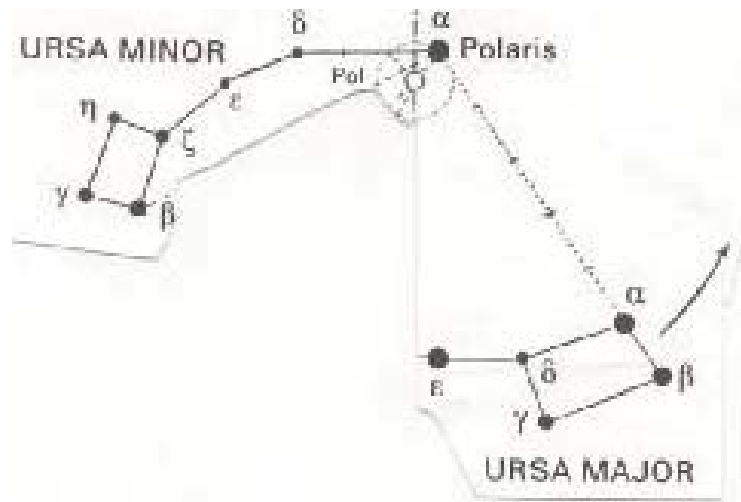


# Histoire de l'Astronomie

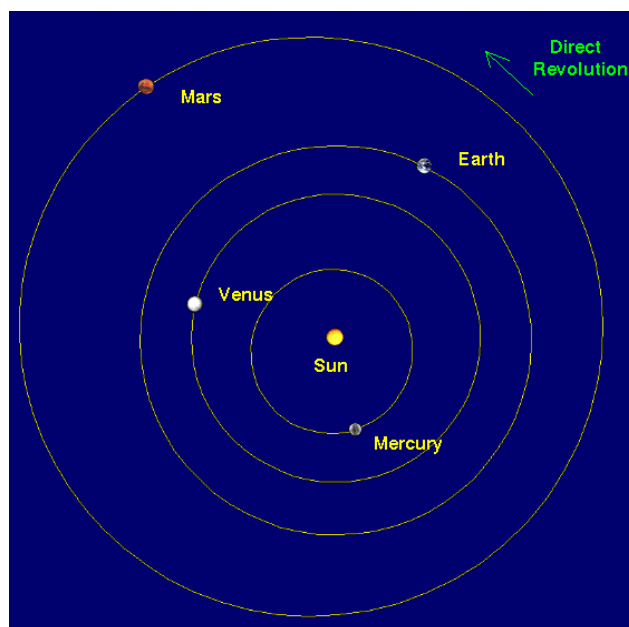
- Pourquoi les aiguilles d'une montre tournent-elles 'dans le sens des aiguilles d'une montre' ?



- Pourquoi le sens trigonométrique est-il différent du sens des aiguilles d'une montre ?



- Et aussi... (mais c'est venu beaucoup plus tard)



## **Importance de l'astronomie dans la naissance des civilisations**

L'astronome est celui qui, en observant le ciel, peut prédire le meilleur moment pour les labours et les semailles, les moissons.

Surtout les semailles, d'où l'importance de l'équinoxe de printemps.

Il devient le maître du calendrier, et à force d'observer le ciel, il devient un peu météorologue.

Avec la découverte des mathématiques, il peut prédire les éclipses, ce qui peut donner un avantage stratégique dans les guerres.

Naissance de l'alliance du sabre et du goupillon.

## **Bases astronomiques**

4550 BC : Le point vernal (Noeud ascendant) passe des Gémeaux au Taureau

Quelques unes des premières divinités sont associées au taureau (Mithra, Baal, les vaches sacrées, le veau d'or, etc..)

Le pôle Nord céleste est dans la constellation du Dragon, entre Edasich et Alkaid (Grande Ourse)

2800 BC : Le pôle Nord passe à 6' de Thuban (Dragon, à 309 années lumière)

1870 BC : Le point vernal passe du Taureau au Bélier

Moïse détruit le veau d'or et impose l'agneau pascal.

Le pôle Nord est toujours dans la constellation du Dragon, dans un triangle formé par Thuban, Kappa Draconis et Kochab (petite Ourse).

1795 BC : Le pôle nord céleste entre dans la Petite Ourse, mais reste proche de Thuban.

476 BC : Le pôle nord céleste entre dans la Girafe, il est à 7° de Kochab (petite ourse).

50 BC : Le point vernal passe du Bélier au Poisson

Le Christ prend pour symbole le poisson (IXΘΥΣ - Iesos Christos Theou Uion Sauter).

1240 AD : Le pôle nord céleste revient dans la petite ourse, à 5° de ce qui devient l'étoile polaire que nous connaissons.

### **Dans le futur :**

2017 AD : L'étoile polaire est au plus près (40') du pôle nord.

2240 AD : Le pôle Nord céleste quitte la petite Ourse et passe dans Céphée, mais reste proche de notre étoile polaire.

2590 AD : Le point vernal passe du Poisson au Verseau

3200 AD : La nouvelle « étoile polaire » est Er Rai ou Alrai (gamma Cephei) et se trouve moins de 2° du pôle Nord céleste vers 4145 AD.

7500 AD : Alderamin (alpha Cephei) est à moins de 2° du pôle Nord.

9100 AD : Le pôle Nord entre dans le cygne, et se rapproche de Deneb.

13500 AD : Le pôle Nord se rapproche de Véga, dans la Lyre.

## **les Sumériens, Babylone, Les Assyriens, les Chaldéens**

### **L'année et les mois :**

2700 ans av. J.-C. les Sumériens utilisaient un découpage de l'année en 12 mois de 30 jours. Ils inventent l'écriture (pictographique puis cunéiforme) et les mathématiques. Ils connaissent la planète Mercure « *Ubu-idim-gud-ud* »

Le calendrier Assyrien, pas très bien connu semble avoir toujours utilisé une année de 12 mois de 30 jours (360 jours) avec des mois intercalaires pour compenser la dérive par rapport à l'année solaire. Le système d'intercalation est encore moins connu. Le plus ancien calendrier assyrien date du XIX<sup>ème</sup> siècle av. J.-C. Il a disparu vers 1100 av. J.-C. au profit du calendrier luni-solaire de Babylone.

Ce n'est qu'à partir du 21<sup>ème</sup> siècle av. J.-C. qu'on peut véritablement parler de l'existence d'un calendrier **Luni-Solaire** dans lequel les mois étaient lunaires et les années solaires.

C'est sous le règne de Nabonossar (747-734 av. J.-C.) qu'apparurent les premiers "Ephémérides astronomiques" consignés de manière régulière. Ces observations, facilitées par un climat particulièrement propice, allaient au delà de l'étude de la Lune et du Soleil. Elles concernaient aussi les planètes et les étoiles.

Vers 450 av. J.-C. un excellent calendrier luni-solaire est mis en place pour l'ensemble du royaume sur la base d'un cycle de 19 années solaires contenant 235 mois lunaires; parmi les 19 années, 7 avaient un treizième mois; les règles d'intercalation étaient définies et fixes; le résultat est excellent : en moyenne l'année avait 365,2469 jours soit un décalage avec le Soleil de 1 jour en 300 ans.

**La numérotation sexagésimale** : Selon Georges IFRAH (Histoire universelle des chiffres), "les Sumériens avaient opté pour la base 60, groupant ainsi les êtres et les choses par soixantaines et puissances de soixante".

Cette base 60, que les Sumériens furent les seuls à inventer de par le monde cohabitait chez les chaldéo-assyriens avec une numérotation décimale d'origine Akkadienne.

Le système sexagésimal trouvait son origine dans deux cultures antérieures aux sumériens et qui utilisaient respectivement des systèmes quinaire (base 5) et duodécimal (base 12).

Les Chaldéens divisèrent ainsi l'heure en soixante minutes et la minute en soixante secondes.

Il divisèrent le jour en 12 heures "doubles" appelées *kaspu* mais aussi en "soixantièmes".

Ces bases 60 et 12 sont encore très usitées de nos jours (division du cercle, de l'heure, des cadrans des montres. C'est grâce aux chaldéens que nous achetons nos œufs, nos escargots ou nos huîtres par douzaine).

Les Chaldéens, enfin, dressèrent une carte du Zodiaque divisée en... douze signes.

### **Le début de l'année :**

Avant le II<sup>ème</sup> millénaire, certaines cités avaient opté pour un début de l'année à l'équinoxe d'automne. Au II<sup>ème</sup> millénaire, le début de l'année fut fixé au lever héliaque de l'étoile *Hounga* (alpha du Bélier) soit à l'équinoxe du printemps. Le nouvel an babylonien fut donc le premier *Nisanu*.

## **Thalès de Milet 624-546 BC.**

Il s'embarqua un jour vers Naucratis (Égypte actuelle), ville reconnue pour sa culture scientifique. Il y étudia les mathématiques, particulièrement la géométrie où il fit déjà quelques découvertes.

Il mesura les pyramides d'Égypte en calculant le rapport entre leur ombre et celle de notre corps.

Il pouvait aussi déterminer la distance d'un navire à la côte par triangulation.

Les historiens lui attribuent cinq théorèmes de géométrie élémentaire :

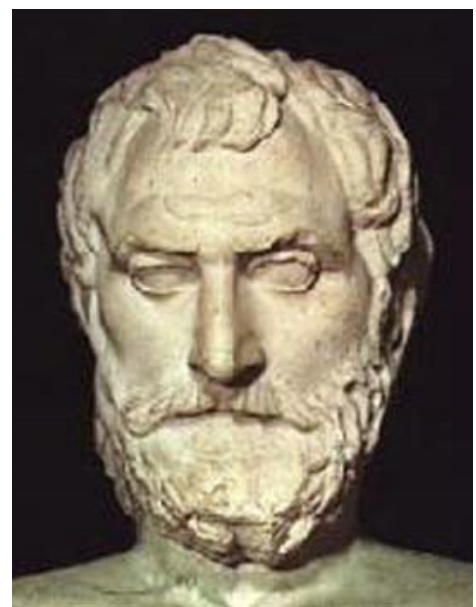
Un cercle est partagé en deux parties égales par tout diamètre.

Les angles à la base d'un triangle isocèle sont égaux.

Les angles opposés par le sommet sont égaux.

Deux triangles sont égaux s'ils ont deux angles et le côté compris égaux.

Un angle inscrit dans un demi-cercle est droit.



Son intérêt pour l'astronomie le poussa à faire de nombreuses observations sur les constellations. Il aurait été le premier des Grecs à noter le voyage du soleil entre les deux Tropiques. Il établit aussi que certaines étoiles n'étaient pas fixes par rapport aux autres et il les baptisa «planètes», ce qui signifie corps errant. On dit même qu'il parvint à en répertorier les éphémérides. Il fut aussi le premier des Grecs à constater que l'année ne comptait pas 365 jours, mais 365 et un quart. On rapporte qu'il prédit l'éclipse de soleil de 585 av. J.-C. Il donna les bases à ses successeurs pour la mesure des latitudes. Thalès croyait déjà à la rotation de la Terre autour du Soleil (dans le plan qui fut appelé l'écliptique) et à la rotation de la Terre sur elle-même.

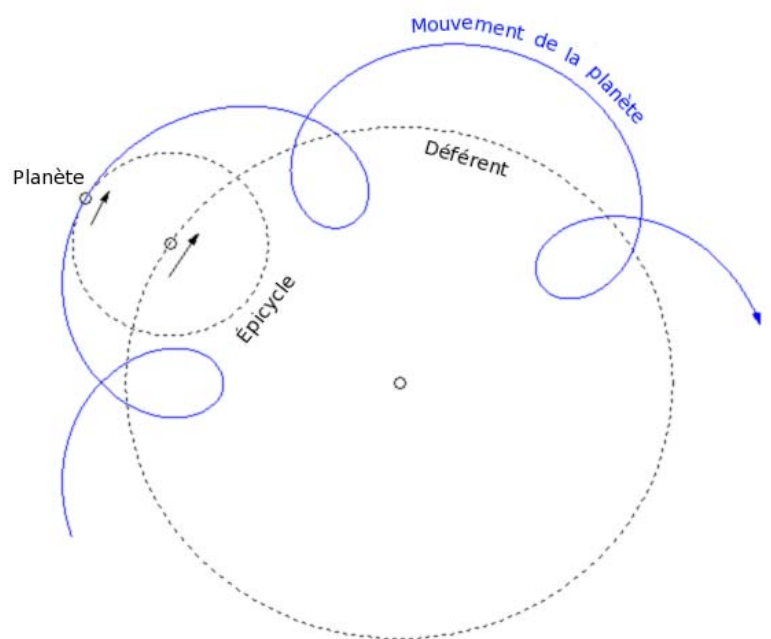
## **Aristote 384 - 322 BC**

Il prône l'observation systématique des faits avant toute réflexion.

Dans le modèle **géocentrique** d'Aristote, **la Terre est ronde**. L'Univers, alors fini dans l'espace, se divise en deux parties : le monde infralunaire et supralunaire. Le premier concernant tout ce qui est situé sous l'orbite de la Lune.

Les planètes semblaient, par moments, revenir en arrière quelque temps par rapport aux étoiles avant de reprendre leur course dans le sens « normal », c'est la rétrogradation.

Pour y répondre, tout en respectant le caractère parfait du cercle, Aristote imagina tout un système de sphères dont certaines ne sont là que pour faire tourner d'autres sphères qui, elles, porteront peut-être un astre. Voilà pourquoi il faut 55 sphères pour seulement six planètes (Mercure, Vénus, La Terre, Mars, Jupiter, Saturne). (Uranus n'a été découverte qu'en 1781).



Les planètes tournent donc sur des roues appelées épicycles, ceux-ci tournant eux même sur une autre roue — appelée déférent — dont le centre est la Terre.

La rotation simultanée des deux permettait d'obtenir un mouvement rétrograde et d'expliquer celui des planètes, et ce rien qu'avec le cercle.

## **Aristarque de Samos 310–230 BC**

Astronome et mathématicien grec, Aristarque de Samos, manipule bien ce que nous appelons aujourd'hui la trigonométrie. Il est l'inventeur le plus connu de l'**héliocentrisme**.

Ne disposant pas des instruments d'optique qui n'apparaîtront que 20 siècles plus tard, il mesure la durée d'une éclipse, en déduit la distance terre Lune et se trompe d'un facteur 4.

Il déduit également la distance Terre Soleil et se trompe d'un facteur 20 (en gros, 4 au carré). Il évalue également la masse du soleil, et se trompe d'un facteur 400 (20 au carré).

<http://www.phy6.org/stargaze/Farist.htm>

Ayant évalué la masse du soleil, il émet l'hypothèse que, puisque la masse de celui-ci est beaucoup plus importante que celle de la Terre, c'est autour de lui que doivent tourner les autres planètes.

Conscient qu'une telle théorie devrait faire apparaître une parallaxe dans l'observation des étoiles, il place alors la sphère des étoiles fixes à une très grande distance du Soleil.

Cette parallaxe est aujourd'hui mesurable, et confirme la justesse de son raisonnement

## **Ératosthène 276 - 194 BC**

Il dirigea la bibliothèque d'Alexandrie et a inventé le crible d'Ératosthène pour déterminer les nombres premiers.

En tant qu'astronome, il mit au point des tables d'éclipses et un catalogue astronomique de 675 étoiles. En tant que géographe, il confirme l'hypothèse d'une Terre sphérique (ce qui, pour les marins de l'époque était quasiment une évidence).

Il évalua le périmètre de la Terre en stades. Il ne se trompa que d'un centième. Il utilisa le fait que l'ombre portée d'un bâton à midi faisait  $7^{\circ} 10'$  le jour du solstice à Alexandrie alors qu'elle était nulle (le Soleil était au zénith) 800 kilomètres plus au sud à Syène (Assouan) sur le tropique du Cancer. Il démontra l'inclinaison de l'écliptique sur l'équateur; Il laissa une carte générale qui fut longtemps l'unique base de la géographie : il y donnait à l'arc du méridien compris entre les deux tropiques  $47^{\circ} 42'$  ; vingt siècles après lui, l'Académie des sciences de Paris retrouvait à très peu près la même mesure ( $47^{\circ} 40'$ ).

## **Hipparque 190 – 120 BC**

Hipparque est le fondateur de la trigonométrie et emprunta aux Babyloniens le partage du cercle en trois cent soixante parties, habitude qui survit de nos jours. Il fut aussi le premier à compiler une table trigonométrique ; ce qui lui permit de résoudre tous les triangles. Avec ses théories lunaires et solaires et ses tables trigonométriques, il fut probablement le premier à développer une méthode fiable pour prédire les éclipses solaires.

Parmi ses autres réalisations, on peut citer la découverte de la précession, la compilation du premier catalogue d'étoiles (enfin, le deuxième, après Aristarque) et probablement l'invention de l'astrolabe. C'est à lui que revient la classification des étoiles en différentes classes de 'magnitude', avec pour origine Véga (magnitude zéro).

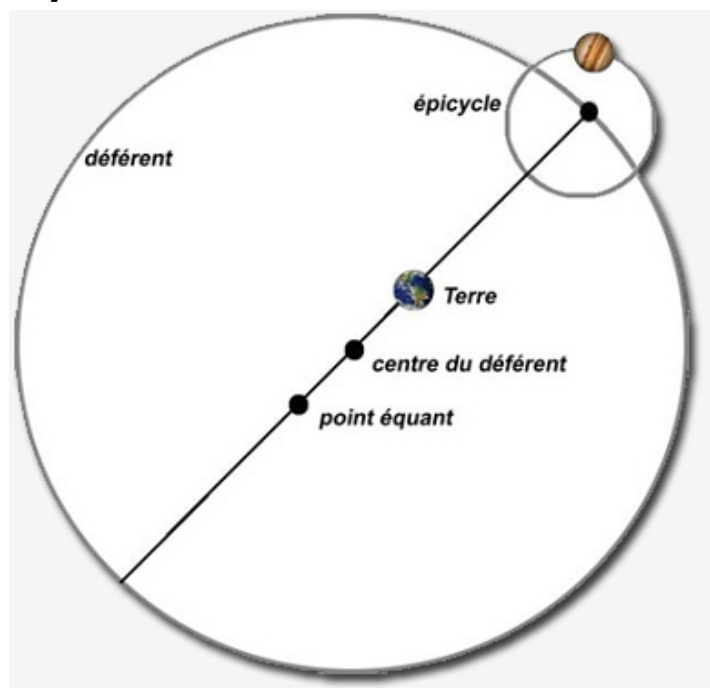
## **Premier incendie de la bibliothèque d'Alexandrie - 47 BC**

Le plus grand crime contre la science fut commis par César, qui mit le feu à sa flotte. 700.000 volumes ou rouleaux brûlés en quelques heures.

Une grande part des observations des Babyloniens et des astronomes sus cités sont détruites.

## **Claude Ptolémée 100 – 170 AD**

Son ouvrage capital, la Syntaxe mathématique (vulgairement l'Almageste) en treize livres, est la somme de l'astronomie ancienne, et a joui d'une autorité absolue chez les anciens, depuis son apparition, semble-t-il, chez les Byzantins, les Arabes et dans l'Occident latin jusqu'au temps de Copernic.



Les huit livres de sa Géographie (écrite après l'Almageste) forment une oeuvre dont l'importance actuelle, au point de vue historique, reste également considérable.

Du fait de la disparition des documents de la bibliothèque d'Alexandrie, il se base presque exclusivement sur ses observations personnelles et ce qui subsiste des travaux d'Hipparque. Il 'perfectionne' la théorie des épicycles d'Aristote et multiplie les 'sphères' pour faire coller son modèle avec ses observations et celles d'Hipparque.

Il lui manque évidemment de savoir apprécier les facteurs d'erreur et il n'est que trop porté à abuser du calcul en partant d'observations trop incertaines, faites avec des instruments peu précis.

A cause de son influence, le géocentrisme deviendra doctrine d'Eglise et perdurera pendant 14 siècles.



La carte du monde antique selon Ptolémée

## **Christophe Colomb découvre l'Amérique 1492**

Désormais, la terre est ronde sans contestation possible de la part de l'Inquisition.

## **Nicolas Copernic 1473 - 1543**

Astronome polonais. Il redécouvre l'héliocentrisme.

Mais il suppose encore que le cercle représente le mouvement parfait. Il réutilise donc les déférents de Ptolémée.

Il explique de façon beaucoup plus conforme aux observations le mouvement rétrograde des planètes externes, (Mars, Jupiter, Saturne). Sa théorie prend également en compte les planètes internes, Vénus et Mercure, qui sont situées plus près du Soleil que la Terre.

Copernic avance aussi une théorie sur l'ordre des planètes, leurs distances et, par conséquent, la période de leur révolution (prélude à la 3<sup>e</sup> loi de Képler). Copernic entre en contradiction complète avec Ptolémée en affirmant que plus l'orbite d'une planète est grande, plus il lui faudra de temps pour faire une révolution complète autour du Soleil.

En 1616, la Sainte Inquisition déclare la thèse de Copernic incompatible avec les Saintes Écritures

## **Galilée (1564–1642)**

Encore étudiant, il découvre la loi de l'isochronisme des pendules, première étape de ce qui sera la découverte d'une nouvelle science : la mécanique.

En 1593, il écrit des traités sur les trajectoires des projectiles de l'artillerie.

En 1597, il améliore et fabrique un compas règle à calcul, le compas géométrique et militaire, qui connaît un grand succès commercial.

En 1609, il construit la première lunette, qui grossit 6 fois sans déformer les objets observés !

A l'aide de sa lunette, il découvre l'existence de montagnes sur la lune.

### **Le 7 janvier 1610, Galilée découvre les 4 satellites 'galiléens' de Jupiter !**

C'est un triomphe. Même l'Eglise confirme la validité de ses observations.

Cependant, l'autorité doctrinale de l'Eglise et la thèse aristotélicienne du géocentrisme, soutenue par l'Eglise depuis Thomas d'Aquin, sont mises à mal.

Le cardinal Bellarmin, qui a fait brûler Giordano Bruno, ordonne qu'une enquête discrète soit menée sur Galilée par l'Inquisition dès juin 1611. En 1616, la censure est ratifiée par l'Inquisition et par le pape Paul V. La théorie copernicienne est condamnée.

Le 6 août 1622, le cardinal Maffeo Barberini, ami de Galilée, est élu Pape sous le nom d'Urbain VIII. Avec son soutien, Galilée commence le *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*.

Le livre est ouvertement pro-copernicien, bafouant hardiment l'interdit de 1616.

Le 22 juin 1633, au couvent dominicain de Santa-Maria, la sentence est rendue : Galilée est condamné à la prison à vie (peine immédiatement commuée en résidence à vie par Urbain VIII) et l'ouvrage est interdit.

Les décrets du Saint-Office ne seront jamais publiés en France, mais, prudemment, René Descartes renonce à faire paraître son *Monde*.

En 1741, devant la preuve optique de l'orbite de la Terre, le pape Benoît XIV fait donner par le Saint-Office l'imprimatur à la première édition des oeuvres complètes de Galilée.

En 1979 et en 1981, le pape Jean-Paul II charge une commission d'étudier la réhabilitation de Galilée. Mais à la mort de Jean-Paul II en avril 2005, l'acte formel de réhabilitation n'était toujours pas prononcé.

<http://www.historia.presse.fr/data/mag/711/71103201.html>

## **Johannes Kepler 1571 - 1630**

Poursuivi pour ses convictions religieuses et ses idées coperniciennes, il se réfugie à Prague en 1600, invité par l'astronome danois Tycho Brahé pour y devenir son assistant.

Tycho Brahé, avant l'invention de la lunette par Galilée, avait mis au point des instruments de visée remarquablement précis pour l'époque (2 minutes de degré), et avait pressenti que les orbites de Mars et des comètes autour du soleil étaient elliptiques et non circulaires.

Brahé demande à son assistant de calculer l'orbite précise de Mars.



Il ne faudra pas moins de six ans à Képler pour achever son travail. C'est durant ce travail qu'il découvrit les deux premières des trois lois fondamentales : les planètes décrivent des trajectoires elliptiques dont le Soleil est un foyer et elles parcourent des aires égales pendant des intervalles de temps égaux.

Enfin, il énonça la 3<sup>e</sup> loi de Képler : Pour toutes les planètes, le rapport entre le cube du demi grand axe de la trajectoire et le carré de la période est le même. Cette constante est indépendante de la masse de la planète.

## **Isaac Newton 1643 - 1727**

Il est à l'origine de ce qu'on appelle la mécanique classique dont les trois lois de Newton constituent les fondements. Il inventa, en même temps que Leibniz le calcul différentiel, qu'il nomma méthode des fluxions et qu'il utilisa pour formaliser sa description de la gravitation comme force d'attraction universelle. <http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/HistTopics/Orbits.html>

### **Le principe d'inertie**

Dans un référentiel terrestre, considéré comme galiléen, le centre d'inertie d'un corps persiste dans son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme tant que la somme des forces extérieures qui s'appliquent sur lui est nulle.

### **La Relation Fondamentale de la Dynamique**

L'application d'une force  $F$  sur un objet, modifie la vitesse de ce dernier. L'accélération résultante  $a$  a la même direction et le même sens que la force appliquée, est proportionnelle à celle-ci et inversement proportionnelle à la masse  $m$  de l'objet.

Ce qui peut être résumé dans la relation  $F = m.a$

### **Loi de la réaction**

Si un corps A applique une force  $F$  sur le corps B, alors, en réaction, le corps B applique sur le corps A une force de même direction, de même intensité et de sens opposé à  $F$ .

**Newton a donc solidement établie la mécanique de Galilée et de Képler en l'expliquant par la force de gravitation universelle.**

## **Ole Römer 1644-1710**

Pensionnaire de l'Observatoire de Paris, il effectua la première détermination de la vitesse de la lumière en 1676 par une méthode astronomique : Io disparaît à notre vue quand il entre dans le cône d'ombre de Jupiter (immersion) et réapparaît (émersion) en sortant de l'ombre. A partir de la période de l'éclipse, Römer déterminait la période de révolution du satellite autour de Jupiter. Il constata que le début de cette éclipse se décalait progressivement (de plus ou moins 8 minutes) en fonction de la position de Jupiter par rapport à la terre.

Ce résultat était en contradiction avec les lois de Kepler qui stipulaient que la période de révolution du satellite était rigoureusement constante.

Römer comprit alors qu'il fallait tenir compte du temps de parcours de la lumière pour aller de Io à la terre.

A l'époque Römer trouva  $c = 212.000$  km/s au lieu de  $300.000$  km/s soit une erreur de 29% ce qui était déjà très bon, compte-tenu du fait que la distance Terre-Soleil n'avait pas encore été déterminée avec précision.

## Les rois de France et les Cassini contre Newton

Avec les progrès de l'astronomie et de l'optique, la conquête de l'Amérique, il devenait très important de perfectionner les instruments de navigation maritime.

On savait désormais parfaitement mesurer les latitudes, mais pour les longitudes, on n'était pas plus avancé qu'à l'époque de Galilée. Les horloges se déréglaient en mer, et il fallait absolument, pour la sûreté des voyages, connaître sa longitude.

Deux thèses étaient en présence sur les moyens d'y parvenir : la thèse anglaise, qui prônait des progrès de l'horlogerie, et la thèse française qui reposait sur des éphémérides très précis des positions respectives des 4 satellites Galiléens de Jupiter (Cf. tables de Cassini - 1668).

En jeu était la dispute pour définir un méridien de référence (Greenwich ou Paris ?) et le marché lucratif des cartes marines.

La méthode de Cassini avait d'ailleurs déjà fait ses preuves, puisqu'elle avait permis de mesurer précisément l'écart de longitude entre Paris et Brest ( $6^{\circ}54'$  au lieu de  $8^{\circ}10'$  selon les cartes antérieures.

Louis XIV disait même que ses astronomes lui avait perdu plus de territoire que ses ennemis.)

Les anglais utilisèrent également la méthode de Cassini pour mesurer précisément – entre autres - les longitudes de leurs colonies d'Amérique du Nord.

L'observation de Jupiter était très difficile en mer, notamment à cause des mouvements du bateau et des nuages. Il fallait également pouvoir naviguer pendant les périodes d'opposition de Jupiter.

Par ailleurs, les horlogers anglais, notamment John Harrison, avaient construit des horloges suffisamment précises pour les besoins des marins. A partir du deuxième voyage de Cook (1772), le système anglais fut progressivement adopté par tous les marins.

Parallèlement, il fallait connaître la forme exacte de la terre : ellipsoïde allongé (thèse Française) ou aplati (thèse de Newton).

C'est donc Louis XIV qui ordonna une première série de mesures du méridien terrestre entre 1701 et 1718 (Cassini I & II). Puis Louis XV ordonna une deuxième série en 1770 (Cassini III), pour donner raison aux Anglais : La terre est bien un géoïde (ellipsoïde aplati).

Une troisième série de mesures, démarrée en 1792 (Cassini IV) aboutit à la définition du mètre.

Le méridien de Greenwich fut définitivement adopté à la conférence internationale de Washington en 1884. En contrepartie, les Anglais devaient adopter le système métrique....

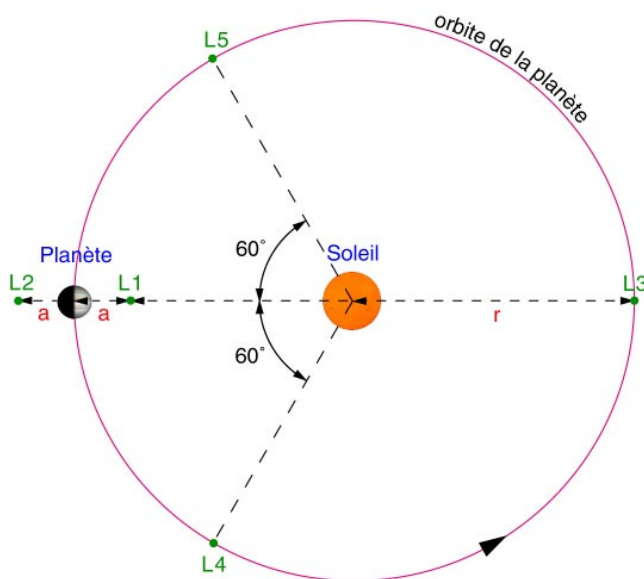
## Joseph Louis de Lagrange 1736 – 1813

On lui doit le théorème de Lagrange sur la théorie des groupes, un autre sur les fractions continues, l'équation différentielle de Lagrange, la fonction de Lagrange ainsi que les équations de Lagrange en mécanique analytique.

Il élabore le système métrique avec Lavoisier pendant la Révolution. Il est membre fondateur du Bureau des longitudes (1795) avec, entre autres, Laplace et Cassini IV.

On lui doit les démonstrations relatives aux points de Lagrange.

Les points L1, L2 et L3 sont alignés et instables. Cela signifie qu'un léger écart à la position exacte de l'un de ces points ou une petite perturbation gravitationnelle, suffisent à éloigner l'objet de son point de repos.



Au contraire, les points L4 et L5 sont stables, à condition que l'un des deux corps soit au moins 24,96 fois plus massif que l'autre.

En fait, la Terre possède trois Troyens (dont Cruithne) qui oscillent autour du point L3, mais en dépassant les points L4 et L5. D'autres oscillent autour des points L1 et L2.

Enfin, on peut maintenant placer un satellite du soleil aux points L1 ou L2 et le stabiliser artificiellement pour qu'il demeure soit dans le trajet des tempêtes solaires soit dans la pénombre de la terre.

<http://membres.lycos.fr/fransyl/lagrange/cruithne.htm>

## **Pierre-Simon Laplace 1749 - 1827**

Mathématicien, astronome et physicien français particulièrement célèbre par son ouvrage en cinq volumes 'Mécanique Céleste'.

Il développe des méthodes et outils mathématiques permettant de calculer l'influence réciproque des planètes les unes sur les autres, et donc les variations séculaires des orbites.

Laplace fut l'un des premiers savants à s'intéresser de très près à la question de la stabilité à long terme du système solaire. La complexité des interactions gravitationnelles entre le Soleil et les planètes connues à l'époque ne semblaient pas admettre une solution analytique simple. Newton avait d'ailleurs déjà pressenti ce problème après avoir remarqué certaines irrégularités dans le mouvement de certaines planètes.

Ses travaux permettront ultérieurement la découverte de Neptune en 1846. On a prétendu également que la découverte de Pluton en 1930 était due à un résultat de calcul.

### **Plus de détails ?**

[http://www.imcce.fr/fr/formation/cours/CoursMC\\_Vienne/Astro\\_cours\\_deug2.pdf](http://www.imcce.fr/fr/formation/cours/CoursMC_Vienne/Astro_cours_deug2.pdf)

Le lecteur attentif notera dans ce document une divergence sur les thèses de Thalès relativement à l'héliocentrisme.

## **Retour sur le sens trigonométrique.**

On considère que les planètes se forment en même temps que leur étoile, par accrétion et condensation d'un nuage de gaz et de matière interstellaire sous l'influence de la gravitation. Les corps planétaires naissent de perturbations dans le disque d'accrétion, et attirent à leur tour divers objets dans leur champ gravitationnel. Cette phase de création se réalise par impacts successifs d'objets qui circulent dans l'espace à des vitesses relatives assez importantes (plusieurs kilomètres à dizaines de kilomètres par seconde), ce qui dégage de la chaleur à chaque collision. Les planètes nouvellement formées et bombardées de débris sont donc principalement composées de matériaux en fusion, dont la chaleur peut se conserver plusieurs millions (voire milliards) d'années même si la surface se refroidit notablement (assez pour se durcir sous forme de roches ou de gaz).

Deux grands types de planètes peuvent apparaître : les planètes gazeuses et les planètes telluriques (ou rocheuses).

Dans notre système solaire, toutes les planètes tournent autour du soleil dans le même sens (trigonométrique) et à peu près dans le même plan à quelques degrés près (sauf Pluton dont l'orbite est inclinée de 17°).

Le soleil et la plupart des planètes tournent sur elles mêmes dans le sens trigonométrique (Sauf Vénus et Uranus).

La majorité des satellites tournent autour de leur planète dans le sens trigonométrique (sauf les satellites dits rétrogrades).

La plupart des satellites tournent autour de leur planète sur une orbite située au delà de l'orbite 'planétosynchrone', (dans un plan plus ou moins incliné par rapport au plan équatorial), c'est à dire qu'ils se lèvent à l'est et se couchent à l'ouest.

Sauf quelques cas de satellites des géantes gazeuses, la plupart des satellites sont sur des orbites situées au delà de la limite de Roche (voir plus loin).

## Phobos

Phobos, se déplaçant à moins de 6000 km de la surface de Mars, est plus proche de sa planète que tout autre satellite naturel du système solaire. C'est également l'un des plus petits satellites naturels du système solaire. Phobos orbite autour de Mars à une altitude plus basse que celle de l'orbite aréosynchrone, ce qui signifie qu'il tourne autour de Mars plus vite que Mars ne tourne sur elle-même. Son orbite est si basse que dans les régions polaires (à partir de  $\sim 69^\circ$ , soit la latitude de Mourmansk ou de Narvik), il n'est jamais visible au-dessus de l'horizon.

Phobos se lève donc à l'ouest, traverse rapidement le ciel martien (en 4 h 15 min) et se couche à l'est, et ceci environ deux fois par jour (à 11 h 6 min d'intervalle). De plus, pour un observateur équatorial, Phobos donne visiblement l'impression qu'il « tombe » lors de chaque passage : sa taille apparente est de  $0,14^\circ$  au lever, et grossit jusqu'à atteindre  $0,20^\circ$  au zénith (une augmentation de 45%). À titre de comparaison, le Soleil a une taille apparente de  $0,35^\circ$  dans le ciel martien.

Du fait de sa petite taille, Phobos subit de fréquentes éclipses, lorsqu'il pénètre dans le cône d'ombre de Mars. Il 'disparaît' donc dans le ciel, tout comme les gros satellites artificiels de la Terre, mais de façon beaucoup plus spectaculaire.

Cette orbite surbaissée signifie aussi que Phobos sera un jour détruit ; en effet, les forces de marée abaissent son orbite encore plus (actuellement à une vitesse de 1,8 mètre par siècle) et dans 40 millions d'années il s'écrasera sur Mars ou, plus probablement, se sera déjà brisé sous l'effet des forces de Roche et formera (temporairement) un anneau planétaire autour de Mars.

Bien entendu, si l'homme n'a pas, à cette époque, détruit sa propre planète, il aura pu décider d'implanter une station orbitale sur Phobos, et de stabiliser son orbite.

## **Stabilité du système solaire : Résonances et non-résonances**

### Types de résonances

Lorsque plusieurs objets ont leur période orbitale dans un rapport avec des entiers simples, on parle de *résonance de Laplace*. C'est le cas, par exemple, des lunes de Jupiter, Ganymède, Europe et Io qui sont dans une résonance 1:2:4, sur des orbites équatoriales et coplanaires. (Callisto a une période approximativement égale à 9,27 celle de Io)

Il n'existe que cinq résonances concernant les planètes ou les lunes majeures dans le système solaire (un bien plus grand nombre concerne les astéroïdes, les anneaux et les petits satellites).

Les chiffres indiqués en tête indiquent les périodes respectives des orbites de chacun des corps célestes

- 2:3 Neptune-Pluton (période de Neptune = période de Pluton \* 2/3)
- 4:2 Mimas-Téthys (lunes de Saturne)
- 2:1 Encélade-Dioné (lunes de Saturne)
- 4:3 Titan-Hypérion (lunes de Saturne)
- 1:2:4 Io-Europe-Ganymède (lunes de Jupiter) ; l'unique résonance de Laplace

Les simples relations entières entre les périodes de révolution cachent des relations plus complexes. Les points de conjonction peuvent osciller autour des valeurs d'équilibre définis par la résonance. Compte tenu des excentricités des orbites les noeuds ou les périastres peuvent changer.

<http://www.imcce.fr/~noyelles/theseBNoyelles.pdf>

Les périodes de révolution de Jupiter et Saturne autour du soleil sont dans un rapport très proche de 2/5. Tout les dix ans Joviens, le système se retrouve à peu près dans la même configuration.

Toutes les résonances listées ci-dessus sont présumées stables ou auto stabilisantes. On peut dire sommairement que la stabilité d'un système résonant dépend du déphasage initial des corps concernés et du rapport de leurs masses.

## **Forces marémotrices**

Les forces marémotrices expliquent la stabilisation de la rotation de la lune à un tour par mois lunaire. L'onde de marée terrestre est en retard par rapport au mouvement de la Lune du fait de son frottement sur les fonds marins ; il s'ensuit un lent ralentissement du mouvement de rotation de la Terre, et un très lent éloignement de la Lune.

Cette interaction ralentit la rotation de la Terre de 2 millisecondes par siècle. Nous pensons qu'il y a approximativement 900 millions d'années il y avait 481 jours de 18 heures par an.

Parallèlement, la durée du mois lunaire augmente, au fur et à mesure que la lune s'éloigne de la terre. La limite de ce phénomène sera atteinte lorsque le mois lunaire et la journée terrestre seront synchrones (Ca n'est pas pour tout de suite).

Charon, satellite de Pluton, est en rotation synchrone avec ce dernier : comme la Lune avec la Terre, il lui présente toujours la même face. Mais, contrairement à cette dernière, Charon évolue (à peu près) sur une orbite Plutostationnaire. Ainsi, outre le fait de présenter toujours la même face, Charon paraît donc immobile dans le ciel de Pluton. Le système est donc parfaitement stable.

Ces forces marémotrices expliquent également le volcanisme sur Io (premier satellite Galiléen de Jupiter) ainsi que les craquelures observées sur la surface de glace des 3 autres (Europe, Ganymède et Callisto).

Les forces marémotrices dues au soleil sont également (mais seulement partiellement) responsables du ralentissement de la rotation des planètes telluriques par rapport aux planètes plus éloignées du soleil.

## **Mercure**

Mercure tourne sur elle même à raison de 3 tours pour 2 années tropiques : l'intervalle entre deux passages du Soleil à la verticale d'un point donné est égal au double de la période de révolution autour du Soleil. Autrement dit, une 'journée' dure 2 ans ou 3 jours sidéraux !

Une particularité de cette résonance, due aux forces marémotrices et à la forte excentricité de l'orbite, tend à la caler en phase avec la précession du périhélie. A tel point que le méridien de référence de Mercure a été défini sur le méridien solaire lors du premier périhélie de l'année (terrestre) 1950.

<http://www.insu.cnrs.fr/web/article/art.php?art=958> & <http://www.obspm.fr/actual/nouvelle/jul04/merc.fr.shtml>

Autrement dit, quand Mercure passe (2 fois par 'journée') à son périhélie, l'heure solaire est alternativement midi ou minuit dans Tir Planitia (longitude 180°, proche du bassin Caloris – le bien nommé) – et le soleil y reste très proche du zénith pendant environ 15 jours terrestres, du fait de l'accélération du mouvement relatif au soleil à ce moment là. La température peut y monter à 427°C. Une autre particularité de Mercure est que sa période synodique (116 jours terrestres) est à peu près le double de sa période de rotation (jour sidéral, 58 jours terrestres) ce qui explique que les astronomes ont longtemps cru que Mercure présentait toujours la même face au soleil.

## **Les anneaux**

Le premier mécanisme à prendre en compte pour comprendre les anneaux est l'effet de marée dû à l'attraction différentielle de la planète.

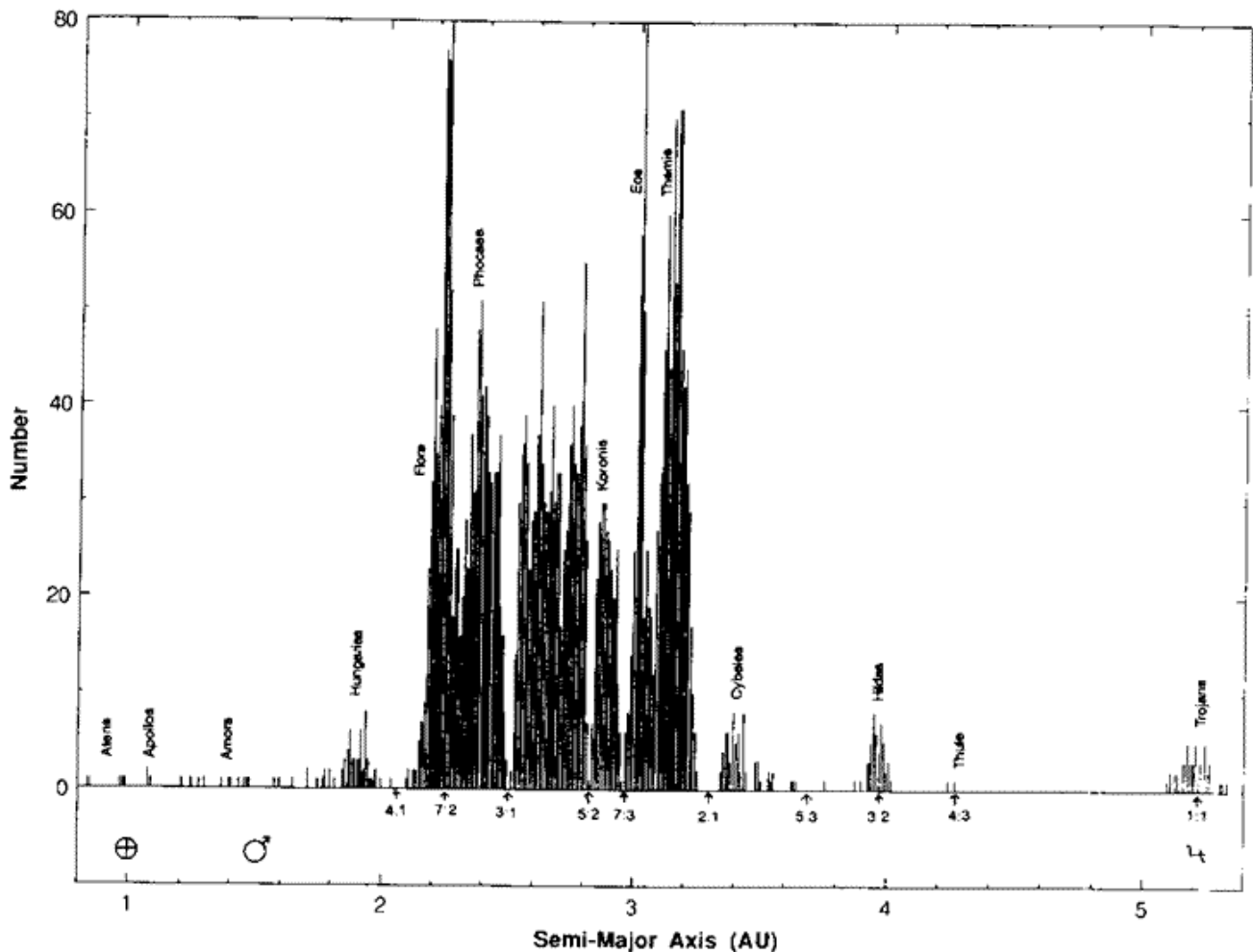
Dans un anneau qui serait situé loin de la planète, les collisions amèneraient les particules à s'accréter et l'anneau formerait très rapidement un satellite : certains satellites, comme Miranda, ont une surface semblable à un patchwork, ce qui conduit à supposer qu'ils ont pu être détruits puis reformés après être passés par un état intermédiaire d'anneau.

Si l'anneau est à proximité de la planète, la différence entre les forces d'attraction de la planète sur deux particules proches est supérieure à l'attraction gravitationnelle mutuelle entre les deux particules, ce qui empêche l'accrétion des particules.

La distance à laquelle ces deux effets s'annulent s'appelle la limite de Roche. Le rayon de Roche vaut approximativement  $(4M/\rho)^{1/3}$ , où  $M$  est la masse de la planète et  $\rho$  la densité de l'objet. Un anneau n'est stable qu'à l'intérieur de cette limite. Les quatre systèmes d'anneaux se trouvent à l'intérieur de la limite de Roche. L'anneau F de Saturne, qui se trouve juste à l'extérieur de cette limite, présente des accumulations de matière qui pourraient être l'état intermédiaire entre un anneau et un satellite.

## Non Résonances

### Localisation des astéroïdes.



**Distribution héliocentrique des demi-grand axes pour environ 4000 astéroïdes.  
Les résonances et les lacunes de Kirkwood y sont apparentes**

L'influence gravitationnelle périodique des planètes (lunes) peut déstabiliser leurs orbites. C'est ce qui permet d'expliquer l'existence de bandes dans la ceinture d'astéroïdes où le nombre de corps est

considérablement plus faible. Ces bandes, appelées lacunes de Kirkwood, auraient été créées par une résonance avec l'orbite de Jupiter qui aurait provoqué l'éjection des corps s'y trouvant. La résonance peut avoir l'effet opposé : elle peut permettre la stabilisation (éventuellement temporaire) d'orbites et de protéger certains corps de perturbations gravitationnelles. Ainsi Pluton et les autres plutinos sont protégés de l'éjection de leur orbite par une résonance 3:2 avec la planète géante Neptune. D'autres objets de la ceinture de Kuiper sont également dans d'autres résonances avec cette planète : 1:2, 4:5, ...

Les astéroïdes troyens peuvent même être considérés comme étant en résonance 1:1 avec leur planète. Les lacunes de Kirkwood correspondent à des périodes orbitales qui sont commensurables avec la période de révolution de Jupiter. Une telle commensurabilité a lieu quand la période de révolution d'un astéroïde est un multiple  $p/(p+q)$  de la période de révolution de Jupiter, où  $p$  et  $q$  sont des entiers de l'ordre de l'unité. Traditionnellement, ces commensurabilités s'appellent résonances de moyen mouvement et se notent  $(p+q) : p$ . Ainsi, la résonance 5 : 2 concerne les astéroïdes qui effectuent cinq révolutions pour deux effectuées par Jupiter.

<http://www.imcce.fr/fr/ephemerides/astronomie/Promenade/pages4/476.html>

## Loi de Titius Bode

En 1766, Johannes Titius tenta avec succès de trouver une formule mathématique qui décrirait la distribution des planètes autour du soleil. Quelques années plus tard, Johann Elert Bode popularisa cette loi qui est maintenant connue sous le nom de loi de Titius-Bode. Il existe plusieurs expressions de cette loi comme : distance (UA) =  $(4 + 3 \times 2^n) / 10$

où  $n = -\infty, 0, 1, 2, 3, \dots$  etc. Une UA désigne l'unité astronomique ( $1.49 \times 10^8$  km).

	Distance from Sun (AU)	x	(x+4)/10
Mercury	0.387	0	0.4
Venus	0.723	3	0.7
Earth	1	6	1
Mars	1.524	12	1.6
(Ceres)	2.767	24	2.8
Jupiter	5.203	48	5.2
Saturn	9.539	96	10
(Uranus)	19.19	192	19.6
(Neptune)	30.06	384	38.8
(Pluto)	39.53	768	76.4

On constate que la loi de Titius Bode est respectée avec une assez bonne précision jusqu'à l'orbite de Jupiter, beaucoup moins bien au delà.

## Analyse de Souriau

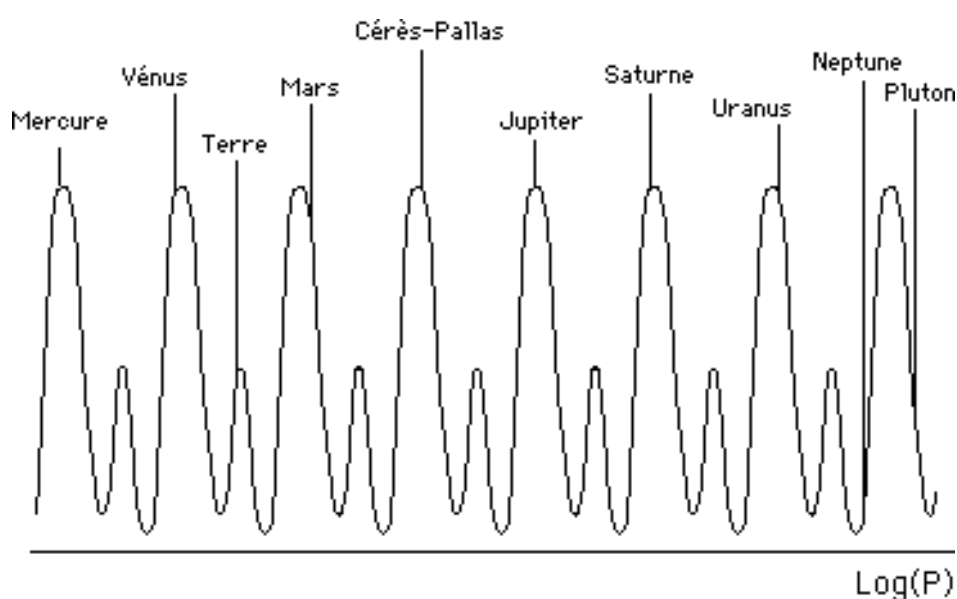
...Le point de départ de Souriau est l'analyse des périodes des orbites des différentes planètes. Il retient alors celle de la Terre : 365 jours et celle de Vénus : 225 jours et calcule, à la fois vers l'aval et vers l'amont la suite de Fibonacci correspondante (ou du type de Fibonacci, où tout terme est la somme de deux qui le précèdent). On sait que dans ces conditions le rapport de deux nombres successifs de cette suite tend vers le nombre d'or.

...Souriau obtient alors ceci :

30	Soleil (29 jours)
55	Rien
85	Mercure (88 jours)
140	Rien
225	Vénus

365	La Terre
590 (1 an et sept mois)	Mars (1 an et 10 mois)
955	Rien
1545 (4 ans et 3 mois)	Cérès-Pallas (ceinture astéroïdes)
2500	Rien
4045 (11 ans)	Jupiter (11 ans et 10 mois)
6545	Rien
10590 (29 ans)	Saturne (29 ans et 5 mois)
17135	Rien
27725 (76 ans)	Uranus (84 ans)
44860	Rien
72585 (199 ans)	Neptune (165 ans), Pluton (248 ans)

...Coincidences assez étonnantes, convenons-en. Souriau étudie ensuite les résonances entre les planètes. Pour ce faire il faut disposer d'un test mesurant si le rapport  $x$  de deux périodes, compris entre zéro et 1, est "proche" d'une fraction irréductible :



<http://jp-petit.com/science/f700/f701.htm>

## ***Histoire du système solaire***

### **Présentation générale**

Au départ, il y a environ 10 milliards d'années, ce qui deviendra un jour le système solaire n'est qu'une fraction minuscule d'un gigantesque nuage d'hydrogène et d'hélium qui poursuit son ballet autour du centre galactique. Au fur et à mesure que le temps passe, ce nuage se contracte doucement et s'enrichit en éléments plus lourds lors de l'explosion d'étoiles massives proches (supernova), ce qui explique que l'abondance actuelle d'éléments lourds est de l'ordre de 2 pour cent.

Finalement, il y a 4,6 milliards d'années, sous l'effet de sa propre gravité, ce nuage s'effondre sur lui-même et se fragmente en une série de nuages de dimension plus réduite dont l'un deviendra le système solaire.

Le protosystème maintenant bien défini continue à se contracter de plus en plus. Mais, d'après la loi de conservation du moment angulaire, si la taille d'un corps se réduit, sa vitesse de rotation doit augmenter pour compenser. La contraction du protosystème s'accompagne donc d'une forte augmentation de la

vitesse de rotation et, comme le protosystème n'est pas rigide, d'un fort aplatissement dans le plan perpendiculaire à l'axe de rotation. On se retrouve ainsi finalement avec une concentration de matière au centre, la protoétoile, entourée d'un disque (ou anneau) de matière appelé le disque protoplanétaire.

Du fait de turbulences dans ce disque apparaissent des fluctuations de densité qui évoluent et aboutissent à des corps de grande dimension, dans un processus appelé l'accrétion. Ces corps continuent à capturer les planétésimaux qu'ils trouvent sur leur chemin et atteignent finalement le stade de planètes. La principale phase d'accrétion se termine il y a environ 4,4 milliards d'années, même si d'intenses bombardements se poursuivent encore pendant un milliard d'années.

L'aspect final des planètes dépend de la distance au Soleil. Près de celui-ci, les éléments légers reçoivent beaucoup d'énergie et sont trop chauds pour se condenser. Le matériau qui constitue ces planètes est riche en éléments lourds, tels le fer ou le silicium, ce qui explique leur forte densité. Loin du Soleil, l'accrétion de planétésimaux est à l'origine d'un noyau dense qui constitue le point de départ pour une croissance ultérieure. Autour de ce noyau s'accumule une enveloppe de gaz et l'on aboutit à une planète très volumineuse et massive, mais essentiellement constituée d'hydrogène et donc peu dense.

## Stabilité du système

L'étude de la stabilité du système solaire a commencé avec Laplace, qui a développé des outils mathématiques adaptés à ce problème, connu également sous le titre **variations séculaires des orbites planétaires**.

Laplace, Lagrange et Le Verrier avaient reconnu les limites de cette étude : Connaissant (très grossièrement) l'état actuel d'un système, on peut prédire son état futur, au moins jusqu'à l'apparition d'un régime chaotique (par exemple une résonance), ou d'une 'catastrophe' (impact météoritique important) pour lequel il est impossible de prendre en compte tous les éléments qui détermineront l'état futur du système (limitation des connaissances et de la puissance de calcul nécessaires).

Ils ont prédit néanmoins que, dans les prochaines centaines de milliers d'années, le système des planètes resterait à peu près stable.

<http://www.astrosurf.org/lombry/chaos-systemesolaire4.htm>

L'IMCCE (Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides) et Jacques Laskar ont repris ces travaux de Laplace en utilisant des ordinateurs et quelques observations mathématiques simplificatrices, valables uniquement hors des régimes chaotiques, et ont permis de modéliser plus fidèlement les orbites et les excentricités des planètes.

Il a, par exemple, calculé l'influence future de la résonance 5 :2 du couple Jupiter Saturne sur l'inclinaison de l'axe de la terre sur l'écliptique.

On peut également faire les calculs 'à l'envers', et reconstituer l'histoire des caractéristiques orbitales des planètes. L'identification des régimes chaotiques possibles est, dans ce contexte, plus aléatoire.

On peut également se proposer différents jeux de conditions initiales, et étudier l'évolution ultérieure du système, en faisant varier un certain nombre de paramètres (y compris, par exemple, la viscosité du magma terrestre).

Jacques Laskar a ainsi pu proposer un modèle d'évolution du climat terrestre qui est cohérent avec les autres observations disponibles sur quelques centaines de millions d'années. Il s'est également intéressé au paléo climat martien, et aux causes de la rotation rétrograde de Vénus.

Il a fait en 1996 la synthèse des recherches entreprises au sujet de la stabilité à long terme du système solaire. Si la conclusion qu'à très long terme la stabilité des orbites planétaires ne peut pas être garantie de façon absolue, une collision entre Mercure et Vénus, par exemple, ne devrait pas avoir lieu avant quelques 3,5 milliards d'années. Pour les planètes plus éloignées du Soleil, y compris la Terre, ce laps de temps est encore beaucoup plus long.

Ainsi, même si le système solaire est instable de façon inhérente, des phénomènes catastrophiques conduisant à sa destruction sous sa forme actuelle ne peuvent avoir lieu que dans un temps comparable à son âge, soit environ 5 milliards d'années, terme au bout duquel un autre phénomène interviendra : l'épuisement du carburant hydrogène dans le soleil, et un accroissement de son volume conduisant de toutes façons à une élévation de la température de notre planète intolérable pour les êtres vivants.

Sauf, bien entendu, interactions imprévisibles avec de gros astéroïdes venus de l'espace interstellaire. De toutes façons, à cette échelle de temps, l'homme aura les moyens technologiques d'intervenir, s'il n'a pas lui-même détruit sa propre planète.

<http://www.imcce.fr/fr/presentation/equipes/ASD/asd.html>

<http://www.obspm.fr/actual/nouvelle/oct04/geo.fr.shtml>

<http://www.imcce.fr/Equipes/ASD/Venus/venus0.html>

## **Travaux de l'Observatoire de la Côte d'Azur**

Au fil des découvertes et des calculs, la communauté scientifique a acquis une idée assez précise de l'histoire du système solaire, au moins depuis 3,5 milliards d'années.

Mais pour aller au delà, il faut rentrer dans des calculs plus compliqués, et plus incertains, impliquant des régimes chaotiques et des catastrophes.

Et bien entendu, la curiosité humaine étant la plus forte et les ordinateurs plus puissants, certains ont tenté l'aventure.

Un nouveau modèle proposé par une équipe internationale de l'Observatoire de la Côte d'Azur (laboratoire Cassiopée, CNRS) explique pour la première fois de façon naturelle et en même temps les orbites des planètes géantes, l'existence des astéroïdes Troyens de Jupiter et le bombardement planétaire tardif de la Terre et la Lune avec une précision jusqu'alors inégalée. Ces travaux font l'objet d'une série de trois articles publiés dans le journal Nature du 26 mai 2005.

Les taches de la Lune sont en fait d'énormes bassins d'impacts qui furent inondés par une lave qui s'est solidifiée. Ces bassins se sont formés relativement tard dans l'histoire du Système Solaire – approximativement 700 millions d'années après la formation de la Terre et de la Lune. Ils portent le témoignage d'une augmentation brutale et conséquente du taux de bombardement des planètes – appelée le bombardement intense tardif ou Late Heavy Bombardment (LHB) en anglais.

L'équipe internationale de scientifiques propose un modèle qui non seulement apporte une solution naturelle au mystère de l'origine du LHB, mais explique aussi pour la première fois simultanément de nombreuses caractéristiques observées du Système Solaire.

Le nouveau modèle part de l'hypothèse que les quatre planètes géantes, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune, quand elles se sont formées, étaient dans une configuration bien plus compacte qu'actuellement. De plus, au-delà de nos quatre planètes s'étendait un anneau constitué de nombreux petits corps glacés ou rocheux : les planétésimaux. Les simulations numériques effectuées par l'équipe de Nice, consistant à faire évoluer ce système, montrent alors que certains de ces planétésimaux ont été lentement déplacés sous l'effet des perturbations gravitationnelles exercées par les quatre planètes géantes. Celles-ci ont alors éparpillé ces petits objets dans le Système Solaire, parfois vers l'intérieur et parfois vers l'extérieur. "Si une planète éjecte un planétésimal vers l'extérieur de son orbite, en compensation, la planète se déplace légèrement vers le Soleil. Si à l'inverse la planète envoie le planétésimal vers l'intérieur, alors elle va s'éloigner légèrement du Soleil."

Les simulations numériques indiquent qu'en moyenne Jupiter a dû se déplacer vers le Soleil tandis que les autres planètes géantes s'en sont éloignées.

Initialement, ce processus était très lent car quelques millions d'années étaient nécessaires pour aboutir à un petit déplacement des planètes. Cependant, selon ce modèle, après 700 millions d'années, la situation a subi un changement brutal. À cette époque, Saturne a atteint une position à laquelle sa période orbitale correspondait à deux fois celle de Jupiter. Cette configuration particulière a provoqué un régime chaotique, résultant en un allongement soudain des trajectoires de Jupiter et de Saturne, c'est-à-dire une augmentation des excentricités de leurs orbites.

"Cela a rendu folles les trajectoires d'Uranus et de Neptune" explique Rodney Gomes. "Leurs orbites sont devenues excentriques elles aussi et elles ont commencé à se perturber violemment entre elles, ainsi que celle de Saturne."

L'équipe de Nice suggère que cette évolution des orbites d'Uranus et de Neptune est à l'origine du LHB. Leurs simulations informatiques montrent que ces planètes ont rapidement pénétré le disque de planétésimaux, éparpillant ces petits objets dans l'ensemble du système planétaire. Un grand nombre d'entre eux ont ainsi atteint le Système Solaire interne où ils sont venus percuter les planètes telluriques. De plus, le processus global a déstabilisé les orbites des astéroïdes situés entre Mars et Jupiter qui ont de ce fait contribué au LHB. Enfin, les effets gravitationnels du disque de planétésimaux ont provoqué le déplacement d'Uranus et de Neptune sur leurs orbites actuelles.

"C'est très convaincant" s'enthousiasme Harold Levison, "nous avons effectué plusieurs douzaines de simulations de ce processus, et statistiquement, les planètes ont fini sur des orbites très similaires à celles que nous observons, avec des séparations, des excentricités et des inclinaisons correctes. Donc, en plus du LHB, nous pouvons aussi expliquer les orbites des planètes géantes. Aucune autre recherche n'avait jamais réussi à reproduire en un seul modèle ces deux caractéristiques."

Cependant, il restait une difficulté de taille à surmonter. Le Système Solaire contient actuellement une population d'astéroïdes qui évolue approximativement à la même distance du Soleil que Jupiter mais suit ou devance la planète selon un angle de 60 degrés avec le Soleil (autour des points de Lagrange L4 et L5). Les premières simulations numériques indiquaient que ces corps, connus sous le nom d'astéroïdes Troyens, auraient dû être éjectés de leurs trajectoires lorsque les planètes géantes se sont déplacées.

"Nous sommes restés assis pendant des mois à cogiter sur ce problème qui semblait rendre invalide notre modèle", précise Alessandro Morbidelli, "jusqu'à ce que nous réalisions que si un oiseau peut s'échapper d'une cage ouverte, un autre peut y rentrer et y faire son nid !"

Ainsi, l'équipe de Nice a déterminé que ces mêmes objets qui ont dirigé les évolutions des planètes et qui ont provoqué le LHB ont pu aussi être capturés sur les orbites des astéroïdes Troyens. Dans leurs simulations, les Troyens ainsi piégés reproduisent la distribution observée, restée jusqu'alors inexpliquée. De plus, la masse totale calculée de ces objets est en accord avec la population observée.

Alessandro Morbidelli et D. Nesvorný ont également exploré des modèles dynamiques de la densité de population des astéroïdes et de la stabilité de leurs orbites au voisinage des lacunes de Kirkwood. Voir –entre autres - **Icarus** Volume 139, Issue 2, June 1999.

En conclusion, dans sa totalité, le nouveau modèle proposé par l'équipe de Nice explique pour la première fois de façon naturelle et en même temps le LHB, l'existence des astéroïdes Troyens, les orbites des planètes géantes, les distributions de Titius-Bode et de Souriau avec une précision

jusqu'alors inégalée. "Notre modèle explique tant de choses", selon Alessandro Morbidelli, "qu'il doit être relativement correct."

[http://www.futura-sciences.com/news-crateres-lunaires-asteroides-systeme-solaire-nouvelle-theorie\\_6372.php](http://www.futura-sciences.com/news-crateres-lunaires-asteroides-systeme-solaire-nouvelle-theorie_6372.php)

Compilation réalisée par Xavier Lesage le 14 mai 2006  
Edition 5 du 25 janvier 2008