaux leur redonne alors une orbite circulaire à cette distance du Soleil. Cette interaction d'Uranus et Neptune avec les planétésimaux provoque le grand bombardement tardif où de nombreux planétésimaux sont projetés dans le Système solaire intérieur. La migration cesse quand il n'y a plus de planétésimaux dans le voisinage des planètes et donc qu'ils ont tous été éjectés. Ce modèle explique aussi les astéroïdes Troyens de Jupiter, dont la composition montre qu'ils viennent de la ceinture de Kuiper, contrairement aux autres objets de la ceinture d'astéroïdes entre Mars et Jupiter. Les planétésimaux venant de la ceinture de Kuiper, envoyés vers la Terre à ce moment-là, ont contribué à y amener de l'eau, soit directement, soit indirectement en y projetant des astéroïdes glacés de la ceinture externe d'astéroïdes.



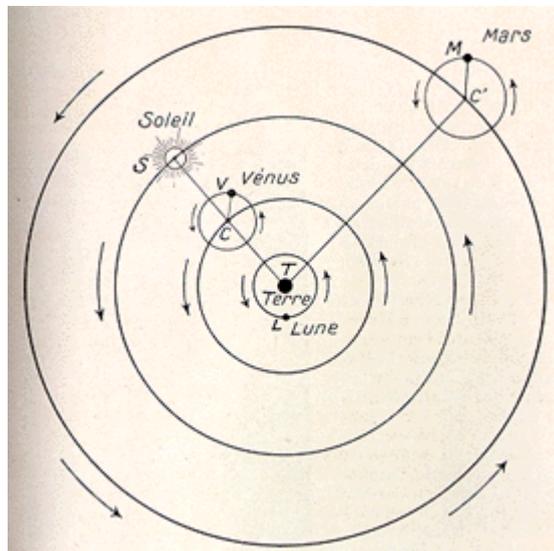
10- Loi de Titius-Bode. En ce qui concerne les distances des planètes au Soleil, on a la loi approximative de Titius-Bode. Les distances des planètes sont mesurées en UA. Pour le Système solaire, on obtient la loi : $d_n = 0,387 k^n$ où k est à peu près une constante égale à 1,5. Autrement dit, connaissant la distance d'une planète, on a un ordre de grandeur de la distance de la planète suivante en multipliant cette distance par 1,5. Pour $n = 4$, on n'a pas de planète. On a la ceinture d'astéroïdes. Les astéroïdes sont la multitude de petits corps célestes qui orbitent entre Mars et Jupiter, et qui ne méritent pas le nom de planète, car ils sont trop petits pour influencer gravitationnellement leur voisinage (nettoyer le voisinage ou retenir des satellites). Le plus gros astéroïde, Cérès, est un rocher d'un diamètre d'environ 1000 km. Toute la matière de la ceinture d'astéroïdes ne s'est pas condensée sur Cérès, à cause des perturbations gravitationnelles de Jupiter. Donc Cérès n'est pas une planète.

Une telle régularité dans les distances des planètes est très improbable. La loi de Titius-Bode résulte de la migration des planètes, suivant le modèle de Nice pour le Système solaire, vers des zones régulièrement espacées, assurant ainsi une stabilité au système, quand les rapports des périodes sont voisins de fractions de nombres entiers petits (résonances). La figure ci-dessous montre différentes résonances associées à des lois de Titius-Bode pour différentes familles de satellites.



III- Quelques repères d'histoire de l'astronomie

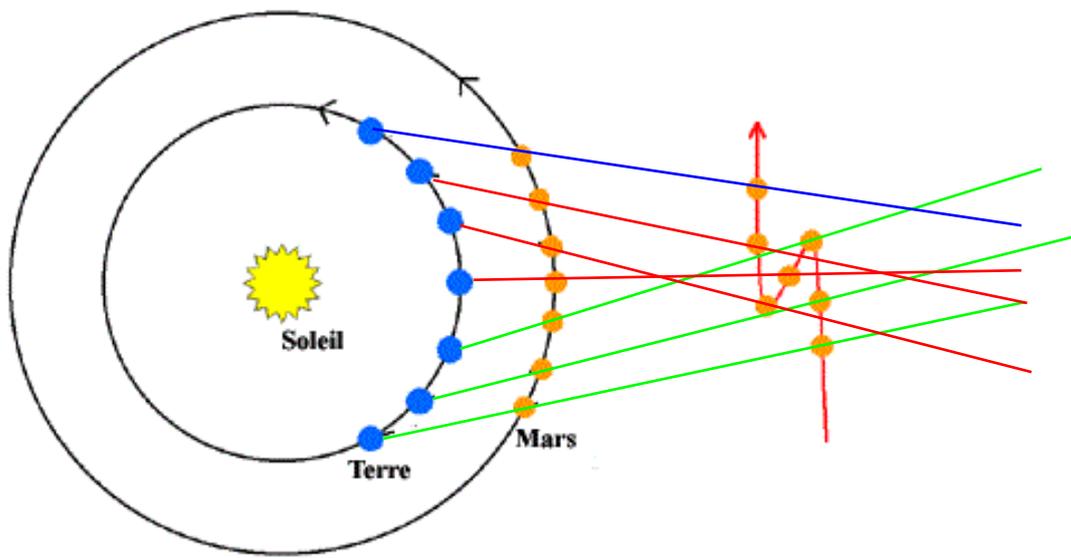
1- L'antiquité. Dans l'antiquité, les hommes pensaient que la Terre était immobile et au centre du monde. Le Soleil et les planètes tournaient autour de la Terre en décrivant des cercles, c'est la représentation géocentrique. Ptolémée (90-168) décrit dans l'Almageste (publication en 141) le mouvement des planètes et du Soleil autour de la Terre à base d'emboîtement comme des poupées russes de mouvements circulaires (Épicycles).



Ce modèle, très complexe, permet de faire des prévisions quant à la position future d'une planète dans le ciel parmi les étoiles. Il permet bien de retrouver la rétrogradation des planètes, en particulier celle de Mars. Aucune observation à l'œil nu ne permet de contredire ce modèle. Cela explique pourquoi il a été conservé aussi longtemps. Il faut faire ici la distinction entre modèle et théorie. D'une manière générale, un modèle utilise les concepts disponibles pour décrire une partie de la réalité. En revanche, une théorie contient de nouveaux concepts censés posséder une validité universelle. Le modèle de Nice est un modèle, mais hautement falsifiable, c'est-à-dire réfutable par des tests. Il ne contient que très peu de paramètres ajustables. Il s'appuie sur un grand nombre de connaissances complexes validées. Il a un pouvoir de prédiction de résultats numériques puissants confrontables à l'observation. Il fait donc partie intégrante de la science. Le modèle de Ptolémée contient autant de paramètres ajustables que ce qu'il veut tester. Il ne présente donc un aspect scientifique que pour les positivistes. Il ne repose sur aucune théorie physique préexistante.

2- La Renaissance. Copernic (1473-1543) dans *De Revolutionibus* publié en 1543 propose un système géométrique plus simple que celui de Ptolémée : le Soleil est au centre et toutes les planètes, y compris la Terre, tournent autour de lui en décrivant des cercles. Ce modèle héliocentrique, contrairement à celui de Ptolémée, permet d'expliquer naturellement la rétrogradation de Mars et des planètes en général, sans ajout d'hypothèse ad hoc supplémentaire. Mais il fait même plus : il explique la diminution de la rétrogradation quand on va de Mars à Jupiter puis Saturne. Plus on s'éloigne de la Terre, plus ce mouvement apparent de rétrogradation doit en effet diminuer. Un tel accord soudain avec une multitude de faits d'observations à la suite d'un seul principe (la rotation des planètes autour du Soleil) est la caractéristique d'une théorie scientifique vraie.

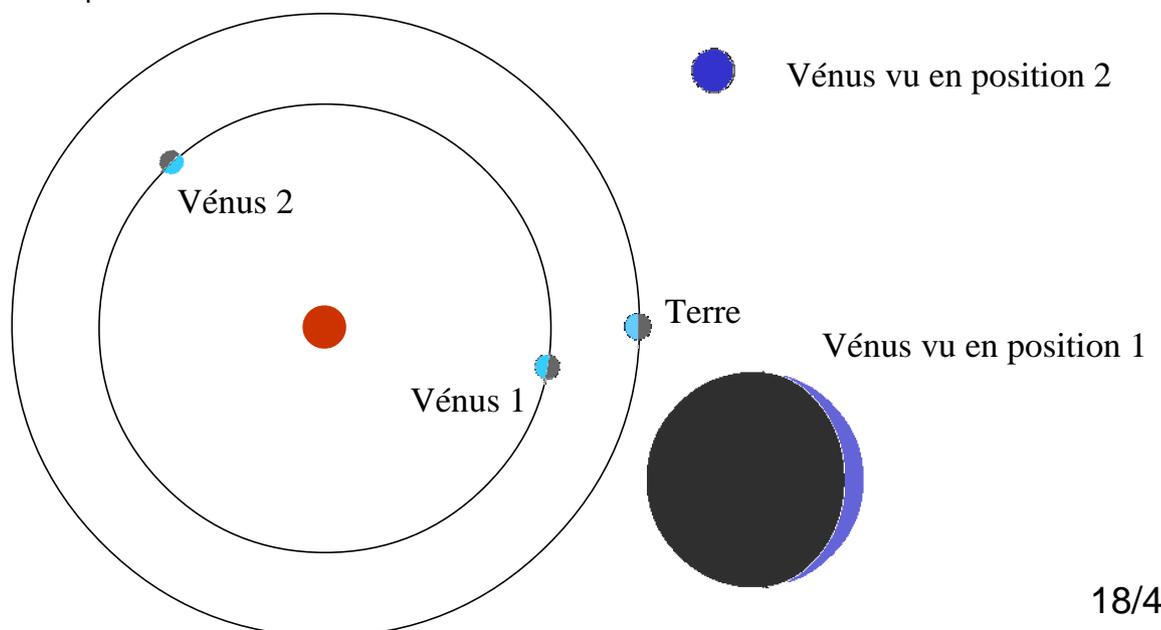
Ce système permet d'expliquer naturellement pourquoi les planètes mettent plus ou moins de temps, selon leur distance au Soleil pour reprendre la même position par rapport aux étoiles. Il explique naturellement pourquoi Vénus et Mercure ne s'éloignent jamais beaucoup du Soleil.



Le système de Copernic présente donc tout à fait le caractère d'une théorie scientifique au sens où il introduit de nouveaux concepts. Ainsi Le Soleil est distingué des planètes qui sont toutes mises dans le même statut. Et sans avoir rien construit d'artificiel pour cela, une foule de résultats vrais sont trouvés.

Certes, Copernic a ensuite rajouté d'une manière ad hoc des petits épicycles pour expliquer la rotation non uniforme des planètes sur ces cercles. En effet les planètes décrivent en réalité des ellipses, géométriquement pratiquement identiques à des cercles, mais tout de même, du coup, parcourues à vitesse variable. Mais cet ajout ad hoc ne dévalorise pas l'immense révolution qu'il a introduite en astronomie. Ses petits épicycles ne sont là que pour apporter des petites corrections qu'on peut facilement négliger dans le mouvement des planètes, mais ne sont pas nécessaires pour expliquer les anomalies fondamentales de mouvement apparent que sont les rétrogradations, alors que dans le modèle de Ptolémée, elles sont nécessaires pour expliquer ces rétrogradations.

Galilée (1564-1642) fait pour la première fois des observations du ciel avec un instrument d'optique, une lunette astronomique. Il découvre des choses incroyables pour ses contemporains : des montagnes sur la Lune, des taches sur le Soleil, la rotation du Soleil sur lui-même « le monde du ciel n'est donc pas parfait », des satellites autour de Jupiter « tout ne tourne donc pas autour de la Terre », les phases et les variations en accord de la taille apparente de Vénus, qui falsifient définitivement le modèle de Ptolémée. En effet, quand Vénus est du même côté du Soleil que la Terre, il est proche de la Terre donc est vu avec une grande taille apparente. Comme on le voit éclairé par-derrière par le Soleil, on le voit alors en croissant. Quand il est du côté opposé de la Terre par rapport au Soleil, il est loin de la Terre donc vu petit, et comme on le voit éclairé par-devant, on voit un disque bien rond.



Les observations de Galilée confirment donc parfaitement le système de Copernic : la Terre tourne sur elle-même et autour du Soleil. Le 12 mars 1610, il publie à Venise ses découvertes dans Sidereus Nuncius (Le Messager céleste).

Képler (1571-1630) découvre grâce aux observations extrêmement précises de Tycho Brahé (1546-1601) que Mars a une orbite elliptique et non circulaire. La Terre et les autres planètes ont aussi une orbite elliptique. Kepler a ainsi découvert les trois lois dites de Kepler qui régissent les mouvements des planètes sur leurs orbites. Les deux premières sont publiées en 1609 dans un livre intitulé Astronomia Nova. La troisième seulement en 1618. La première loi dit que les planètes décrivent des ellipses dont le Soleil est un foyer. La deuxième loi dit que les aires balayées par le segment de droite joignant le Soleil à la planète sont proportionnelles aux temps. La troisième loi donne $T^2/a^3 = \text{constante}$, T étant la période, et a le demi-grand axe, soit la moitié de la plus grande dimension de l'ellipse.

3- Newton. Newton (1642-1727) publie en 1687 son œuvre majeure : Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica. Il y démontre les trois lois de Képler dans le cadre d'une théorie physique, la mécanique de Newton, totalement mathématisée, et apportant de nouveaux concepts : masse, inertie, force, gravitation universelle. Cette théorie résout définitivement le problème des marées.

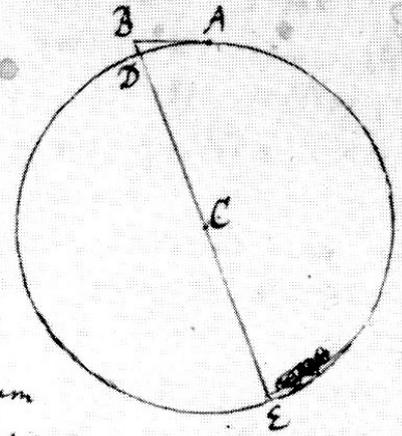
Newton utilise les découvertes de Galilée de séparation du mouvement en ligne droite par inertie et du mouvement de chute libre. Pour un objet dans le vide, soumis à la gravitation d'un autre corps, on peut toujours pendant une courte durée dt , l'observer depuis un vaisseau spatial qui va en ligne droite à vitesse constante, tel qu'à l'instant initial $t = 0$, l'objet soit immobile. Dans ce vaisseau, on observe alors pour l'objet, le pur mouvement de chute libre. La hauteur de chute est celle trouvée par Galilée $h = \frac{1}{2} g t^2$. g est l'accélération de la gravité à cet endroit : $g = G M/d^2$; M étant la masse de l'astre attirant, d la distance, et G la constante de la gravitation universelle. t est la durée de chute, depuis le temps $t = 0$, où l'objet est immobile. Newton en déduit la propriété suivante : Toute trajectoire d'un corps dans un champ de gravité, peut être décomposée en une suite infinie de durées infinitésimales dt . Pendant chaque durée dt , le mouvement peut être décomposé en un petit mouvement de translation en ligne droite, le même, qu'il aurait par inertie si la gravité était annulée, suivi d'un mouvement de chute comme chuterait à cet endroit-là (où au point de départ de la durée choisie dt) un objet immobile. [La vidéo de ce lien explique très clairement cela.](#)

Il applique d'abord cette idée au mouvement de la Lune autour de la Terre.

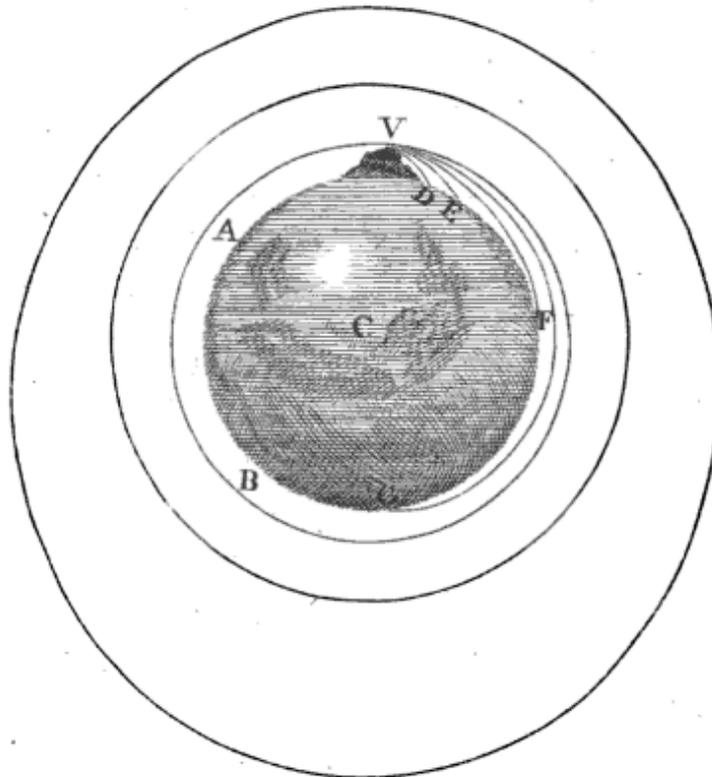
L'été 1666, Newton a 23 ans. Il fuit Cambridge où il y a une épidémie de peste. Il se retrouve dans la maison de sa mère à la campagne au manoir de Woolsthorpe à Grantham dans le Lincolnshire. Alors qu'il est assis d'une manière contemplative dans le jardin, il voit une pomme tomber. Là lui vient l'idée géniale que la Lune tombe pour cette même raison vers la Terre. La Lune reste à distance constante de la Terre, emportée par son élan tangentiel. Il raconte cet épisode à son ami Stukeley le soir, après dîner, le 15 avril 1726, un an et demi avant sa mort, à un moment où il est avec son ami dans le jardin à prendre le thé auprès d'un pommier à Kensington près de Londres. Lors de l'épisode de la pomme, il a tout de suite l'idée de la gravitation universelle. Tous les objets matériels s'attirent en raison de leurs masses, et de l'inverse du carré de leurs distances. L'image ci-dessous est extraite du manuscrit rédigé en 1666 par Newton où il calcule avec cette idée la durée de révolution de la Lune autour de la Terre et où il trouve bien 27 jours. Ce manuscrit fut vu par David Gregory lors d'une visite chez Newton en 1694. Avec le même calcul, on retrouve bien que les planètes décrivent approximativement des cercles autour du Soleil avec la fameuse loi $T^2/a^3 = \text{constante}$.

1 Corpus A in circulo AD versus D gyrantis, conatus a centro tantus est quantus in tempore AD (quod pono minutissimum esse) deferret a circumferentia ad distantiam DB: siquidem eam distantiam in eo tempore acquireret si modo conatu non impedito ^{liberè} moveretur in tangente AB.

Jam cum hic conatus corpora, sic modo in directum ad modum gravitatis continuo urgeret, impelleret per ^{se} quo forent ut quadrata temporum: ut noscatur esse quantum



En 1728, Newton publie A Treatise Of The System Of The World, un livre de vulgarisation pour faire comprendre ses idées sur la gravitation sans calculs. On y trouve le célèbre dessin ci-dessous où on voit qu'en lançant un objet d'une montagne en l'élançant à l'horizontal, en supposant qu'il n'y ait pas le frottement de l'air, l'objet a une trajectoire de moins en moins courbée, jusqu'à ce que, pour une certaine vitesse initiale, la courbure épouse comme il faut la courbure de la surface terrestre, pour que l'objet soit satellisé à altitude constante. Il y a donc continuité et même nature entre la trajectoire balistique d'un objet lancé de la surface de la Terre comme un ballon de foot, et les trajectoires des planètes autour du Soleil.

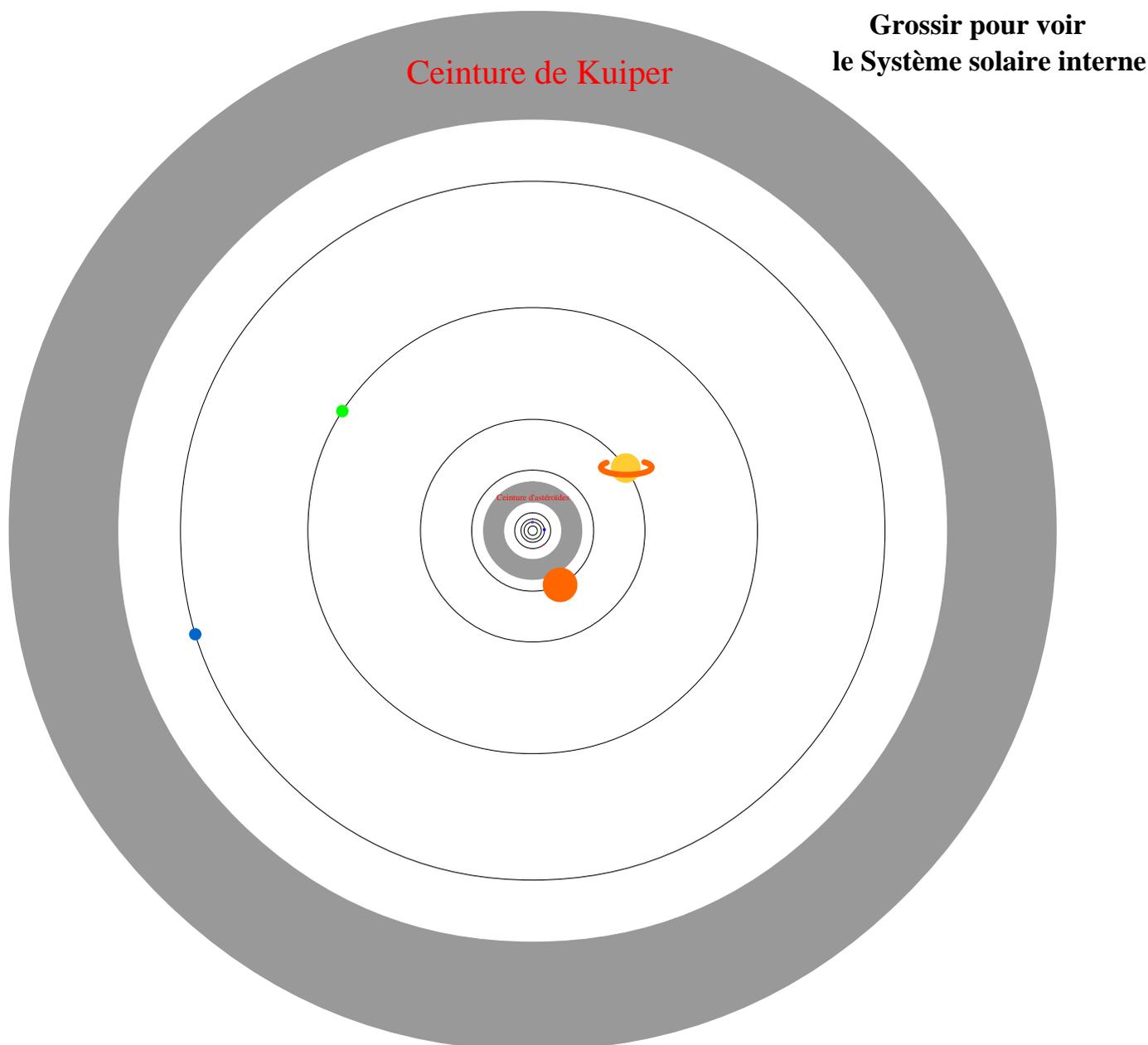


4- Et après. Foucault (1819-1868) réalise en 1851 avec son pendule la première expérience censée prouver que la Terre tourne sur elle-même. Cette expérience peut être observée au musée des arts et métiers à Paris et au Palais de la découverte.

Einstein (1879-1955) prouve définitivement en 1915 avec sa théorie de la relativité générale, que la question de savoir si c'est la Terre qui tourne sur elle-même ou si c'est tout l'Univers qui tourne autour de la Terre n'a pas de sens et est pure convention du choix de référentiel.

IV- DESCRIPTION DU SYSTÈME SOLAIRE

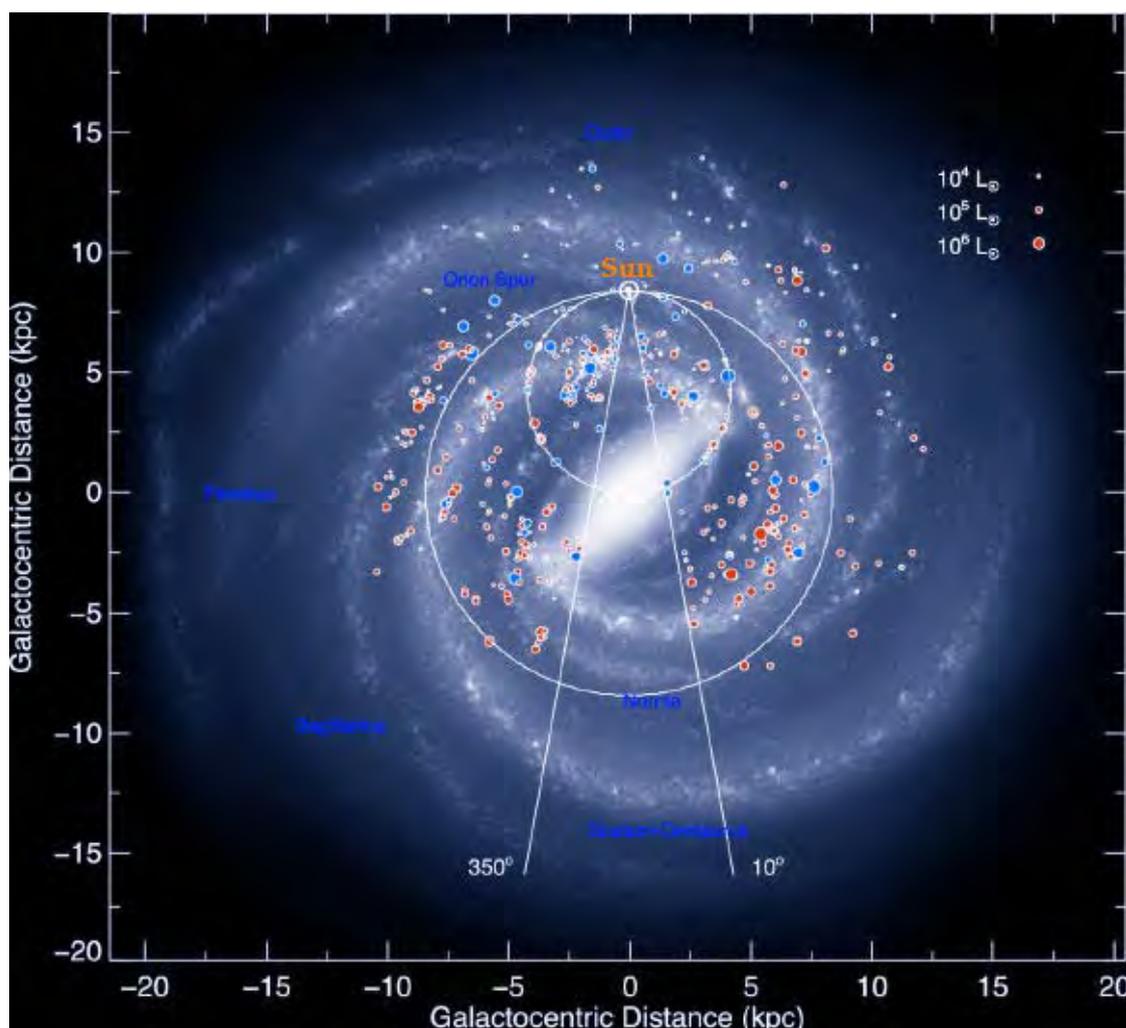
1- Schéma. Sur le schéma ci-dessous, l'échelle n'est pas la même pour la taille des planètes et pour leur distance au Soleil.



2- Généralités. Le Système solaire est formé principalement du Soleil et des 8 planètes. Le Soleil représente 99,9% de la masse totale du Système solaire. C'est une étoile comme toutes les étoiles qu'on voit dans le ciel. Il s'agit donc d'une gigantesque boule de gaz tellement chaud qu'il est ionisé. Il s'agit d'un plasma donc conducteur de l'électricité. Des courants électriques dans le Soleil forment un gigantesque champ magnétique. Les taches solaires sont des zones de très fort champ magnétique où la convection est freinée. Elles sont donc plus froides, d'où leur aspect plus sombre. Le Soleil est environ 100 fois plus gros que la Terre (en diamètre) et 10 fois plus gros que la plus grosse planète, Jupiter. La Terre est à une distance d'environ 100 diamètres solaires du Soleil. Les étoiles sont très lumineuses car très chaudes. La plupart des étoiles ont une masse comprise entre 0,3 et 0,5 masse solaire. On a une étoile si $m > 0,08$ masse solaire. Les plus grosses étoiles possible ont une masse de 125 masses solaires. Au-delà, on a la limite d'Eddington. La lumière émise

est tellement forte qu'elle expulse par pression de radiation les couches externes de l'étoile. La surface du Soleil est à 6000 °C. Elles émettent ainsi leur propre lumière. Ce sont des sources primaires de lumière. Par contre les planètes sont froides et reflètent la lumière de l'étoile autour de laquelle elles tournent. Il s'agit de sources secondaires de lumière. Le cœur du Soleil est à 15 millions de degrés, température suffisante pour allumer la réaction nucléaire de fusion de l'hydrogène en hélium. Il faut en effet que les protons aillent suffisamment vite par l'agitation thermique pour vaincre la barrière de répulsion électrostatique par effet tunnel. Le Soleil dure très longtemps (environ 10 milliards d'années) car il brûle très lentement son combustible. En effet, il faut que certains protons se transforment en neutron par l'interaction faible, ce qui prend plusieurs secondes une fois en contact. De plus, les protons doivent se rejoindre en passant par l'effet tunnel de la mécanique quantique, tellement leur répulsion électrostatique est forte, ce qui entraîne une très faible probabilité de rencontre. Par contre, la réaction de fusion qui met en jeu l'interaction forte dégage une énergie gigantesque.

Le Soleil est à 26000 années-lumière du centre de notre galaxie la Voie lactée, une très belle spirale barrée. L'image ci-dessous est de J. S. Urquhart, année 2013. Elle vient du Spitzer Science Center. Le cercle blanc représente la trajectoire du Soleil en 250 millions d'années autour du centre de notre galaxie. Les ronds représentent les endroits de formations de jeunes étoiles massives. À moins de 10 000 années-lumière du centre, la concentration en étoiles est trop forte pour assurer une stabilité sur le long terme à un système planétaire. Plus loin du centre que le Soleil, la diminution des supernovae, fait que la quantité d'éléments lourds comme le fer, nécessaires à la vie, est insuffisante.



Pluton n'est pas une planète. Cela a été décidé en août 2006 par l'union internationale des astronomes. C'est une planète naine. Il fait partie de la ceinture de Kuiper, zone d'une multitude de petits corps glacés orbitant au-delà de Neptune. Il ne tourne pas dans le même plan que les planètes du Système solaire. Il est trop petit

pour évacuer les autres objets orbitant dans sa zone, en les agrégeant ou en les expulsant. Son orbite est très elliptique, l'amenant parfois plus près du Soleil que Neptune.

Aux confins du Système solaire, il y a le nuage de Oort, de forme approximativement sphérique. C'est ce qui reste de la nébuleuse ayant donné naissance au Système solaire. Il s'agit de la partie restant accrochée gravitationnellement au Soleil, mais sans s'être effondrée. Il est constitué d'une multitude de petits corps glacés. Il s'étend jusqu'à 1,5 année-lumière du Soleil. La plus proche étoile, Proxima du Centaure est à 4,2 années-lumière de distance.

En ordre de grandeur, si l'on fait une maquette du Système solaire où Neptune est à 10 centimètres du Soleil, la plus proche étoile, Proxima du Centaure, serait à un kilomètre. Notre galaxie, la Voie Lactée, une galaxie spirale de 100 000 années-lumière de diamètre et contenant 200 milliards d'étoiles aurait la taille de la Terre, et la galaxie la plus proche, la galaxie d'Andromède, à 2,5 millions d'années-lumière, serait ramenée à la distance de la Lune.

L'univers est né il y a 13,7 milliards d'années dans une phase pratiquement infinie en température et densité. C'est le Big Bang, terme inventé dans les années 1950 (au cours d'un programme de la BBC) par l'astrophysicien anglais Fred Hoyle qui n'y croyait pas, pour le tourner en dérision, sans savoir que ce deviendrait le nom officiel de ce phénomène. En expansion, il se refroidit. Pendant cette phase, les particules élémentaires de l'Univers, en se refroidissant, se lient pour donner la matière sous forme de 80% d'hydrogène et 20% d'hélium. Les fluctuations quantiques à cette époque sont à l'origine des germes ayant donné naissance aux galaxies. Les galaxies sont réparties en amas et superamas en forme de filaments. L'univers à une structure alvéolaire en nid d'abeilles où ces amas de galaxies sont dans les murs. Les galaxies spirales grâce au frottement dû au gaz qu'elles contiennent sont devenues planes avec une structure en spirales avec des bras de forte densité de gaz et d'étoiles. Les galaxies elliptiques qui sont le résultat de collision de galaxies spirales sont dépourvues de gaz et non planes. L'amas dans lequel se trouve notre galaxie s'appelle le Groupe local.

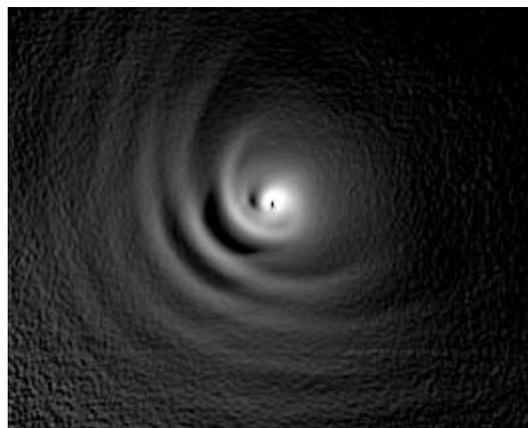
Les étoiles supérieures à 8 masses solaires fabriquent dans leur cœur les éléments chimiques jusqu'au fer. À la fin de leur vie, elles explosent en supernovae, dispersant ces éléments dans l'Univers. Nous sommes donc des poussières d'étoiles, comme le dit l'astrophysicien Hubert Reeves. Les éléments chimiques d'une masse supérieure au fer sont produits lors de cette explosion.

3- Les comètes. Le mot comète vient d'un mot grec qui veut dire chevelu. Les comètes proviennent soit de la ceinture de Kuiper, soit du nuage de Oort. Leur trajectoire est très elliptique et en dehors du plan du Système solaire. En effet, elles peuvent provenir de la ceinture de Kuiper après une collision provoquant une orbite elliptique dans n'importe quel plan. Si elles proviennent du nuage de Oort, leur plan d'orbite est quelconque, le nuage de Oort étant un halo à symétrie sphérique autour du Soleil. Ces corps sont des objets constitués en dehors de substances rocheuses, de glaces d'eau, d'ammoniac et de dioxyde de carbone.

Les débris glacés du nuage de Oort peuvent être déstabilisés gravitationnellement par le passage proche d'une étoile, et donner de nouvelles comètes. Ce sera le cas d'une manière intense dans 1,3 million d'années, selon les résultats d'observation du satellite Gaia qui mesure à la fois la position et la vitesse des étoiles. L'étoile Gliese 710 dont la masse est égale à 2/3 de celle du Soleil, passera alors à 0,2 a.l. du Soleil, en plein dans le nuage de Oort. Elle ne devrait cependant pas modifier sensiblement les orbites des planètes du Système solaire. Heureusement donc, que dans les galaxies, les étoiles sont à des distances les unes des autres, très grandes devant leurs diamètres.



Sur l'image ci-dessus de la comète Hale Bopp qui est passée au printemps 1997 et qui était splendide à l'œil nu, on voit à côté à gauche, la galaxie d'Andromède. On distingue la queue de plasma, ionisée, poussée par le vent solaire et qui est bleue et assez rectiligne. La queue de poussière est blanche et plus diffuse. Elle est poussée par la pression de radiation de la lumière du Soleil. Ces deux queues sont donc toujours à l'opposé du Soleil. Elles résultent de la sublimation des glaces d'eau, de dioxyde de carbone et d'ammoniac par la chaleur apportée par la lumière du Soleil, libérant les poussières agglomérées, quand la comète s'approche de ce dernier. La courbure de la queue de poussière résulte du cheminement lent de la poussière, pendant que la comète décrit son orbite. Par contre, les ions dans la queue de plasma se déplacent à 400 km/s. La zone très brillante est la tête, poche de gaz qui enveloppe le noyau solide. Le bord de la tête est la chevelure. On voit ci-dessous des tourbillons de poussière dans la chevelure de la comète Hale Bopp causés par la rotation rapide du noyau de cette comète. Ces tourbillons étaient visibles avec un simple télescope de 200 mm de diamètre, et on pouvait en déduire dans quel sens tournait le noyau.



La comète la plus célèbre est la comète de Halley, dont la période est de 76 ans. Son passage à l'automne 1985 fut assez décevant, car elle n'était visible qu'avec des jumelles.

La comète de Halley fut visible en avril 1066, au moment où Guillaume le Conquérant envahissait l'Angleterre. Son épouse la reine Mathilde la représenta sur la tapisserie de Bayeux (image ci-dessous).

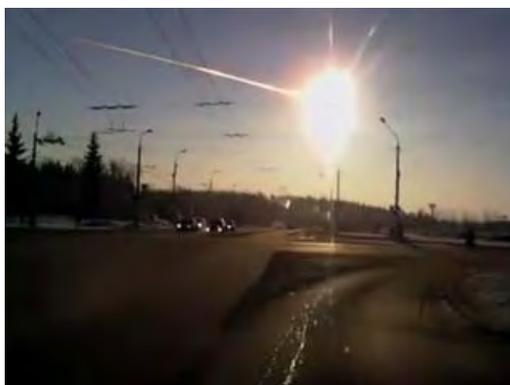


Elle marque le triomphe de la Gravitation universelle de Newton. En effet, elle apparut en 1680. Halley aidé par Clairaut qui fit les calculs algébriques compliqués, et Lalande et Hortense Lepaute (à l'origine de l'hortensia), qui firent les applications numériques, prédirent la date de son retour. Le calcul donna que les perturbations gravitationnelles de Saturne retarderaient son retour de 100 jours, et celles de Jupiter de 518 jours, soit en tout un an et huit mois de retard, à un mois près. Son retour fut prédit pour avril 1759 et elle passa effectivement au périhélie le 12 mars 1759.

4- Les météorites. Ce sont des débris rocheux se baladant dans le Système solaire, d'une taille du micron à plusieurs kilomètres. Les plus gros résultent de collisions dans la ceinture d'astéroïde entre Mars et Jupiter propulsant des débris à l'intérieur vers la Terre. Les plus petits sont les poussières débris des queues de comètes. Ces poussières dans le plan du Système solaire forment la lumière zodiacale, faible lueur le long de l'écliptique quand le Soleil n'est pas trop loin sous l'horizon. Dans l'image ci-dessous, on voit cette lueur vue depuis le Mauna Kea à 4200 mètres d'altitude.



La chute de ces petits grains dans l'atmosphère les chauffe à incandescence, par frottement à grande vitesse contre l'air, et donne les étoiles filantes. Les plus célèbres sont les Perséides les 12 et 13 août quand la Terre traverse la trajectoire de la comète Swift-Tuttle. Le vendredi 15 février 2013, un bolide tomba dans l'Oural. Le bang supersonique fit beaucoup de destructions (image ci-dessous).



Il faut citer le bolide de la Toungouska de 50 mètres de diamètre qui rasa 100 kilomètres de forêt de Sibérie centrale le 30 juin 1908. Il faut citer aussi le bolide à l'origine de la disparition des dinosaures il y a 65 millions d'années (15 kilomètres de diamètre) qui atterrit dans le golfe du Mexique (cratère de Chicxulub). Le Meteor Crater en Arizona (ci-dessous) a un diamètre de 1500 m et une profondeur de 200 m. Il s'est formé il y a 50 000 ans par l'impact d'un bolide de 50 mètres de diamètre.

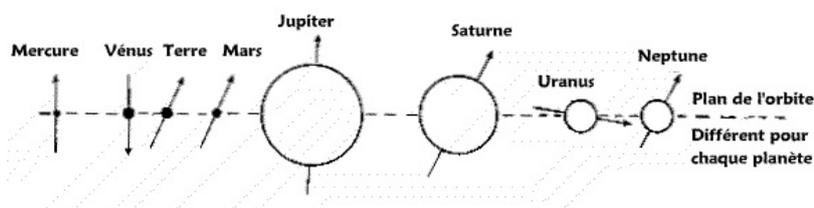


On surveille maintenant ces géocroiseurs.

5- Tableau du Système solaire.

Nom	Demi-grand axe de l'orbite (UA)	Distance moyenne au Soleil (10 ⁶ km)	Excentricité de l'orbite	Inclinaison de l'orbite sur l'écliptique	Durée de la révolution sidérale	Diamètre équatorial (Terre = 1)	Diamètre équatorial (km)	Temps mis par la lumière	Masse (Terre = 1)	Durée du jour sidéral jours h.min	Poids d'un homme de 60kg	Température moyenne à la surface	Densité par rapport à l'eau	Nombre de satellites	Atmosphère	Inclinaison de l'équateur
Mercure	0,387	57,9	0,206	7° 00'	88 j	0,38	4 878	0h 03	0,06	58j 14h	22 kg	300 °C	5,4	0	Aucune	2°
Vénus	0,723	108,2	0,007	3° 23'	225 j	0,95	12 104	0h 06	0,82	243j	54 kg	480 °C	5,2	0	CO ₂	177,4°
Terre	1,000	149,6	0,016	0° 00'	1,00 an	1,00	12 756	0h 08	1	23h 56	60 kg	14,5 °C	5,5	1	N ₂ et O ₂	23,45°
Mars	1,524	229,0	0,093	1° 51'	1,88 an	0,53	6 795	0h 12	0,11	1j 0h 37	24 kg	-25 °C	3,9	2	CO ₂	24°
Jupiter	5,210	779,4	0,050	1° 18'	11,87 an	11,21	142 985	0h 43	317,89	9h 55	156 kg	-150 °C	1,3	16	H ₂ et H _e	3,1°
Saturne	9,585	1433,9	0,056	2° 29'	29,48 an	9,45	120 537	1h 20	95,15	10h 14	66 kg	-150 °C	0,7	17	H ₂ et H _e	26,7°
Uranus	19,233	2877,2	0,044	0° 46'	84,07 an	4,01	51 119	2h 40	14,54	16h 50	54 kg	-210 °C	1,2	15	CH ₄	97,9°
Neptune	30,110	4504,4	0,011	1° 46'	164,90 an	3,96	50 538	4h 10	17,23	18h	66 kg	-223 °C	1,7	2	CH ₄	29,6°
Pluton	39,254	5872,3	0,244	17° 09'	247,85 an	0,18	2320	5h 30	0,002	6j 9h	30 kg	?	0,9	1	Aucune	> 50°
Soleil						109,12	1 392 000		333000	27j	1680 kg	5500 °C	1,4		H ₂ et H _e	

DIRECTIONS ET SENS DES AXES DE ROTATIONS DES PLANÈTES



6-Mercure. Sa surface cratérisée ressemble beaucoup à celle de la Lune. Cette planète est trop petite et trop près du Soleil pour avoir une atmosphère.

La densité décomprimée d'un astre est la densité qu'il aurait si toute sa matière était placée dans des conditions de pression nulle. La densité de Mercure est de 5,44 tandis que celle de la Terre est de 5,50. Cependant la Terre étant beaucoup plus grosse que Mercure, sa matière est beaucoup plus comprimée. La densité décomprimée de Mercure est de 4,50 tandis que celle de la Terre est de 4,50. Quelle est l'explication ? Alors que le noyau de Fer-Nickel de la Terre compte pour 35% de sa masse, celui de Mercure compte pour 60 à 70% de sa masse. Le manteau rocheux de Mercure a dû être arraché par un gigantesque impact, peut-être pendant le grand bombardement tardif.

Une des conséquences de cela est que la planète Mercure, lorsqu'elle s'est refroidie, s'est beaucoup contractée, car le fer a un coefficient de dilatation thermique très élevé. Mercure est donc un peu comme une pomme qui s'est rétrécie en séchant et est fripée. Il en résulte sur sa surface d'immenses failles nommées escarpements, d'un kilomètre de hauteur et qui s'étendent sur des centaines de kilomètres.

L'ellipse décrite par Mercure tourne lentement autour de son foyer dans le même sens qu'elle est parcourue par Mercure, à cause des perturbations gravitationnelles des autres planètes. Mais il y a un excès de 43 secondes d'arc par siècle inexplicable avec la mécanique newtonienne. Historiquement, c'est la première vérification expérimentale de la relativité générale d'Einstein, de retrouver cette valeur connue à l'époque. Quand Einstein, après un long calcul, trouva exactement ce nombre lors de l'application numérique, il eut des palpitations. Comme quoi, le fait de retrouver une valeur numérique connue mais non expliquée est autant une preuve d'une nouvelle théorie qu'un résultat nouveau. Peut-être même une meilleure preuve, car là, il est impossible de bidouiller les résultats expérimentaux pour que cela marche, puisqu'ils sont inscrits dans la littérature. Quant aux calculs théoriques, ils sont totalement contraints par la théorie sans aucune modification possible. À une époque, ce long calcul d'Einstein était exposé au musée des sciences et de l'industrie de La Villette. Il est émouvant de voir faits de la main d'Einstein, avec une écriture parfaite, à la plume, des calculs d'intégrales compliqués, montrant qu'il était un mathématicien hors pair. Le calcul de l'avance du périhélie de Mercure, fait actuellement dans les livres sur la relativité générale, est exactement le même que celui fait pour la première fois à l'époque par Einstein, avec les mêmes notations.

7- Vénus. Vénus est semblable à la Terre en taille mais très différente par les conditions qu'elle a subi. La Terre faisant écran, elle a reçu beaucoup moins d'eau. Cette eau n'a pas réussi à se liquéfier vu la chaleur causée par la trop grande proximité du Soleil. Les molécules d'eau décomposées par les radiations UV du Soleil ont donc disparu. Il ne reste que le dioxyde de carbone CO₂. Quand il y a de l'eau, le dioxyde de carbone se dissout dans l'eau. On a ensuite la réaction chimique suivante avec les roches silicatées :



C'est comme cela que la Terre régule sa température par la tectonique des plaques. S'il fait trop chaud, il pleut plus. La réaction chimique ci-dessus est amplifiée, et le dioxyde de carbone disparaît pour fabriquer des roches calcaires. La température diminue. S'il fait trop froid, l'atmosphère devient sèche, le cycle de l'eau se ralentit, et le dioxyde de carbone qui sort des volcans s'accumule élevant lentement la température. Grâce aux zones de subduction, le calcaire s'enfonce en profondeur et est décomposé par la chaleur en CO₂ qui ressort par les volcans des zones de subduction. Ce mécanisme explique pourquoi la Terre a gardé sa température constante alors que le Soleil chauffe 30% plus qu'au début de la vie sur la Terre. Dans 700 millions d'années, le Soleil chauffera tellement que pour maintenir cette température, la concentration de dioxyde de carbone sera trop faible pour que la photosynthèse fonctionne. La vie disparaîtra alors de la Terre

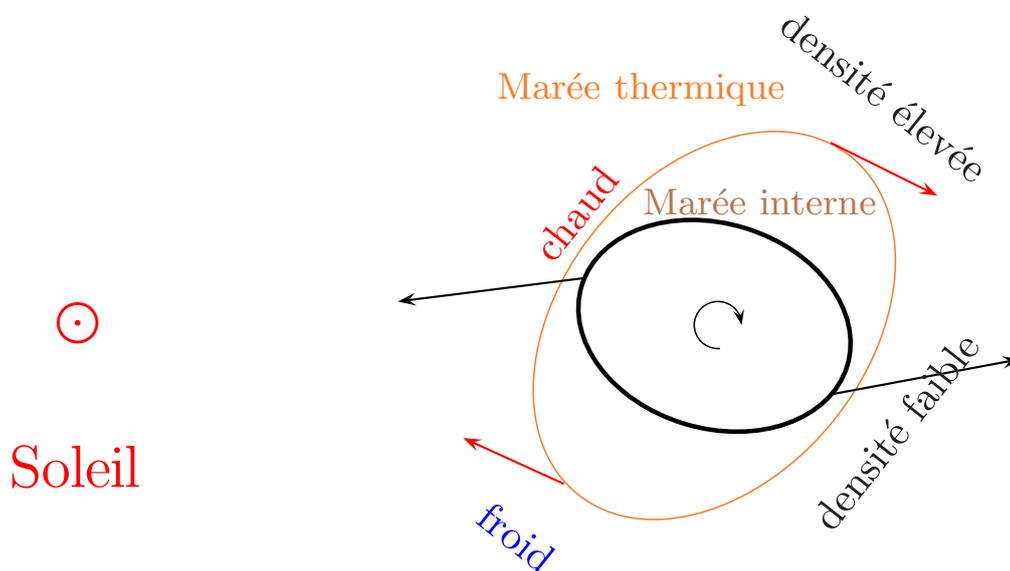
par disparition des plantes. L'atmosphère de Vénus est donc constituée à 90% de CO₂ et l'effet de serre gigantesque associé, et le fait qu'il n'y a pas de cycle de l'eau pour refroidir le sol entraîne au sol une température de 477°C. Il n'y a pas de tectonique des plaques sur Vénus. La lubrification de la lithosphère par l'eau est nécessaire pour que la tectonique des plaques fonctionne. La lithosphère est alors suffisamment déformable pour se tordre dans les zones de subduction.

L'atmosphère tourne soixante fois plus vite que la planète solide. Cette superrotation s'effectue dans le même sens que la rotation planétaire (sens rétrograde d'est en ouest) avec une période de 4 jours terrestres, tandis que la planète effectue un tour sur elle-même en 243 jours terrestres. L'atmosphère est ainsi animée de vents de 200 m/s. L'image ci-dessous montre cette superrotation détectée par la sonde Mariner 10.



Ces mosaïques d'images de Vénus prises dans l'ultraviolet à 7 heures d'intervalle, le 7 février 1974, par Mariner-10 montrent la rotation rapide vers l'ouest des nuages dans l'atmosphère de la planète. La flèche noire marque le déplacement d'une formation nuageuse (N.A.S.A.).

Cette superrotation est causée par un phénomène de marée thermique. Le côté face au Soleil est extrêmement chaud. L'atmosphère est donc très peu dense car très dilatée. Une grande masse d'air est ainsi déplacée à 90° à l'est et à l'ouest de la zone la plus chaude. Là où c'est le plus dense, c'est sur la face opposée. Cependant, quand on développe en série de Fourier la température, donc la densité autour de la planète, on trouve une composante semi-diurne avec deux bourrelets comme dit ci-dessus. Comme c'est cette composante qui est à l'origine de l'effet de marée thermique, dans l'explication qualitative, on ne garde qu'elle.

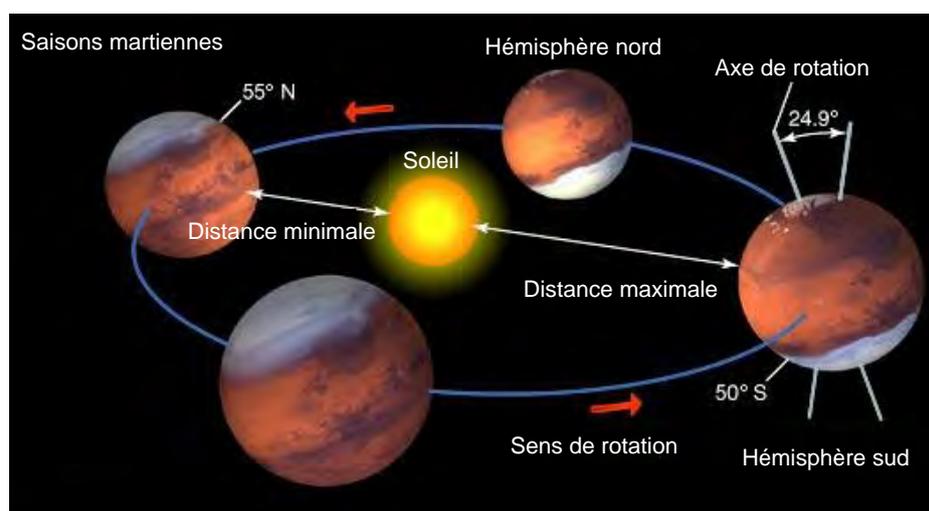


L'atmosphère étant entraînée par frottement avec le sol, la rotation de la planète décale un peu la zone la plus chaude. L'effet de marée appliqué par le Soleil tend à redresser les deux bourrelets de forte densité atmosphérique dans l'axe Vénus Soleil, appliquant un couple accélérant la superrotation de l'atmosphère. Mais le frottement de l'atmosphère sur le sol, tout en accélérant la rotation de la planète, freine l'atmosphère pour qu'elle atteigne une vitesse constante. Maintenant on pourrait penser que le frottement sur le sol de cette atmosphère en superrotation accélère la rotation de la planète. Mais l'effet de marée terrestre sur le globe vénusien légèrement déformé applique, comme on le voit sur la figure ci-dessus un couple opposé qui freine la rotation de la planète. Aux vitesses de rotations mesurées pour la planète et l'atmosphère, tous les couples s'équilibrent, et on atteint des rotations de vitesses angulaires constantes. La rotation de la planète Vénus est donc le résultat de l'effet d'un moteur thermique utilisant l'effet de marée. La planète est arrivée dans cet état, soit suite à l'effet d'un impact puissant, soit parce que l'effet de marée gravitationnel de l'atmosphère a dans un premier temps pratiquement stoppé la planète, cette dernière repartant un peu par hasard en sens inverse, enclenchant l'effet de marée thermique.

8- Mars. Contrairement à la Terre, par l'absence d'une grosse lune, le noyau de métal de Mars s'est solidifié. Il n'y a donc plus de courants de convections possibles dans ce métal conducteur pouvant créer un champ magnétique par effet dynamo. Le vent solaire a donc frappé de plein fouet l'atmosphère de Mars la dispersant dans l'espace, d'autant plus facilement que Mars étant beaucoup plus petit que la Terre, la gravité plus faible est moins efficace que sur la Terre pour retenir l'atmosphère. L'atmosphère sur Mars, principalement constituée de dioxyde de carbone est donc très ténue.

Ce qui est remarquable, c'est que la pression sur Mars (en dehors de fluctuations météorologiques) est exactement égale à la pression du point triple de l'eau, soit : 611 Pascals, soit 0,006 atmosphère. En effet, si cette pression est inférieure à ce seuil, l'eau liquide ne peut pas exister sur Mars, et le lent dégagement de CO₂ par ce qui reste des volcans fait lentement monter la pression. Si la pression est supérieure à ce seuil, l'eau liquide peut exister sur Mars, et le lessivage des silicates pour former des carbonates fait disparaître le CO₂ de l'atmosphère, donc fait baisser la pression.

Mars est environ dix fois moins massive que la Terre mais dix fois plus massive que la Lune. Sa topographie présente des analogies aussi bien avec la Lune, à travers ses cratères et ses bassins d'impact, qu'avec la Terre, avec des formations d'origine tectonique et climatique telles que des volcans, des rifts, des vallées, des champs de dunes et des calottes polaires. La plus grande montagne du Système solaire, Olympus Mons (qui est aussi un volcan bouclier), et le plus grand canyon, Valles Marineris, se trouvent sur Mars. La surface de Mars est principalement constituée de déserts caillouteux avec des dunes de sable, le tout coloré en rouge par la grande présence de l'oxyde de fer.

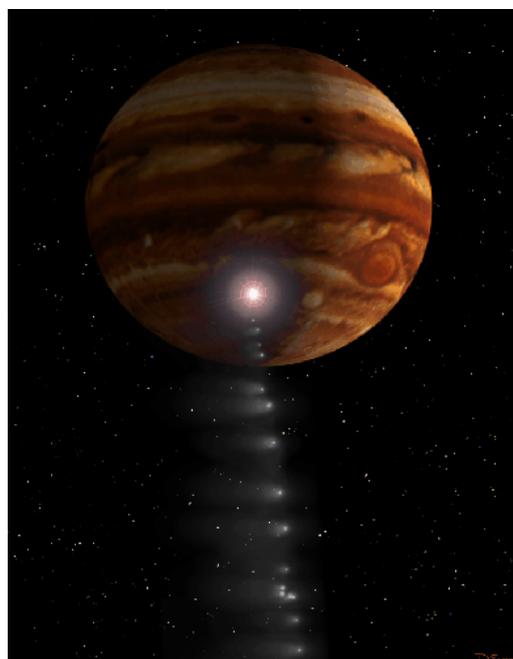


A priori, du fait que l'inclinaison de l'axe des pôles est presque la même que pour la Terre, le phénomène des saisons devrait être identique sur Terre et sur Mars. Déjà du fait que Mars tourne en environ 2 ans autour du Soleil, les saisons y durent deux fois plus longtemps. Mais, on voit sur l'image ci-dessus, que l'hémisphère sud est loin du Soleil l'hiver, il y fera donc très froid, et la masse de glace y sera énorme, d'autant plus que Mars étant loin du Soleil va alors plus lentement. Dans l'hémisphère sud, l'hiver dure donc plus longtemps que l'été. Par contre, l'été sera très chaud, même s'il est bref, et la calotte sud diminue beaucoup. Pour l'hémisphère nord, l'été est long mais frais, et la calotte polaire de glace diminue moins. Par contre, l'hiver y est court et peu froid, et la calotte polaire y est peu développée.

9- Jupiter. La grande tache rouge dans l'atmosphère de Jupiter est remarquable par le fait qu'elle dure depuis 350 ans. On l'a en effet observée pour la première fois en 1665. Elle a la structure d'un soliton, des interactions non linéaires compensant la dispersion naturelle du phénomène.

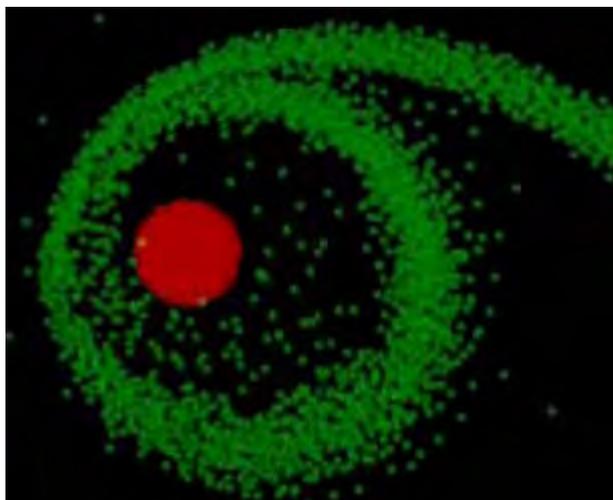


La photographie ci-dessous montre l'impact de la comète Shoemaker Levy 9 avec Jupiter en juillet 1994. On voit sur cet exemple que Jupiter sert de bouclier pour éviter à la Terre de trop fréquentes collisions avec des objets célestes. Jupiter aurait été plus près de la Terre qu'il aurait empêché sa formation. S'il avait été plus loin, il aurait été un bouclier moins efficace, rendant la vie sur la Terre plus aléatoire.



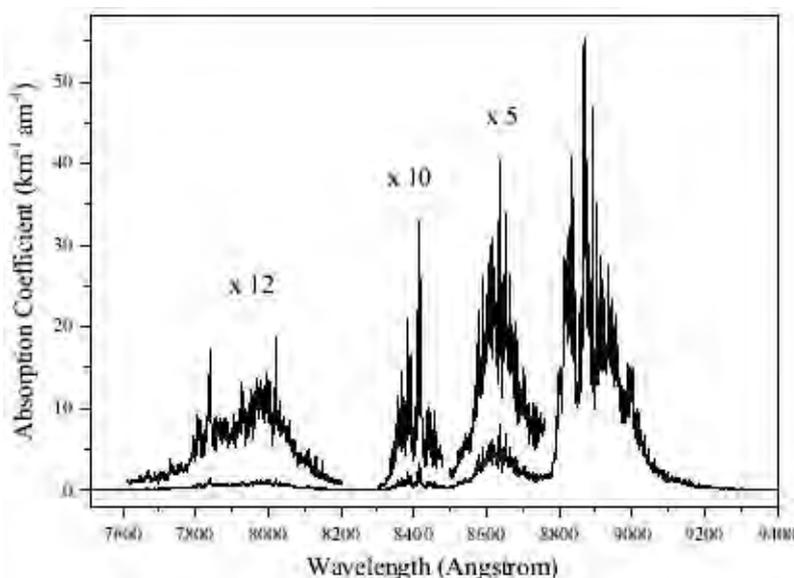
Io, le satellite de Jupiter le plus près de la planète est soumis à un volcanisme intense. L'intérieur de Io est chauffé par l'effet de marée très puissant de Jupiter. La rotation sur elle-même de la planète est en permanence désynchronisée sur sa position autour de Jupiter, par le fait que décrivant une ellipse autour de Jupiter, elle accélère puis décélère en permanence.

10- Saturne. Les anneaux de Saturne sont remarquables. Ils résultent de l'approche tangentielle d'un astre détruit par effet de marée, ayant franchi la limite de Roche, où le gradient de gravité est supérieur à la cohésion gravitationnelle propre de l'astre.

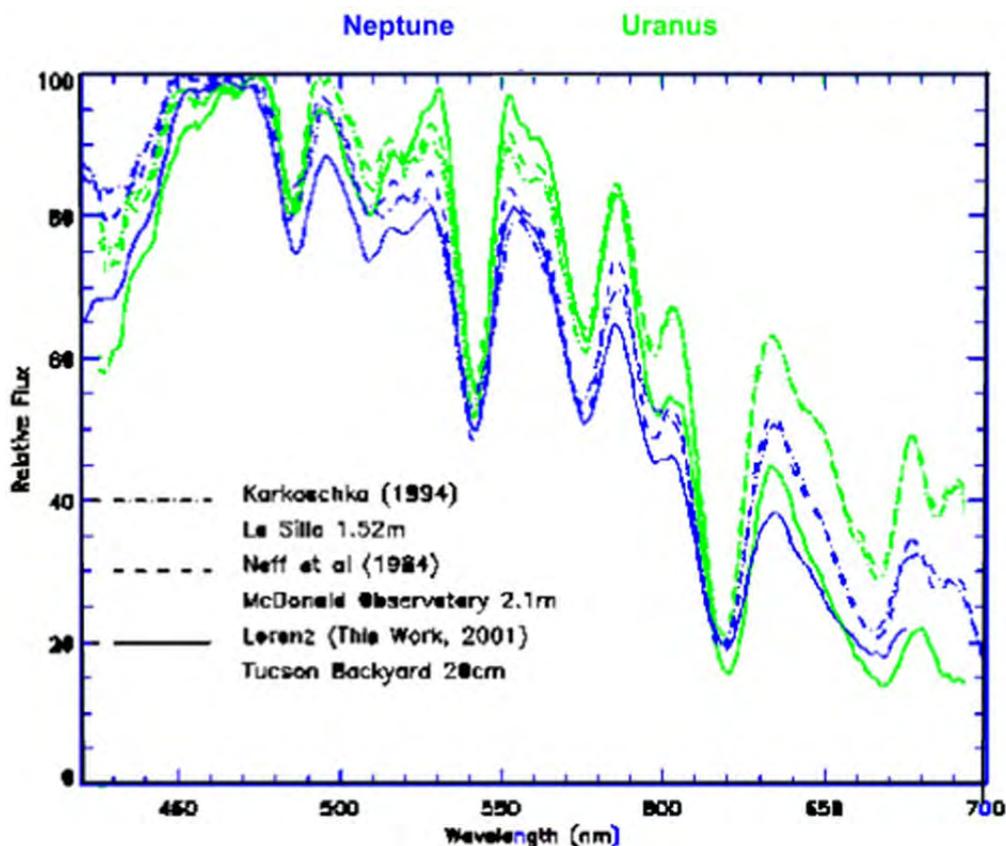


Comme pour la lune de Jupiter Europe, Encelade, satellite de Saturne, est supposée abriter sous sa croûte glacée un océan d'eau liquide contenant peut-être de la vie. Les geysers d'Encelade alimentent les anneaux de Saturne.

11- Uranus et Neptune. Uranus est verte et Neptune bleue. Ces teintes sont principalement causées par les atmosphères riches en méthane d'Uranus et Neptune. Neptune est vue bleue car elle contient plus de méthane qu'Uranus et a une atmosphère plus turbulente entraînant peut-être plus de diffusion du bleu. Neptune contient 3% de méthane, et Uranus 2%. Le méthane absorbe le rouge, comme on le voit sur l'image ci-dessous entre 760 et 820 nm, et laisse ainsi passer le vert et le bleu :

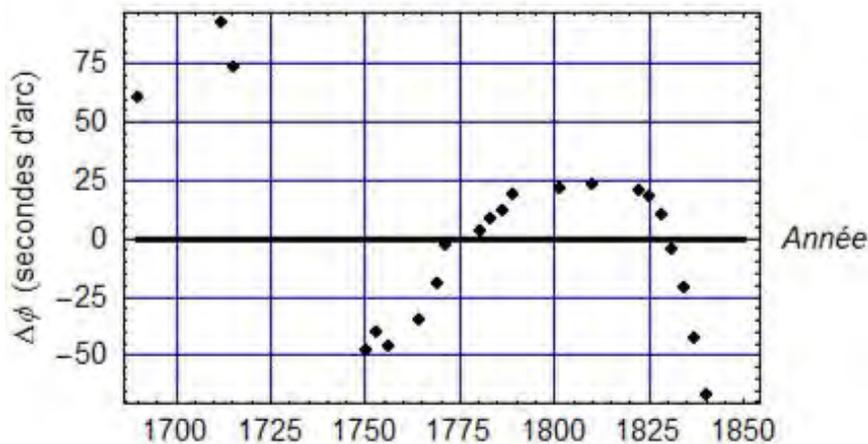


Le vert et le bleu sont ainsi plus diffusés. Le fait que Neptune contienne plus de méthane entraîne une augmentation de l'intensité de la diffusion du bleu et du vert, mais le bleu étant plus diffusé par la diffusion Rayleigh, la couleur bleue en est peut-être ainsi renforcée. On voit sur les spectres d'émissions ci-dessous que réellement, l'émission de vert par Uranus entre 500 et 550 nm domine, tandis que pour Neptune, c'est le bleu, pour des longueurs d'onde inférieures à 450 nm :



L'axe de rotation d'Uranus est couché sur son plan de rotation autour du Soleil, à cause d'une collision. On a découvert également des anneaux autour d'Uranus.

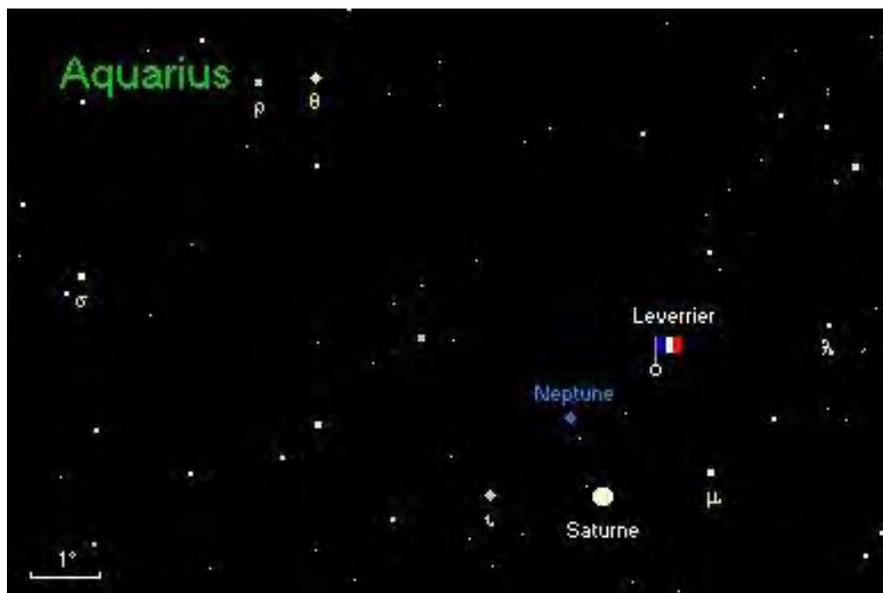
La planète Neptune marque aussi un triomphe de la Gravitation universelle de Newton. En effet, elle fut découverte grâce à un calcul basé sur cette théorie. Alexis Bouvard était directeur de l'observatoire de Paris. Malgré tout le soin qu'il prit à tenir compte des perturbations gravitationnelles de Jupiter et Saturne, la planète Uranus continuait à avoir une anomalie dans son mouvement. Elle était tantôt en avance, tantôt en retard sur la position théorique. Le tableau ci-dessous montre ces anomalies de longitude héliocentrique d'Uranus :



Anomalie de longitude de la planète Uranus

On se posa la question de savoir si la loi de la Gravitation universelle s'appliquait encore à cette distance. Mais la mécanique newtonienne fonctionnait tellement bien, qu'on ajouta une hypothèse ad hoc pour sauver cette théorie, ce qui est une démarche classique en science. L'hypothèse ad hoc peut avoir en effet un pouvoir heuristique.

L'hypothèse ad hoc adoptée fut qu'une planète plus lointaine, encore inconnue, perturbait le mouvement d'Uranus. Après de longs calculs, Le Verrier envoie une lettre le 18 septembre 1846 à l'astronome Johann Galle à Berlin, qu'il connaissait très bien. Cet astronome possédait les meilleures cartes d'étoiles jusqu'à la magnitude 8. Cette lettre est reçue le 23 septembre juste le jour où le directeur de l'observatoire Johann Encke fête ses 55 ans. Galle observe tout de même ce soir-là et trouve Neptune. La carte ci-dessous montre la position calculée par Le Verrier et la position réelle de la planète.



Sans entrer dans les calculs compliqués de Le Verrier, il dut faire des hypothèses sur la planète perturbatrice. La première hypothèse qu'il fit est d'utiliser la loi de Titius-Bode. Il supposa donc que Neptune était 1,5 fois plus loin du Soleil qu'Uranus, ce qui est bien le cas (Neptune est donc en résonance 2/1 avec Uranus). On remarque sur le tableau des anomalies ci-dessus, que l'anomalie d'Uranus est maximale en 1822 puis décroît rapidement. On peut penser qu'avant 1822, Uranus est tiré vers l'avant, puis à partir de 1822, est tiré en arrière. Cela implique que Neptune est en conjonction avec Uranus en 1822 (ce qui est bien le cas !), c'est-à-dire au même endroit de l'écliptique. En appliquant ensuite la troisième loi de Kepler pour trouver la période de Neptune, avec l'hypothèse juste, faite sur sa distance, il est facile de voir approximativement où il doit être sur l'écliptique en 1846.

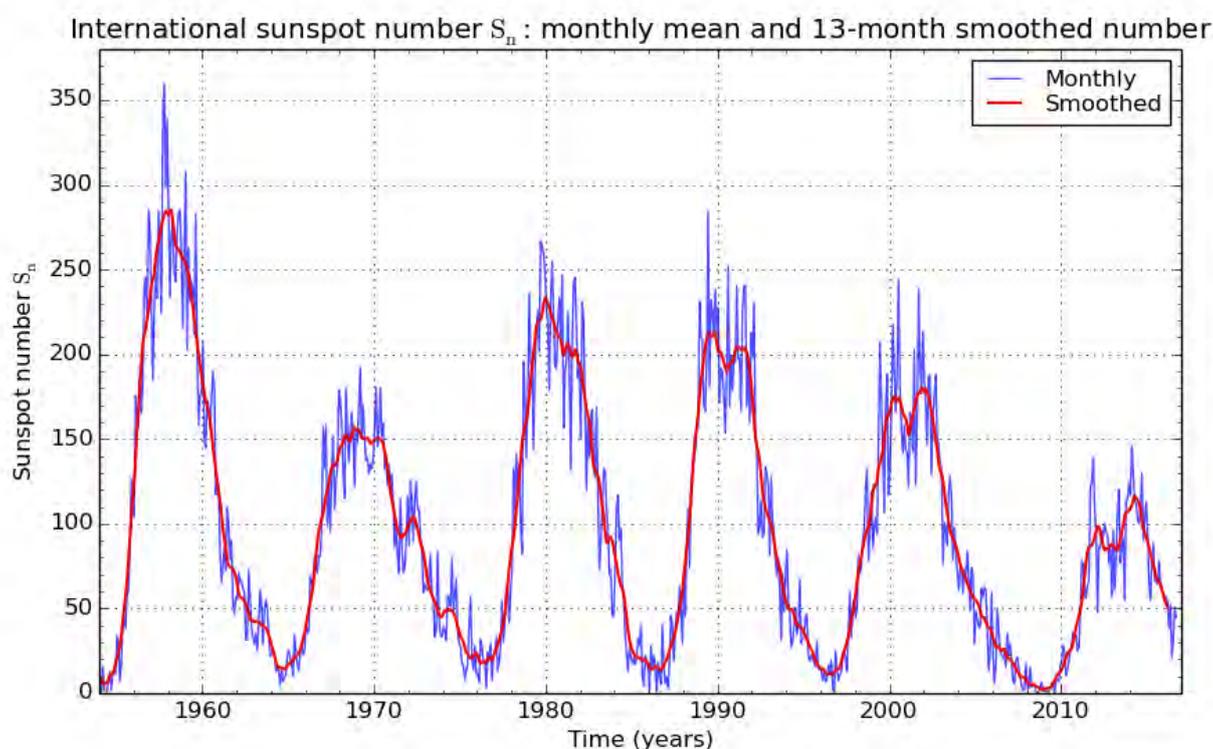
Les positivistes critiquent la falsifiabilité des sciences dans le cadre de la philosophie réaliste de Karl Popper en disant qu'on peut imaginer à l'infini des hypothèses ad hoc pour sauver les théories qui ne sont donc jamais falsifiables. L'histoire des sciences montre que cette opinion ne tient pas. Elle est un délire de philosophe déconnecté de la réalité de la pratique de la science. Karl Popper a raison.

Pour expliquer les anomalies persistantes de la précession du périhélie de Mercure, on imagina plusieurs hypothèses ad hoc successivement. Mais, contrairement au brillant succès pour Neptune, toutes échouèrent rapidement. On imagina comme dans le cas d'Uranus qu'une planète encore plus près du Soleil, appelée Vulcain perturbait Mercure. Mais on ne trouva pas Vulcain. Puis, on pensa que le fait que le Soleil n'est pas tout à fait sphérique mais aplati au pôle par sa rotation était l'explication. Cela fut contredit par les calculs. Il vint un moment où l'on n'eut plus d'idée. Cela jusqu'au triomphe de la Relativité générale pour expliquer cette anomalie. Insistons sur le fait que, contrairement à l'opinion des positivistes, la Relativité générale ne dit pas que la mécanique newtonienne est fautive. Bien au contraire, elle apporte une preuve supplémentaire du

fait que cette théorie est vraie dans son domaine de validité des masses pas trop proches de celle d'un trou noir, et de vitesses faibles devant celle de la lumière. Elle donne même la puissance 2 de la loi de décroissance avec la distance de la force de gravité directement à partir du principe d'équivalence, sans aucune nécessité d'hypothèse, là où Newton était obligé de mettre le 2 à la main sans explication. Le 2 de Newton est expliqué par la relativité générale !

V- OBSERVATION DU SYSTÈME SOLAIRE

1- Le Soleil. On peut observer le Soleil par projection avec un solarscope. Il est intéressant d'observer les taches dont le lent déplacement d'un jour à l'autre est lié à la rotation du Soleil sur lui-même en 25 jours à l'équateur et 35 jours aux pôles. Cette rotation différentielle est à l'origine de l'effet dynamo produisant le champ magnétique solaire. Les taches solaires sont des zones de fort champ magnétique comme le prouve le déplacement Zeeman des raies. La convection y est bloquée par freinage par courants de Foucault, ce qui explique qu'elles paraissent noires car elles sont moins chaudes que le milieu alentour. Pour bien les observer, il faut être proche d'un maximum solaire. Sur le site : <http://www.sidc.oma.be/html/wolfmms.html> on a l'évolution du nombre de taches solaires :



SILSO graphics (<http://sidc.be/silso>) Royal Observatory of Belgium 2016 October 1

2- Observation des planètes. Il est intéressant avec des enfants en classe, à l'école primaire, de voir en fonction de la position présente des planètes autour du Soleil, les planètes qui sont visibles ou non depuis la Terre à ce moment-là, et également à quel moment de la nuit elles sont le plus visibles. On trouve la position des planètes à : <http://bouteloup.pierre.free.fr/astro/planeta/planeta.html> ; Cliquer sur *Voir le ciel* , puis sur *Syst sol* ; nécessité d'avoir Flash Player sur l'ordinateur. Le Système solaire étant plan, les planètes sont alignées dans le ciel sur l'écliptique, qui est le plan de rotation de la Terre autour du Soleil. Les planètes se promènent donc approximativement dans les 12 constellations du Zodiaque astrologique, ce qui est à l'origine de l'astrologie. Le mot planète vient du latin planeta qui vient du grec planêtês qui veut dire errant, vagabond. On montre ci-dessous un alignement remarquable en avril 2002.



3- Les planètes ne scintillent pas. a) Effets de lumières au fond d'une piscine. Regardons une piscine dehors au soleil. Au fond de la piscine, on voit des taches et bandes très lumineuses se déplacer et se déformer. Ce phénomène général et qui correspond à tout ce qui suit est appelé en anglais speckle et donne des fluctuations d'intensité de la lumière. Cela mène à l'interférométrie d'intensité (Hanbury, Brown et Twiss).



Ce phénomène est causé par un effet de lentille des vagues à la surface de l'eau qui font converger les rayons lumineux du soleil vers certains endroits du fond de la piscine, tandis que d'autres endroits, en conséquence, sont moins éclairés. Ce phénomène est maximal si la distance focale des lentilles constituées par les vagues à la surface est égale à la profondeur de la piscine. À la limite, toute la lumière arrivant sur la lentille est concentrée en un point.

Lorsque le ciel est couvert, cet effet n'existe plus. Cela montre que la taille angulaire de la source lumineuse joue pour savoir si le phénomène est visible ou non. En effet, pour une source étendue, un point de la source éclaire la surface de l'eau de la piscine avec un angle différent d'un autre point de la source. Cela déplace la position de la tache lumineuse au fond de la piscine. Si l'écart angulaire de ces deux points est suffisant, une tache lumineuse provoquée par un des points sera au même endroit qu'une zone faiblement éclairée par l'autre point, et l'effet est annulé. Dès maintenant on a une explication du scintillement des étoiles et pas des planètes : un observateur au fond de la piscine verra la luminosité du soleil varier suivant qu'il se situe en un point du fond où il y a une tache lumineuse ou non. Pour lui, le soleil scintille. L'atmosphère se comporte comme l'eau de la piscine. Au niveau de la couche d'inversion qui se situe vers 1 kilomètre d'altitude et qui sépare l'air ayant subi un refroidissement nocturne de l'air plus au-dessus insensible aux variations de températures du sol, de la turbulence mélange l'air chaud au-dessus et l'air frais en dessous. Il se produit des zones voisines de températures très différentes, donc d'indices de réfractions différents, qui se comportent comme des petites lentilles faisant converger la lumière en certains points du sol, produisant un phénomène tout à fait analogue à celui au fond de la piscine. Il faut supposer maintenant que pour les étoiles, le phénomène se produit bien, tandis que les planètes ont un diamètre angulaire suffisamment grand pour que le phénomène disparaisse, deux points différents de la planète provoquant des taches lumineuses au sol suffisamment décalées pour s'annuler.

b) Ombres volantes. Peut-on réellement observer le phénomène analogue de celui de la piscine avec l'atmosphère? Si on ne l'observe pas habituellement, c'est que les échelles sont différentes. Les échelles des fluctuations de densité sont beaucoup plus petites que dans le cas de la piscine, ce qui fait que le soleil est trop gros et pour lui, les effets s'annulent. Lors d'une éclipse totale, juste avant la totalité, il reste un mince faisceau de lumière solaire passant à travers une vallée lunaire, où entre deux cratères. Cette fois-ci, la source lumineuse est suffisamment petite, et on a bien les mêmes effets qu'au fond de la piscine. Cela s'appelle les ombres volantes, en anglais : shadow bands. Le contraste est beaucoup plus faible que dans le cas de la

piscine, et si ces bandes sont faciles à voir, elles sont difficiles à prendre en photo ou en vidéo. Voici ci-dessous une photo :



On peut voir la trace sur les nuages de ces ombres dans les photos ci-dessous :





On observe que les bandes d'ombres sont parallèles à la tangente à la lune au niveau du dernier rayon de soleil qui passe. Le soleil a en effet une forme allongée dans cette direction avant de disparaître, ce qui donne la même forme aux ombres.

4- Quelques caractéristiques de l'observation des planètes. Avec une lunette astronomique, elles sont vues comme des disques, alors que les étoiles ne sont pas grossies et restent ponctuelles. La photographie ci-dessous, prise au télescope, montre comment on voit Saturne avec son anneau à travers une petite lunette astronomique. À l'œil nu, il est vu orangé et ne scintille pas.



La photographie ci-dessous, prise au télescope, montre Jupiter tel qu'on le voit avec des jumelles, accompagné de ses quatre satellites galiléens. En quelques minutes, on voit que les satellites se sont déplacés. Sur le site : <http://bouteloup.pierre.free.fr/astro.html> on voit où sont les satellites tels qu'ils sont vus directement avec une paire de jumelle. Il faut avant avoir été dans *sécurité java* pour déclarer ce site où il y a cette applet java comme site de confiance. Ce Système solaire en modèle réduit convainc Galilée de la réalité du modèle de Copernic, quand il fut le premier à observer Jupiter avec une lunette. Les satellites sont vus alignés, car ils sont eux-mêmes approximativement dans le plan de l'écliptique.

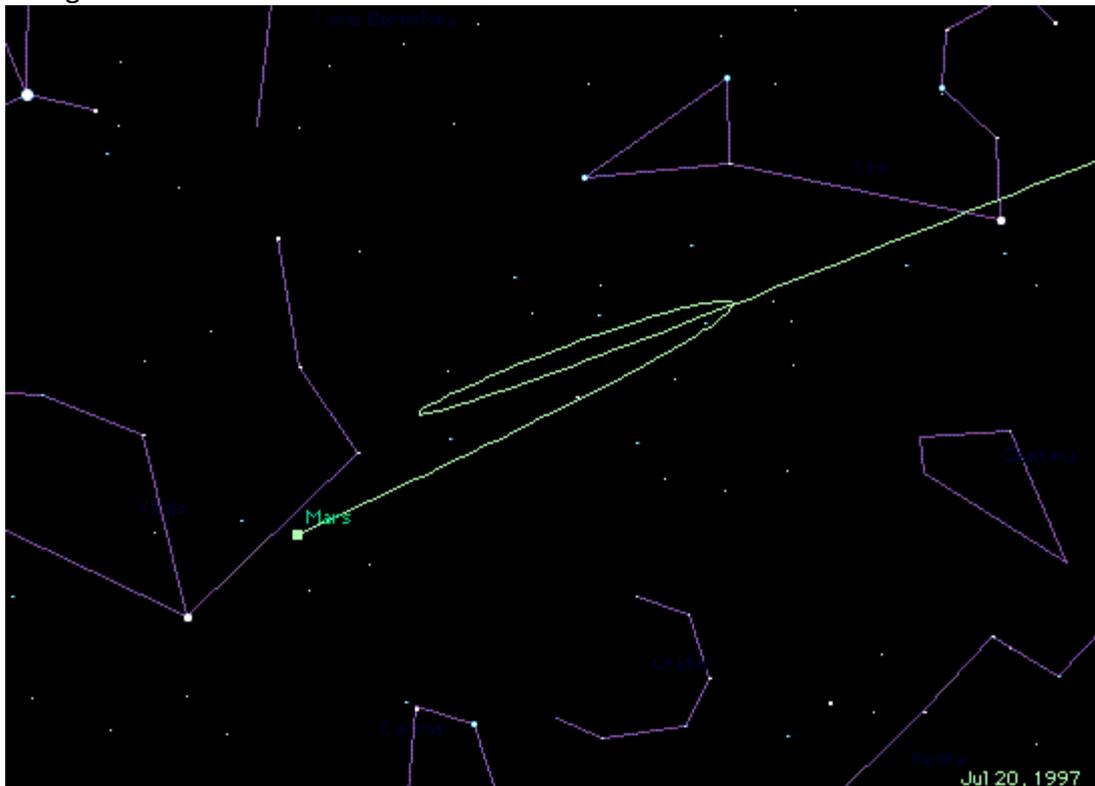


Jupiter faisant un tour du Zodiac astrologique en 12 ans, approximativement, change de constellation du Zodiac chaque année. S'il est une année dans le Verseau par exemple, il sera l'année suivante dans les Poissons.

Mercure et Vénus présentent des phases comme la Lune quand ils sont vus avec une lunette astronomique, ce qui est expliqué d'une manière évidente par le modèle héliocentrique de Copernic, ainsi que les variations très grandes de la taille apparente de Vénus, en liaison avec ses phases : elle est vue très grosse quand elle est en croissant très fin. Galilée, le premier homme devant ce spectacle, ne pouvait plus douter que les planètes tournent autour du Soleil. Vénus est l'astre le plus brillant du ciel en dehors du Soleil et de la Lune. Il peut donner une ombre.

Pour voir Mercure, ce qui est difficile, car il est toujours très près du Soleil, il faut choisir un jour où il est près d'un croissant de lune, de Jupiter ou de Vénus, et chercher à le trouver avec des jumelles. C'est très facile s'il est suffisamment près de l'autre astre pour qu'on puisse les voir en même temps tous les deux dans les jumelles.

Mars est rouge, à cause de l'oxyde de fer présent en grande quantité. Quand il est très près de la Terre, avec un télescope de 200 mm d'ouverture, on distingue des zones plus ou moins sombres, et on voit un pôle, blanc à cause de la glace et de la neige carbonique. Il est intéressant de suivre à cette occasion, sur plusieurs semaines, la rétrogradation de Mars sur le fond des étoiles.



Uranus et Neptune, sont des petits disques respectivement verts et bleus, vus avec un télescope de 200 mm d'ouverture. Ces couleurs sont très frappantes et impressionnantes. Ils sont invisibles à l'œil nu.

VI- MAQUETTE DU SYSTÈME SOLAIRE

1- Maquette avec deux échelles différentes. Pour bien visualiser les tailles différentes des planètes, il faut que cette taille soit appréciable, ce qui nécessite de prendre une échelle plus grande pour les tailles que pour les distances au Soleil. Les élèves vont à cette occasion faire de l'interdisciplinarité avec les mathématiques en manipulant les grands nombres. Ils peuvent découvrir la loi de proportionnalité en enlevant par exemple le même nombre de zéros à droite à tous les nombres. Ils peuvent aussi garder les mêmes chiffres, mais en disant que ce n'est plus des kilomètres mais des centimètres par exemple. Ils vont être amenés à se poser le problème de la mesure du diamètre d'une boule, soit en la traversant avec une tige, soit en mesurant avec une ficelle le périmètre. On peut aussi poser la boule entre deux livres parallèles avec les faces verticales.

Le mieux est d'acheter des boules de polystyrènes de tailles adéquats dans une papeterie pour les planètes géantes. Pour les planètes rocheuses, il vaut mieux prendre de la pâte à modeler. Les boules de polystyrènes seront peintes avec de la peinture à l'eau. Uranus sera vert et Neptune bleu. Pour la pâte à modeler, on prendra de la pâte à modeler rouge pour Mars, bleue pour la Terre, blanche pour Vénus, et noire pour Mercure.

2- Maquette avec une seule échelle. Cette maquette est intéressante à faire pour montrer l'immensité du Système solaire. Il faut disposer d'un terrain d'une centaine de mètres de longueur. Même avec une telle distance, Jupiter sera tout petit et sera fait avec une pâte à modeler orange. Pour les planètes telluriques, il y aura juste un écriteau avec leur nom de planter au bon endroit. On peut tracer un point sur cet écriteau, où y planter une épingle. Il y a encore une interdisciplinarité avec les mathématiques en faisant mesurer ces grandes longueurs par les enfants avec une chaîne d'arpenteur.

Si l'on place la direction Terre Soleil de la maquette dans la direction du soleil couchant, et si on se place au niveau de la Terre de la maquette, quand le soleil se couche, il doit avoir la même taille apparente que le soleil de la maquette. On voit très bien cela sur la vidéo du site :

http://www.sciencesetavenir.fr/espace/planetes/video-le-systeme-solaire-reconstitue-a-l-echelle-dans-le-desert_101657

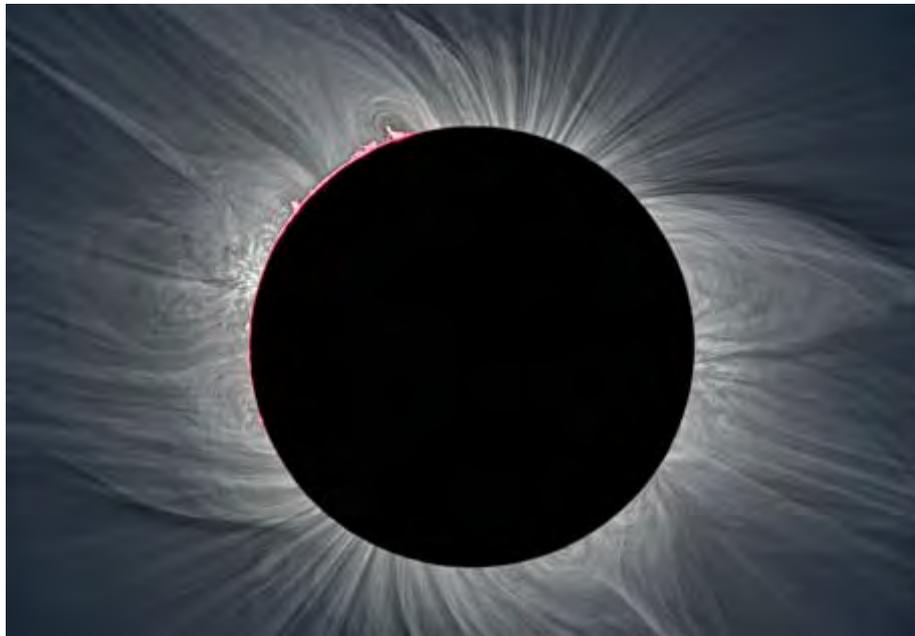


VII- EFFET DYNAMO DANS LE SOLEIL

1- Trajectoire d'une particule chargée dans un champ magnétique astrophysique. Une ligne du champ magnétique est une ligne où en tout point de cette ligne, le vecteur champ magnétique est parallèle à cette ligne. Pour un fluide en écoulement stationnaire, les lignes de champ du champ des vecteurs vitesses des particules sont les trajectoires des particules, ce qui en donne une vision intuitive.

Nous verrons au paragraphe VII 3 qu'en astrophysique, les particules chargées coulisent le long des lignes de champ magnétique. Une particule donnée reste toujours sur la même ligne de champ du champ magnétique.

Sur la photo ci-dessous, on voit le Soleil lors d'une éclipse totale. La couronne solaire est striée par les lignes du champ magnétique rendues visibles par ces particules qui coulisent le long et rayonnent en étant à haute température. On voit que le Soleil est un aimant présentant deux pôles (la polarité s'inverse tous les 11 ans), un pôle en haut légèrement à droite, et l'autre en bas légèrement à gauche. C'est aussi les lignes du champ magnétique terrestre qui donnent cet aspect fibreux aux aurores boréales.



2- L'effet dynamo. Il nous reste à expliquer d'où vient le champ magnétique des étoiles et du Soleil en particulier : ce champ magnétique provient de courants électriques créés par effet dynamo. Tel est également le cas pour le champ dipolaire de la Terre créé par des courants électriques dans le noyau de fer liquide.

L'ensemble du Soleil est animé d'un mouvement de rotation détectable par le mouvement des taches solaires (image ci-dessous).



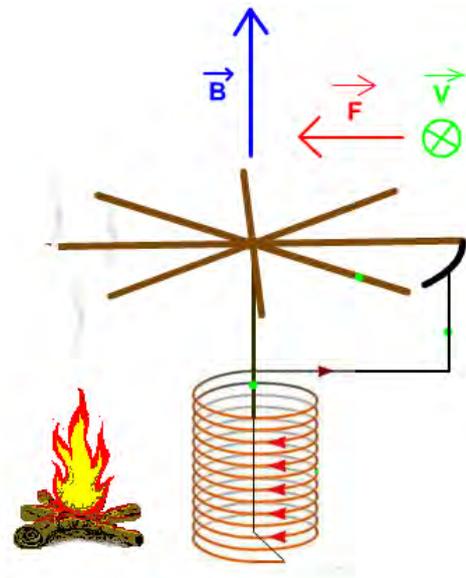
Ce mouvement entraîne, avec la force de Coriolis, des mouvements tourbillonnaires à l'intérieur du Soleil (c'est cette même force de Coriolis qui met en mouvement de rotation les cyclones). Le Soleil est constitué de deux couches. Une couche radiative, jusqu'à 0,713 rayon solaire, où l'énergie est transportée par les radiations, et au-dessus la couche convective où l'énergie est transportée par convection (brassage du gaz par l'ascendance des parties chaudes et la subsidence des parties froides). La partie radiative tourne en bloc comme un corps solide en 27 jours. La couche convective est animée d'une rotation différentielle. La rotation se fait en 30 jours vers le pôle, et en 25 jours près de l'équateur. Il n'y a pas d'explication définitive de cette rotation différentielle. Il y a donc une discontinuité de vitesse à l'interface des deux couches appelée tacholine.

L'image à droite modélise ces phénomènes.

Le feu fait tourner l'hélice grâce à l'air chaud qui monte par convection.

Les électrons sont soumis à une force centripète du fait de leur vitesse, emportés par la pale de l'hélice, et du champ magnétique.

Le courant créant le champ magnétique \vec{B} est ainsi entretenu.



Le contact entre le disque tournant et la partie fixe modélise la tacholine. La bobine du dessous modélise les courants électriques tourbillonnaires liés au plasma en rotation (analogie avec les cyclones). Les lignes de champ magnétique sont ainsi tordues en spirale et forment un solénoïde. Les charges électriques couissent le long de ces lignes comme dans un fil électrique. Une fluctuation très faible du courant électrique est amplifiée. Une fois le courant installé, la vitesse centripète des électrons dans un des rayons, et la présence du champ magnétique, impliquent la présence d'une force qui freine la rotation, ce qui est normal compte tenu de la conservation de l'énergie. On a un freinage par induction. L'énergie ainsi perdue se retrouve sous forme de chaleur dégagée dans la résistance électrique par les courants (résistance certes faible, mais les courants sont très intenses). On a un chauffage par induction.

C'est un tel freinage qui explique pourquoi les taches solaires sont sombres. Il s'agit de zones de fort champ magnétique. Le freinage par induction, très fort, bloque la convection et empêche les gaz plus profonds et chauds de remonter. Les taches sont donc des zones plus froides, c'est pourquoi elles sont moins lumineuses.

VIII- JETS DES ÉTOILES EN FORMATION OU OBJETS DE HERBIG ET HARO

1- Introduction. George Herbig et Guillermo Haro découvrirent à la fin des années 1940 des objets bizarres dans l'Univers. Ces objets dits de Herbig et Haro apparaissent comme des nébuleuses allongées aux raies spectrales originales dans les zones contenant des nuages noirs appelés globules de Bok où naissent les étoiles. On observe d'intenses lignes d'émission d'une longueur d'onde précise. Nous savons maintenant que ces objets sont des jets émis par les étoiles naissantes (protoétoiles). Ces étoiles émettent, suivant l'axe de rotation et des deux côtés, deux jets opposés qui s'étendent sur plusieurs dizaines d'années-lumière de distance. La vitesse des particules y est d'environ 300 kilomètres par seconde.

La photographie ci-dessous obtenue par le télescope spatial en infrarouge Spitzer montre l'objet Herbig-Haro 49/50 dans la région Chamaeleon I de formation d'étoiles. C'est une région qui contient plus de 100 jeunes étoiles. On voit le jet qui se propulse à travers les nuages interstellaires de gaz et de poussières, de haut en bas. L'apparence en hélice est due à l'enroulement des lignes de champ magnétique confinant le jet. Adresse internet : <http://www.spitzer.caltech.edu/images/2309-sig06-002a-Spitzer-Infrared-View-of-Herbig-Haro-49-50-A-Cosmic-Tornado> .



2- Le problème du moment cinétique. Quand une patineuse tourne sur elle-même, bras et jambes écartés et resserre ensuite ses bras et ses jambes le long de son corps, sa rotation sur elle-même augmente énormément par conservation du moment cinétique. Le moment cinétique d'un objet de masse m à la distance r d'un centre O autour duquel il tourne est $m r^2 \omega$. ω est la vitesse angulaire de rotation. Il se conserve si l'objet n'est soumis qu'à une force centrale donc qui passe par O . Pour un objet isolé dans l'espace, son moment cinétique défini comme la somme de celui de l'ensemble de ses points matériels, par rapport à son centre de gravité, se conserve. Si la distance des objets à l'axe diminue, la vitesse angulaire doit donc augmenter. Or, la force centrifuge est proportionnelle au carré de cette vitesse angulaire. Donc la force centrifuge augmente. Lorsqu'un disque de poussière se concentre par effondrement gravitationnel, il vient

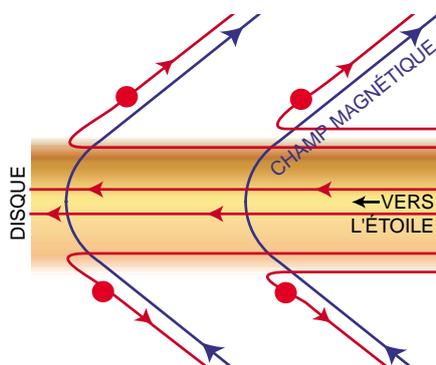
donc un moment où la force centrifuge qui éjecte la matière est plus forte que la gravitation, et l'effondrement cesse. À l'endroit où ces deux forces deviennent égales, on dit qu'on a atteint la vitesse de rotation képlérienne. Les étoiles ne pourraient donc pas se former. La solution à ce paradoxe est qu'un processus évacue le moment cinétique en trop. Ce processus est l'émission de jets de matière parallèlement à l'axe de rotation et depuis chacun des deux pôles de l'étoile en formation. Ces jets évacuent de la matière possédant un très fort moment cinétique et évacuent ainsi le moment cinétique en trop.

3- La magnétohydrodynamique (MHD). Elle étudie le comportement d'un fluide conducteur de l'électricité, c'est-à-dire d'un liquide conducteur, comme le mercure, ou d'un gaz conducteur de l'électricité, donc d'un plasma, en présence d'un champ électromagnétique. Le plasma est neutre. Le champ électrique n'intervient donc pas. Il y a un seul fluide, c'est-à-dire qu'il y a un mouvement d'ensemble des particules qui ne dépend pas de leur charge, en dehors du courant électrique. Les lignes de champ du champ magnétique prennent une importance fondamentale grâce au théorème d'Alfvén : Le théorème d'Alfvén affirme que les lignes de champ sont emportées par le mouvement du fluide, comme une ficelle parfaitement élastique. C'est-à-dire, qu'un point du fluide qui se balade continue toujours à appartenir à la même ligne de champ du champ magnétique. Il coulisse le long de la ligne de champ magnétique. Les lignes de champ peuvent tout de même diffuser par rapport au plasma dans les zones de turbulence. L'énergie y cascade vers les petites échelles jusqu'à être dissipée en chaleur par la viscosité.

Autrement dit, les lignes de champ et le plasma sont donc accrochés l'une à l'autre, chacun des deux pouvant agir mécaniquement sur l'autre et donc lui appliquer une force, et réciproquement d'après le principe de l'action et de la réaction de Newton. Le plasma emporte la ligne de champ, mais la ligne de champ possède une raideur chaque portion de la ligne est soumise à une force dirigée vers son centre de courbure et tendant donc à ramener la ligne à une forme rectiligne. Cette force s'applique sur le plasma. Cette force, ainsi appliquée au plasma, peut être interprétée comme la force appliquée par le champ magnétique sur la densité volumique de courant dans le plasma.

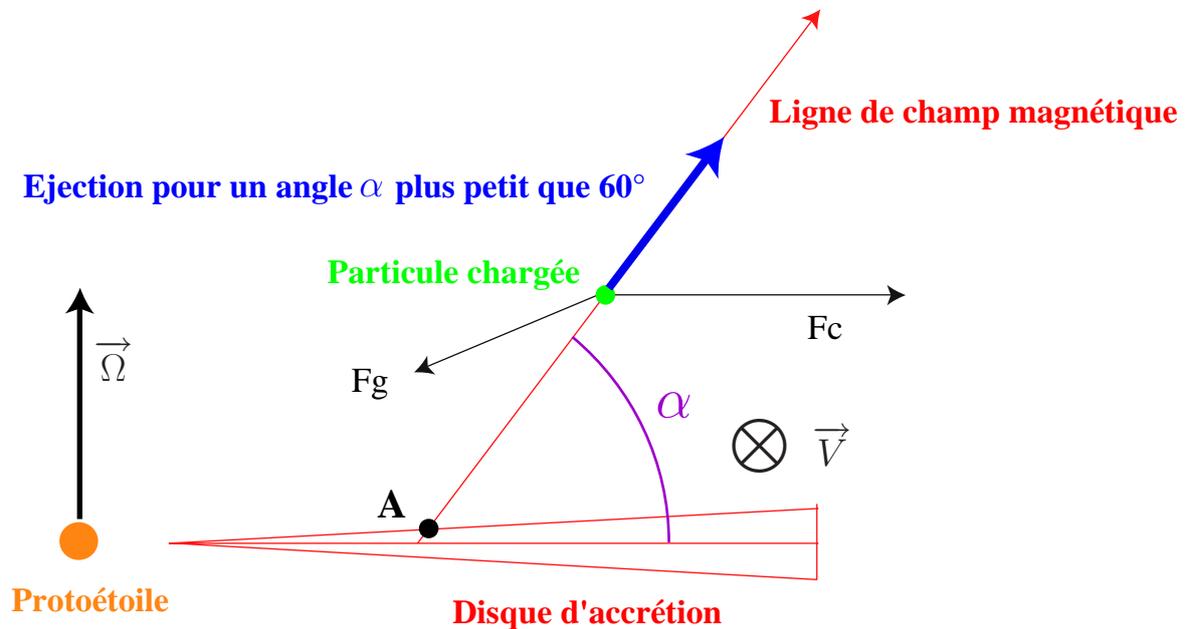
Lorsque l'énergie magnétique est supérieure à l'énergie cinétique des particules, c'est la rigidité de la ligne de champ qui l'emporte. Dans le cas contraire, la ligne de champ est emportée par le plasma sans réagir comme une ficelle sans raideur et parfaitement élastique.

4- La courbure des lignes de champ. Les nuages moléculaires qui s'effondrent sont suffisamment ionisés par les rayons cosmiques pour être considérés comme un plasma obéissant à la magnétohydrodynamique. Plus près de l'étoile, le nuage est encore plus ionisé par les rayons X émis par cette protoétoile. Prenons une ligne de champ parallèle à l'axe des pôles du disque en rotation, correspondant au champ magnétique créé par l'effet dynamo. L'accrétion se faisant principalement dans le plan équatorial, la partie de cette ligne de champ proche de l'équateur est emportée vers l'axe de rotation, tandis que les parties au-dessus ou au-dessous ne le sont pas, ou le sont moins. Il en résulte une courbure des lignes de champ magnétique comme indiqué sur la figure ci-dessous. La ligne de champ toutefois ne suit pas totalement le plasma à cet endroit à cause de la dissipation par viscosité turbulente.



Le gaz dans le plan équatorial est chaud, par la transformation d'énergie gravitationnelle en chaleur, mais aussi par reconnection des lignes de champ magnétique. Il en résulte une forte pression qui pousse les particules chargées au-dessus ou en dessous. Ces particules sont obligées de coulisser le long des lignes de champ magnétique.

5- Le mécanisme d'éjection : l'entraînement magnétocentrifuge. Considérons la figure ci-dessous :



Le point A est ancré dans le disque d'accrétion. Il a donc la vitesse képlérienne, c'est-à-dire qu'en ce point, la force centrifuge compense exactement la force de gravitation. Le point A doit d'après ce qui a été vu ci-dessus toujours appartenir à la même ligne de champ. La ligne de champ qui passe par A est donc ancrée en A et est emportée par la rotation du disque. À cet endroit, l'énergie magnétique est supérieure à l'énergie cinétique du plasma. Il en résulte une rigidité de la ligne de champ qui la maintient droite. Elle tourne donc en bloc avec une forme de ligne droite. On sait que plus on est loin d'une étoile, plus la vitesse angulaire de satellisation diminue. Or pour la particule obligée de coulisser sur la ligne de champ magnétique, on voit que sa vitesse angulaire est bloquée toujours à la même valeur. La particule est en équilibre de satellisation en A avec une vitesse képlérienne. Si la ligne de champ était horizontale sur la figure (parallèle au plan équatorial), on voit que plus loin de l'astre que A, la force centrifuge l'emporte et la particule est éjectée en coulisant le long de la ligne de champ magnétique. L'équilibre entre force d'attraction gravitationnelle et force centrifuge en A est donc instable.

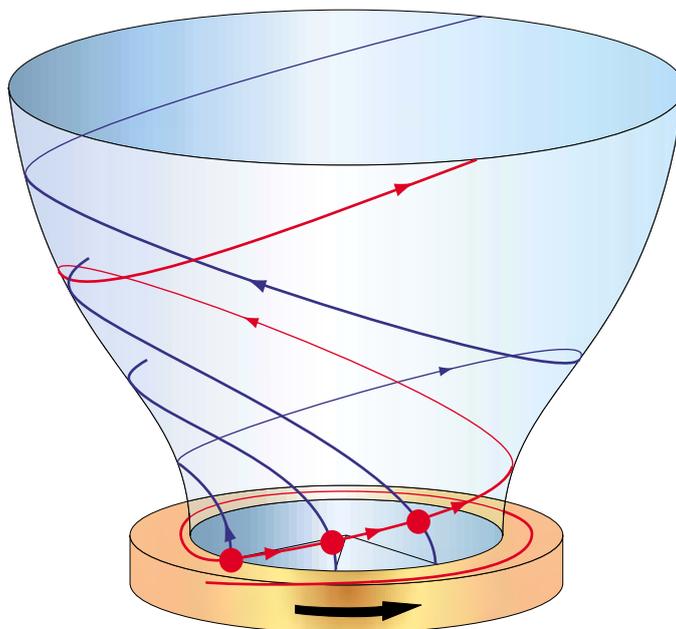
Par contre, si la ligne de champ est verticale (parallèle à l'axe des pôles), la force centrifuge n'agit plus, puisqu'elle a un effet perpendiculaire à la ligne de champ, donc l'équilibre est stable. On peut montrer que l'angle critique est de 60° par rapport au plan équatorial. Si les lignes de champ sont inclinées de moins de 60° sur le plan équatorial, les particules accrochées sur ces lignes de champ et mises là par la pression du gaz sont éjectées. La ligne de champ accrochée au plasma augmente énormément leur moment cinétique, puisque pour une telle particule, r augmente à ω constant. Par réaction, le moment cinétique de la ligne de champ est diminué, et cette diminution est communiquée au plasma qui est accroché à la ligne de champ. C'est comme cela que le moment cinétique en excès est évacué. Notons que cette accélération des particules du plasma correspond du point de vue énergétique en la conversion du flux du vecteur de Poynting en énergie cinétique.

6- Accélération des particules du jet. Juste au-dessus du disque, l'énergie magnétique est supérieure à l'énergie cinétique du plasma. La rigidité des lignes de champ l'emporte. Le champ magnétique impose donc

sa loi au plasma et on a le mécanisme d'éjection du paragraphe précédent. Mais plus loin, le plasma éjecté a acquis suffisamment d'énergie cinétique pour imposer sa loi au champ magnétique. Ce sont alors les lignes de champ magnétique qui sont emportées sans réagir par le plasma. La distance où a lieu la transition est appelée le rayon d'Alfvén. Au-delà de cette distance, l'énergie cinétique du plasma est supérieure à l'énergie magnétique. Par conservation du moment cinétique, le plasma éjecté au-delà de cette distance, qui s'est éloigné de l'axe de rotation, a une vitesse angulaire plus faible que le disque. Les lignes de champ magnétique accrochées au disque, sont donc forcées de s'enrouler en hélice en tournant dans le sens négatif.

Le champ résiste à cette torsion et freine la rotation du disque, donc de l'étoile en formation. En effet, les lignes de champ magnétique agissent sur le plasma qui les transporte pour redevenir le plus possible rectiligne, comme une tige métallique élastique rigide, rectiligne au repos, et tordue applique une force pour redevenir rectiligne. Les lignes de champ ont une rigidité, elles cherchent à redevenir rectilignes en s'opposant au mécanisme qui les a tordues.

Les lignes de champ en spirale, ancrées dans le disque, tournent plus vite sur elle-même que la matière éjectée qui a perdu de la vitesse angulaire en s'éloignant de l'axe. Une particule chargée donnée étant forcée de coulisser le long d'une ligne de champ, tout en tournant moins vite qu'elle, est ainsi accélérée vers le haut par cet effet de vis sans fin. C'est là le mécanisme d'accélération des particules dans le jet.



7- Courant électrique dans le jet. L'enroulement en hélice du champ magnétique vu au paragraphe 6 correspond à un champ magnétique toroïdal, c'est-à-dire orthoradial. Il est algébriquement négatif, car il s'enroule au-dessus de l'étoile dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Compte tenu des équations de Maxwell, il doit correspondre à ce champ un courant parallèle à l'axe de rotation et rentrant. Ce courant dans le champ précédent, soumet le plasma à une force centripète confinant le plasma et assurant la collimation du jet. Le jet est donc un pinceau très concentré sur de très grandes distances par rapport à la dimension du disque protostellaire. Remarquons que cette force centripète dirigée vers le centre de courbure de la ligne de champ correspond bien à une raideur tendant à faire retourner la ligne de champ à une configuration rectiligne. On peut donc donner une image en termes d'action des lignes de champ magnétique sur le plasma, de cette force centripète. Les lignes ainsi tordues ont tendance à serrer le plasma comme un boa constricteur. Les lignes de champ magnétique possèdent en effet également une tension et tirent le plasma comme un élastique tendu.

L'enroulement en hélice des lignes de champ a donc le triple effet d'accélérer le jet, de le collimater en un pinceau très fin, et de ralentir la rotation du disque d'accrétion, donc de contribuer à la perte de moment cinétique nécessaire pour que le disque en s'effondrant puisse donner naissance à l'étoile.

En effet, la rotation dans le sens positif du disque conducteur dans le champ magnétique poloïdal vers le haut provoque par induction un courant centrifuge sur tout le disque. Le courant se boucle donc bien ainsi.

Ce courant centrifuge dans le disque, immergé dans le champ magnétique poloïdal vers le haut soumet le plasma à une force orthoradiale négative ralentissant la rotation du disque, donc lui faisant perdre du moment cinétique. Mais ce ralentissement décrit ici est, dit d'une manière différente, exactement celui décrit au paragraphe précédent en disant que le champ résiste à la torsion et freine la rotation du disque. Idem pour la réaction sur la ligne de champ à la fin du paragraphe 5.

