

4 PHYSIQUE DU SYSTEME SOLAIRE

Pourquoi les planètes sont-elles si différentes les unes des autres ? Comment expliquer la formation du Système Solaire ? Quels sont les facteurs d'évolution d'une planète à l'autre ? Quelles énergies transforment les structures dans le système solaire ?

Quelles énergies forment et renouvellent le visage d'une planète ? Les énergies (voir chapitre 2) qui sont en oeuvre nous amènent à la question de l'évolution des structures du système solaire - son histoire, son futur .

Une brève histoire du système solaire peut nous renseigner sur les forces et formes qu'on y trouve aujourd'hui, en indiquant la transformation et la provenance des énergies qui lui ont donné ces structures.

Le système solaire a pu se former dans un nuage moléculaire ($T \approx 10$ K) qui avait auparavant été enrichi en éléments lourds (plus lourds que l'H et l'He provenant du Big Bang) - probablement par l'explosion de plusieurs supernovae.

Une petite fraction de ces éléments lourds se compose d'éléments radioactifs. On peut faire la distinction entre trois formes d'énergies au sein de la nébuleuse primitive :

- deux énergies potentielles : l'énergie gravitationnelle du nuage protosolaire (qui va être transformée partiellement en énergie cinétique), et l'énergie nucléaire des noyaux d'hydrogène ($4M_H - M_{He} = 0.028 \text{ uma} = 26.7 \text{ MeV}$, l'énergie de liaison par nucléon augmente de l'hélium jusqu'au fer; par la fusion d'éléments légers on peut donc gagner de l'énergie).
- et une source de rayonnement provenant de la décroissance des éléments radioactifs.

Ces radioisotopes ont été créés par les supernovae qui ont dû avoir lieu avant la formation du système solaire.

Après l'effondrement de la nébuleuse en un disque, les particules tombent dans le plan équatorial en un temps très court (~ 100 ans) et s'accrètent par collision. Un objet en contraction ne peut se transformer en étoile que si la température de son centre s'est suffisamment élevée pour que les premières réactions thermonucléaires puissent se produire. Pour chauffer le centre de l'objet jusqu'aux quelques millions de degrés nécessaires, il faut que l'objet ait une masse importante; or la planète la plus massive du système solaire, Jupiter, ne fait que le millième de la masse solaire. En l'absence de réactions thermonucléaires, les objets du système solaire n'ont qu'une faible quantité d'énergie interne, qui peut avoir plusieurs origines (radioactivité dans le cas des planètes intérieures, contraction ou différenciation interne (éléments lourds/éléments légers) dans le cas des planètes géantes). Par conséquent, la température de surface de ces objets est surtout fonction du flux solaire reçu ; c'est pourquoi cette température décroît à mesure que l'on s'éloigne du Soleil.

Les planètes du système solaire gravitent à peu près dans le même plan. On peut les classer en deux groupes :

Mercure, Vénus, Terre, Mars *planètes telluriques*
Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune, (Pluton) *planètes extérieures*

Les planètes représentent moins de 0.15 % de la masse du système solaire mais 99% du moment angulaire. Parmi les corps autres que les planètes et le Soleil, le Système Solaire comprend aussi :

- 60 satellites qui orbitent autour des planètes (les lunes)
- plusieurs systèmes d'anneaux autour des planètes extérieures
- astéroïdes
- comètes
- météorites

- les différents composants du milieu interplanétaire
 - des grains, des poussières
 - le rayonnement cosmique
 - le gaz neutre d'origine interstellaire
 - le vent solaire

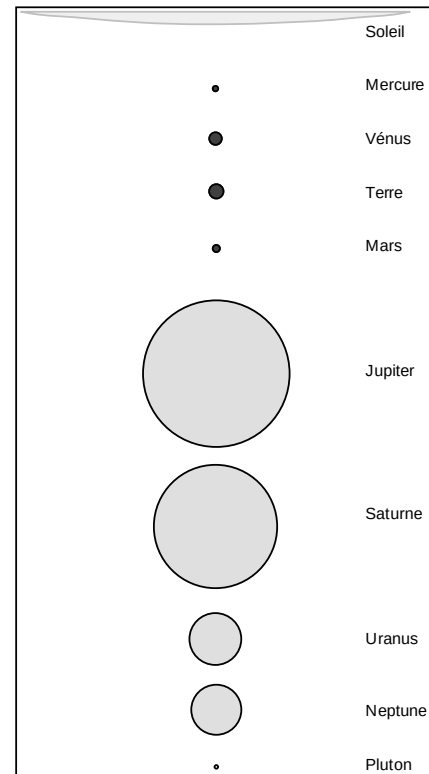


Fig 4.1 : comparaison des tailles des planètes du système solaire

Le mouvement apparent des planètes

Comment expliquer le mouvement des planètes que l'on observe au cours des années ? Y-a-t-il une alternative aux épicycles du système géocentrique de Ptolémée ? (Fig. 4.3)

Tous les corps du système solaire sont en mouvement de révolution autour d'un corps central (le Soleil, dans le cas des planètes, des orbites et des astéroïdes, ou une planète dans le cas des satellites naturels ou des anneaux) mais aussi en mouvement de rotation sur eux-mêmes.

C'est le mouvement de révolution de la Terre autour du Soleil conjugué avec le mouvement propre de la planète qui explique le mouvement apparent des planètes par rapport aux étoiles. (Figure 4.2)

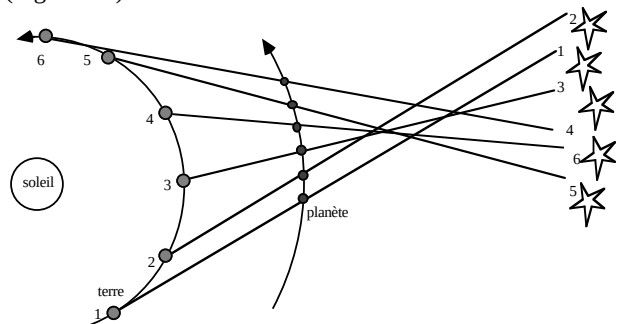


Fig 4.2 : comment expliquer le mouvement apparent des planètes ?

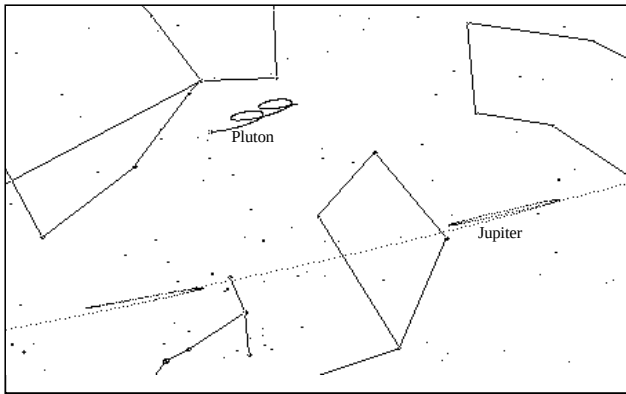


Fig 4.3 : Les mouvements apparents de Jupiter et Pluton en 1994 et 1995.

4.1 LES PLANETES TELLURIQUES

Mercury, Vénus, la Terre et Mars sont appelées planètes telluriques (similaire à la terre) du fait des caractéristiques physiques qui les rapprochent. On inclut également la Lune du fait de sa position par rapport à la Terre.

		Planètes telluriques	Planètes extérieures
Orbite	d / d_{Terre}	0.39 - 1.5 ua	5.2 - 39.4 ua
Taille	r / r_{Terre}	0.38 - 1	3.8 - 11.19
Masse	m / m_{Terre}	0.05 - 1	15 - 317
Composition		Fe, Silicates, O_2	H, He, CH_4 , NH_3
Densité		3.3 - 5.5 g/cm^3	0.7 - 1.7 g/cm^3

Tab 4.1 : Les différences entre les planètes intérieures et extérieures

Les principaux caractères communs (dus à la proximité du Soleil) sont :

- une densité élevée
- une atmosphère secondaire ténue*
- leurs différentes phases d'évolution qui les ont conduites à avoir leur aspect actuel.

*(ex : Vénus a une atmosphère secondaire relativement massive)

4.1.1 L'Intérieur des Planètes Telluriques

La Terre

Le sondage le plus profond effectué sur la Terre n'est que d'environ 10 km (R_{Terre} : 6370 km). Donc la structure interne de la Terre a été en majeure partie déterminée par l'étude de la propagation d'ondes sismologiques P (longitudinales) et S (transversales). Le manteau est visqueux et mobile. Il sert de "support" aux différentes plaques continentales. Le noyau de la Terre (extérieur : liquide, central : solide) est très dense ($>10\text{-}12 \text{ g/cm}^3$), constitué de Fer et de Nickel.

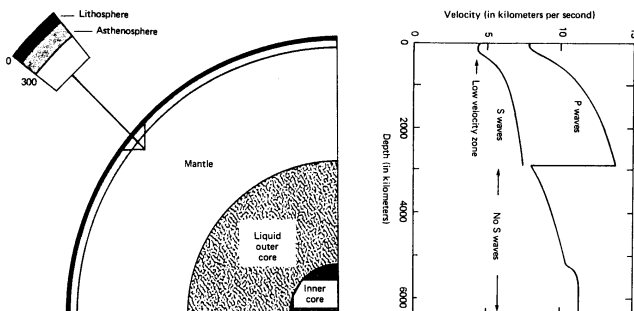


Fig. 4.4 : L'intérieur de la Terre

L'intérieur de la Terre est chauffé par radioactivité ; la température y est d'environ 4000K. Cette énergie remonte

ensuite vers la surface par convection (-> volcanisme, tectonique des plaques); le flux de chaleur y est de 0.06 W/m^2 .

Le champ magnétique de la terre (Fig. 4.11) a la forme d'un dipôle incliné d'environ 11° par rapport à l'axe de rotation. Son orientation et son intensité varient dans le temps (~ 300 ans pour une inversion de la polarité).

Quelle est l'origine de ce phénomène ? Est-il possible que les parties solides (p.e. la croûte) soient magnétisées ? Non ! Car il n'y aurait pas cette variabilité rapide. Ce sont donc les parties liquides qui doivent être responsables de la génération du champ B.

Est-il possible que ce soit une sorte d'aimant permanent ? Non, parce qu'un liquide ne se laisse pas magnétiser longtemps (mélange des dipôles). Ce sont donc des courants électriques qui doivent générer le champ magnétique. Dans le cas de la terre, les courants nécessaires sont de l'ordre de 0.3 mm/s , ce qui semble être raisonnable pour le noyau liquide.

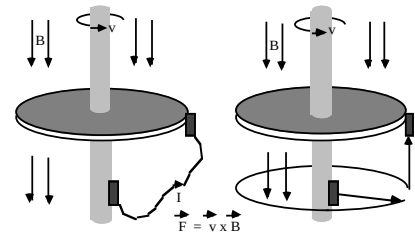


Fig 4.5 : schéma simplifié d'une dynamo. A gauche : disque en rotation avec champ magnétique perpendiculaire. Dans le circuit qui raccorde le contact sur l'axe avec celui sur le disque, un courant électrique sera induit; à droite, ce courant peut être utilisé pour générer le champ magnétique.

4.1.2 La Surfaces des Corps Telluriques

Comment se sont formées les surfaces des corps telluriques et quelles énergies sont en jeu ? Les principaux processus qui ont formé le visage d'une planète sont :

- processus tectoniques : déformation de la lithosphère
- processus volcaniques : éruptions de matière à la surface
- les processus de "gradation" : érosion - transport - dépôt de matière
- le bombardement : cratérisation par impact de météorites

Les moteurs qui sont à l'origine de ces processus de transformation sont les mêmes énergies que nous avons rencontrées au chapitre 2.

- E_{hv} le rayonnement solaire (énergie thermonucléaire),
- E_g la transformation de l'énergie gravitationnelle des corps en énergie cinétique,
- E_c la transformation de l'énergie cinétique en énergie thermique,
- E_r la décroissance des éléments radioactifs à l'intérieur des corps.

Les processus tectoniques et volcaniques sont les principaux mécanismes qui transportent l'énergie E_r de l'intérieur des planètes vers la surface. Tandis que la conduction ne fait globalement que 10%-30% du transport de cette chaleur, elle domine dans les couches limites. Les moteurs de la "gradation" sont d'une part le rayonnement solaire E_{hv} (circulation atmosphérique) et d'autre part $E_g \rightarrow E_c$. La cratérisation par bombardement est due à la transformation $E_g \rightarrow E_c \rightarrow E_r$.

Processus Tectoniques

Pour une planète avec une tectonique de plaques (c'est à dire avec des plaques continentales et des planchers océaniques), on peut estimer la hauteur entre un massif continental et le plancher océanique: Nous pouvons considérer que les continents "flottent" sur le manteau comme des blocs de bois flottent dans l'eau (isostasie élémentaire) : Les continents "flottent" car la densité moyenne de la croûte continentale est moins importante que la densité du manteau supérieur : La force ascendante qui soulève les continents est égale au poids du manteau déplacé. L'application de l'équilibre hydrostatique (principe d'Archimède) sur les croûtes continentales prend le

nom d'isostasie. La pression p_b à la base du continent peut être exprimée par la densité ρ_c et l'épaisseur e_c de la croûte continentale, et la densité du manteau ρ_m :

$$p_b = \rho_c \cdot g \cdot e_c = \rho_m \cdot g \cdot b \quad 4.1$$

$$h = e_c - b = e_c \cdot \left(1 - \frac{\rho_c}{\rho_m}\right) \quad 4.2$$

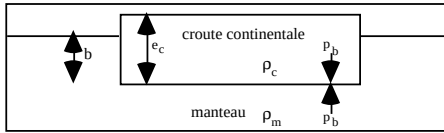


Fig 4.6 : isostasie - modèle simplifié - un bloc continental "flotte" sur un manteau fluide

Pour les valeurs $\rho_c = 2750 \text{ kg/m}^3$, $\rho_m = 3300 \text{ kg/m}^3$ et $e_c = 35 \text{ km}$, on obtient $h = 6.7 \text{ km}$. Cette estimation est approximative car elle ne tient pas compte de la contribution de l'eau et de la croûte océanique.

La tectonique des plaques peut être constatée par exemple dans la similitude des côtes Africaines et Sud Américaines qui semblent pour voir "s'emboîter". Les continents "dérivent", c'est à dire se déplacent les uns par rapport aux autres, à des vitesses de quelques cm/an. La reconstitution de la dérive permet de remonter à -250 millions d'années. Alors, semble-t-il, un seul continent, la pangée, était entouré d'un océan géant, la panthalassa. La dérive des continents est une manifestation, une conséquence d'une activité plus globale de la lithosphère. Tout d'abord, les continents ne sont pas les seuls à se déplacer. Entre les continents, les "planchers océaniques" suivent des mouvements similaires. La croûte continentale est plus épaisse que la croûte océanique; le manteau lithosphérique est donc plus proche de la surface au niveau des mers.

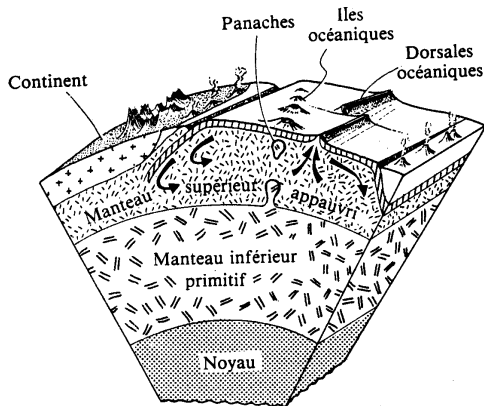


Fig 4.7 : Terre : surface et lithosphère

Il y a fabrication permanente de plancher à partir du matériau du manteau qui chauffe, remonte par convection à la surface. Il émerge en des zones dites "dorsales" où le refroidissement provoque la coulée de plancher nouveau. La production de plancher ne provoque pas l'augmentation de la surface de la Terre. Elle s'accompagne de la disparition, en égale quantité, de plancher qui retourne au manteau en des zones dites de subduction qui constituent des fosses océaniques.

Au total, la lithosphère est divisée en une dizaine de grandes plaques, délimitées par les dorsales d'un côté, les fosses de l'autre. Le mouvement est rendu possible par les propriétés élastiques de l'asthénosphère sur laquelle elles reposent. Dans leur mouvement, les plaques lithosphériques entraînent celui des continents qu'éventuellement elles portent. Un effet direct du mouvement des plaques est la genèse des montagnes. Celle-ci se produit, essentiellement, au niveau des zones de subduction, où deux plaques en mouvement opposées se heurtent.

Des manifestations du mouvement des plaques sont l'activité sismique et le volcanisme.

qu'en est-il sur les autres planètes ?

Sur Terre les surfaces sont réparties sur deux niveaux : les fonds des océans et les continents (Fig. 4.8). Cette répartition n'est pas observée sur Vénus et Mars. On est donc tenté de conclure l'absence de phénomènes tectoniques sur ces planètes. C'est à dire : pas de mouvements de plaques continentales.

On observe des traces de volcanisme récent, cependant il n'y a pas de chaîne de volcans comme sur Terre, révélatrice de tectonique des plaques.

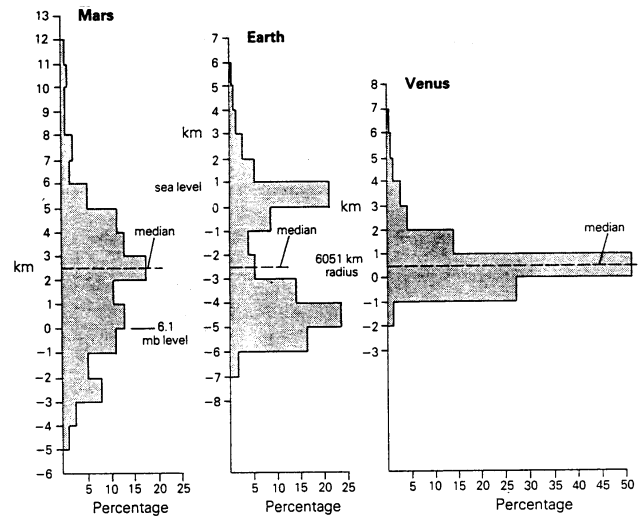


Fig 4.8 : répartition de la topographie sur Mars, la Terre, et Vénus

Processus Volcaniques

Les dorsales océaniques et les zones de subduction sont le siège d'une forte activité volcanique. Les premières sont donc responsables du volcanisme sous-marin. Pour expliquer l'origine des volcans sous les plaques, on propose le schéma suivant : des sources de chaleur situées profondément sous la lithosphère, dites points chauds ("hot spots"), engendreraient des panaches ascendants de magma affleurant non seulement au niveau des dorsales, mais également en divers points, fixes, du globe. L'éjection sporadique de ce magma, au travers d'une lithosphère en mouvement, serait responsable de l'existence d'archipels volcaniques alignés, selon l'image de la perforation d'un ruban qui défile.

A part la Terre, on constate des traces d'activité volcanique sur Mars, Vénus et certains satellites.

Processus de Bombardement

On peut pour expliquer l'origine des cratères de la Lune avancer deux hypothèses

- celle de la cratérisation par météorites
- et celle du volcanisme

Les astronomes ont longtemps préféré expliquer les cratères par le volcanisme, donc un phénomène géologique; tandis que les géologues ont penché plutôt pour la première hypothèse, la cratérisation par bombardement, donc un phénomène astrophysique.... Débat d'activité jusque dans les années 60 où les Missions Apollo ont fait office de laboratoire et on a conclu à une érosion par bombardement. Des fragments de rochers lunaires témoignaient d'énergies cinétiques extrêmement importantes.

Aujourd'hui nous savons que la majorité de ses cratères sont produits par les impacts de météorites sur sa surface. Toutefois: comment expliquer que les cratères ont quasiment tous une forme à peu près circulaire ? Pourquoi, s'il est évident que tous les météorites ne tombent pas de manière verticale sur la surface de la Lune ?

A travers l'exemple de "Meteor Crater" en Arizona/USA nous allons essayer de comprendre le phénomène d'un impact de météorite. Avec un diamètre de $D \approx 1200 \text{ m}$, le cratère est à peu près circulaire, il a une profondeur de $h \approx 150 \text{ m}$. Où chercheriez vous les restes du météorite ?

L'énergie de l'impact de "Meteor Crater" : Nous allons supposer une vitesse relative (terre-météorite) v , un diamètre d , une densité ρ . Si la vitesse orbitale de la Terre est $v_{orb} = 29 \text{ km/s}$, la vitesse d'une comète aperiodique ou d'un essaim de

météorites devrait être de l'ordre de 40 km/s. (A une certaine distance r du Soleil, la vitesse parabolique est de $\sqrt{2}$ plus importante que la vitesse circulaire - voir expressions 2.37/2.38). Avec un diamètre de $d=25$ m, une densité $\rho=7.5$ g/cm³ (météorite Ni/Fe) et une vitesse d'impact au sol de $v = 30$ km/s, l'énergie cinétique du météorite est :

$$E_{\text{cin}} = \frac{1}{2} mv^2 \text{ avec } v = 30 \text{ km/s et } m \approx 60 \cdot 10^6 \text{ kg} \quad 4.3$$

$$\approx 2.7 \cdot 10^{16} \text{ J}$$

Cette énergie correspond à 4·10⁶ tonnes de TNT ! (La première bombe atomique - "Trinity" bombe - ne faisait "que" 17 000 tonnes de TNT.) Dans le choc d'une météorite avec une planète, l'énergie cinétique de la météorite est transformée en énergie thermique qui va *pulvériser et vaporiser* instantanément la matière météoritique et celle du sol. Plus de 175 mille tonnes de matière ont du être éjectés par le météorite en Arizona.

Sur la Lune où la gravitation est moins importante que sur la Terre, jusqu'à 10 000 fois la masse d'une météorite peut être éjectée dans l'impact; le cratère aura un diamètre presque 40 fois supérieur au rayon de la météorite qui le produit.

Les cratères sont donc la trace d'une *explosion* : leur forme dépend très peu de la géométrie de l'impact mais de la symétrie de l'onde de choc.

Si on connaît l'énergie libérée par une explosion, le diamètre du cratère peut être approché grossièrement par une formule empirique (obtenue dans le test d'explosions nucléaires ...)

$$D \approx 74 (E_{\text{cin}}/k)^{0.3} \text{ [m]} \text{ avec } k = 4.19 \cdot 10^{12} \text{ J} \quad 4.4$$

Pour "meteor crater" nous avons estimé $E_{\text{cin}} = 2 \cdot 10^{16} \text{ J}$ (4.5) ; on obtient donc un diamètre de

$$D_{\text{mc}} \approx 1000 \text{ m}$$

ce qui montre que les hypothèses choisies pour le météorite étaient raisonnables.

Processus de "Gradation"

Erosion, transport et dépôt de matière par le vent, l'eau, des glaciers.

4.1.4 Mercure

De part sa position près du soleil (distance moyenne au soleil : 0.38 UA soit 57.9 millions de km), la planète est difficilement observable, sauf au coucher ou au lever du soleil. (en dehors des conjonctions inférieures et supérieures !)

1974 - envoi de la seconde Mariner 10. On constate une évolution géologique vieille et relativement simple : Après la naissance de la planète, il y a ~ 4.6 milliards d'années elle a subi de forts bombardements par les résidus de la nébuleuse primitive. A part les nombreux impact météoritiques, on décelé également des traces de volcanisme. Ces phénomènes ont marqués la planète durant le premier milliard d'années. Il s'agit du même type de phénomènes que pour la Lune.

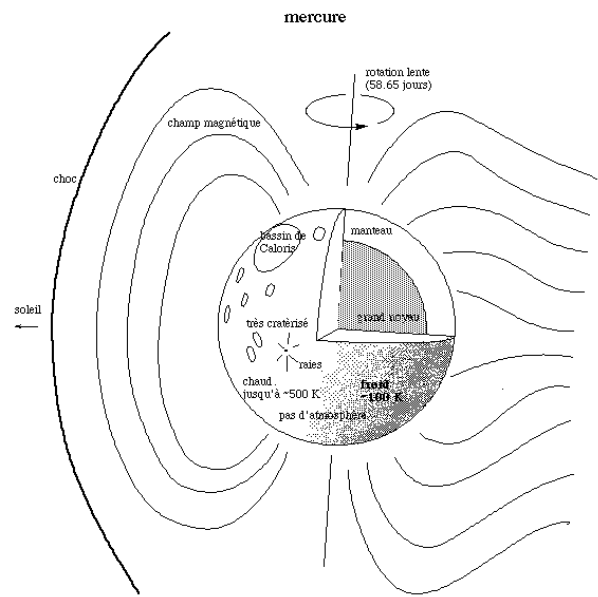


Fig. 4.9 résumé mercure

4.1.5 Vénus

Planète connue depuis l'antiquité sous le nom "d'étoile du berger" du fait de sa grande luminosité. Cette "étoile" est la plus brillante grâce à son albédo très importante (0.78). En effet d'épaisses couches de nuages blanchâtres aux propriétés mal connues nous cachent constamment la surface de notre planète soeur (reproductibilité du modèle terrestre de par la similitude de masse et de rayon).

Plus de 20 missions spatiales témoignent du grand intérêt porté à Vénus (USA - survols et cartographie radar par la sonde Magellan. URSS - atterrissage, photo du sol, vols ballon.)

Cependant les sondes ne résistent que quelques dizaines de minutes, la température au sol étant de ~750 K et la pression de ~ 92 atm. Quels peuvent être les facteurs d'évolution qui aboutissent à de telles différences entre deux planètes jumelles ?

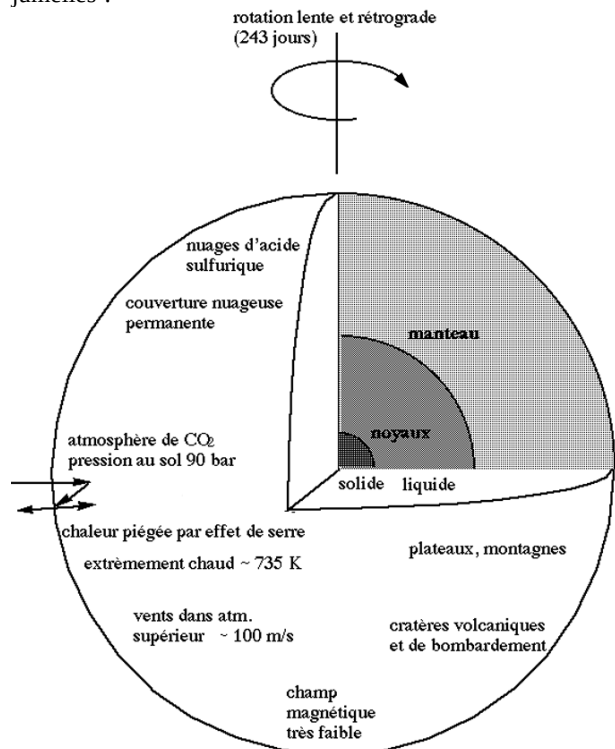


Fig. 4.10 résumé vénus

Vénus accomplit sa révolution autour du Soleil en 224 jours et sa rotation sur elle-même s'effectue dans le sens rétrograde et en -243.01 jours ! (D'ailleurs de par sa faible vitesse de rotation la planète présente un aplatissement nul). De plus lors des conjonctions inférieures, Vénus présente toujours la même face à la Terre - est ce un phénomène de résonance ou un hasard ? En fait l'analyse des mouvements relatifs de la Terre et de Vénus autour du Soleil au cours d'une période synodique (temps séparant 2 conjonctions inférieures), égale à 588 jours, montrent qu'il existe une pseudo-synchronisation entre la rotation propre de Vénus et celle de la Terre.

C'est apparemment le même méridien qui a chaque conjonction inférieure, pointe vers la Terre. Une synchronisation réelle correspondrait à une valeur de la période de rotation de Vénus égale à 243,16 jours. En fait, la période égale à 243,01 jours, ne correspond pas à la valeur de synchronisation. Il n'y aurait donc pas de phénomène de résonance entre le mouvement de rotation de la Terre et celui de Vénus.

activité tectonique : La présence de montagnes (de type Appalaches) pose la question de la possibilité d'une activité tectonique sur Vénus (avec présence de mouvement horizontaux, de dorsales...). Cependant, il n'y a probablement pas d'activité tectonique, car la température de surface est très élevée (atmosphère) et la lithosphère ne peut refroidir au point d'atteindre une "poussée négative".

Activité volcanique : Mont Maat : il y a eu "récemment" formation de lave ; ce qui met en évidence qu'il y a eu une activité volcanique dans le passé sur Vénus. Ainsi on peut dire que Vénus est vivante.

Processus de "gradation" : On peut se demander d'après les cartes radar si la surface de Vénus n'accueillait pas autrefois des océans (aujourd'hui : pas d'H₂O). L'érosion éolienne est peu importante (malgré la température et la pression élevée) car les vents sont faibles .

cratérisation par bombardement : La cartographie par la sonde Magellan a montré 3 cratères qui sont peut être d'origine météorique (Ø de 30 à 60 km).

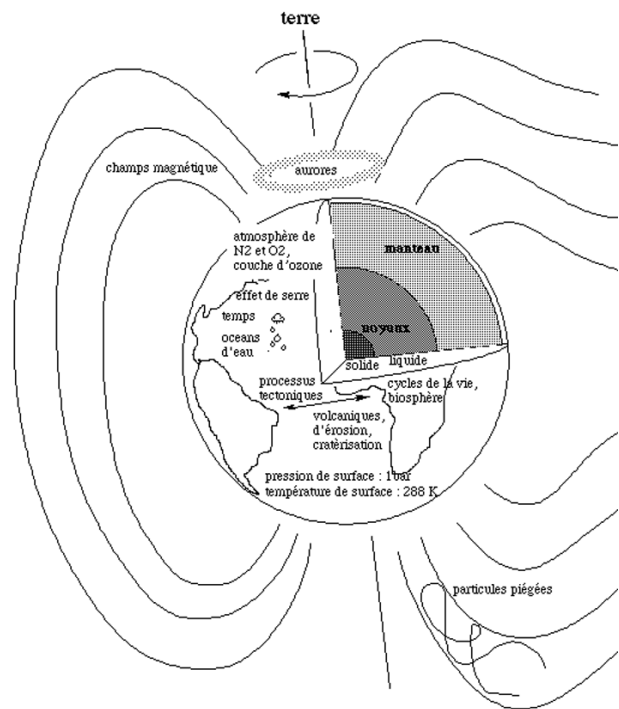


Fig 4.11 resumé terre

masse	$5.97 \times 10^{24} \text{ Kg}$
rayon	6378 Km
densité moyenne	5.52 g/cm^3
période de rotation	23 h, 56mn, 4s
période orbitale	365.26 jours
distance moyenne au soleil	$1.00 \text{ UA} = 149.6 \times 10^6 \text{ km}$
atmosphère, pression au sol	atmosphère secondaire, N ₂ , O ₂ , 1 bar
champ magnétique à la surface	0.35 gauss
satellites	1

4.1.6 Terre et Lune

La Terre : La surface de la Terre a été formée par les différents processus décrits plus haut : processus tectoniques, volcaniques, d'érosion, et bombardement mais aussi ...

• rayonnement e-m reçu du Soleil par la terre	$1.7 \cdot 10^{17} \text{ W}$
- énergie de la circulation atmosphérique	$2.4 \cdot 10^{15} \text{ W}$
- énergie dans l'évaporation de l'eau $\sim 1 \text{ (m}^3/\text{m}^2) / \text{an}$	10^{14} W
- puissance de la biosphère/photosynthèse	$\sim 10^{14} \text{ W}$
(énergie chimique 1 kg/m^2 d'hydrate de carbone par an ($\ll 10^{-3} / \text{an}$ est stocké -> réserves fossiles))	
• radioactivité (30°/km -> énergie -> chaleur)	$\sim 3 \cdot 10^{13} \text{ W}$
• énergie rotative dissipée par les marées	$2.8 \cdot 10^{12} \text{ W}$
• énergie transformée pendant aurores/ orages magnétiques (comparaison : une centrale électrique produit $< 10^{10} \text{ W}$)	10^{12} W
• météorites : ~ 10000 tonnes par an tombent sur la Terre, supposons : $v \sim 20 \text{ km/s}$ (p.e. E "meteor-crater" $\sim 2 \cdot 10^{16} \text{ J}$ "Trinity" bombe A $\sim 8 \cdot 10^{13} \text{ J}$)	$\sim 10^8 \text{ W}$
• civilisation : nous consommons 10t pétrole/an $\sim 13 \text{ kW}$ (41 MJ/kg pétrole; par 10^9 hommes un jour, quand tout le monde voudra dépenser les 10 t pétrole/an la consommation sera 10^{14} W ; c'est relâcher l'énergie de la photosynthèse/énergie solaire stockée)	$\sim 10^{13} \text{ W}$
=> nous avons commencé à transformer la surface d'une planète	

Table 4.2 : estimations de l'ordre de grandeur des puissances transformant la surface de la Terre (comparez aussi avec les puissances du soleil, de la Galaxie etc -> annexe 7.3)

La Lune : Déjà à l'oeil nu, on distingue deux types de surfaces sur la lune - des régions claires, les "continents" et, plus sombres, les "mers". Quel est la nature de ces régions ? Les mers, par exemple, sont-elles de vrais océans d'eau ? Essayez vous même de répondre à cette question après avoir regardé la lune à l'oeil nu. Si les "mers" étaient des océans d'eau, on devrait observer des éclats de lumière par la réflexion du soleil sur le plan d'eau. Il y a forcément un endroit sur la sphère lunaire (défini par la géométrie soleil-lune-observateur) qui satisfait la condition de réflexion. Malgré l'apparent "clair de lune", la surface lunaire est loin d'être un bon réflecteur - son albédo moyenne est de 12% seulement. Les 400 kg d'échantillons de surface ramenés par les missions Apollo et Luna permettaient d'étudier les roches des mers et des continents, mais aussi la poussière qui recouvre partout la surface - le régolithe. Cette couche à une épaisseur de 5 - 10 m. L'absence d'atmosphère permet aux micrométéorites et aux particules chargées⁴ de transformer directement la surface - c'est à dire de pulvériser les rochers de surface. Ce "vieillessement" se traduit par un assombrissement de la surface.

Les continents couvrent env. 80% de la lune. Énormément cratérisées, ce sont les surfaces les plus vieilles : elles ont été formées depuis l'origine de la lune jusqu'à 3.8 milliard d'années. Riches en feldspaths, ces régions sont relativement claires.

⁴ Le flux de particules chargées consiste en trois composantes principales : les protons de basse énergie du vent solaire [$E \sim 1 \text{ keV}$] qui pénètrent très peu, les protons énergétiques du soleil [$E \sim 1 \text{ MeV}$ et au delà], moins intense, qui pénètrent jusqu'à qq. μ dans le régolithe, et le rayonnement cosmique galactique qui est encore moins abondant mais extrêmement énergétique [$E \sim 1 \text{ GeV}$ et au delà], il pénètre $> 1 \text{ m}$ dans le sol lunaire.

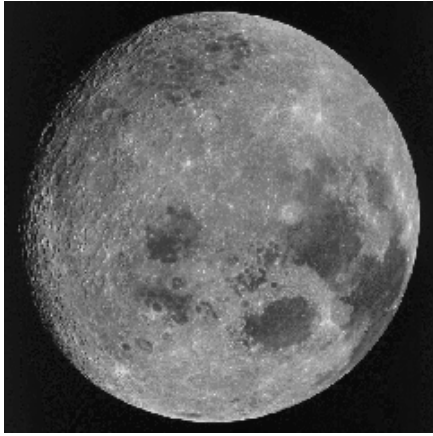


Fig 4.12 La Lune vue par Apollo 17

Les mers couvrent environ 16% de la surface lunaire - elles sont concentrées sur la partie visible de la lune. Ils sont souvent à peu près circulaires, bordées de régions accidentées. L'apparition des bassins d'impact remonte à la dernière phase du bombardement météoritique intense (Fig 4.13 et Fig 4.14). Les cavités issues de ce bombardement ont, par suite, été comblées par de la lave remontée à la surface (=>bassins et mers). Les roches y sont basaltiques et datent d'entre 3.8 et 3.1 milliards d'années - ces rochers volcaniques sont plus "jeunes" que les surfaces des continents et apparaissent plus sombres.

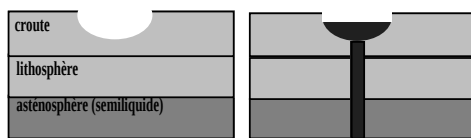


Fig. 4.13 L'origine des mers - à gauche : l'impact d'un météorite à creusé un cratère. Le déficit en masse produit des tensions dans la lithosphère (comme si on ajoutait la masse manquante à la surface). à droite : les tensions produisent des fissures dans la lithosphère par lesquelles la lave monte.

Selon leur taille, on appelle les formations circulaires des *cratères* ($\varnothing < 10$ km), *grand cratères* ($10 < \varnothing < 200$ km) ou *bassins* (200 km $< \varnothing$). Une observation aux jumelles peut nous montrer que la Lune ne peut pas avoir d'atmosphère: Les contours des cratères sont extrêmement nets. S'il y avait une atmosphère, elle produirait des conditions d'aube et de crépuscule (p.e. une vallée peut être plongée dans une lumière diffuse avant le lever du soleil) - donc des transitions plus fondues entre lumières et ombres.

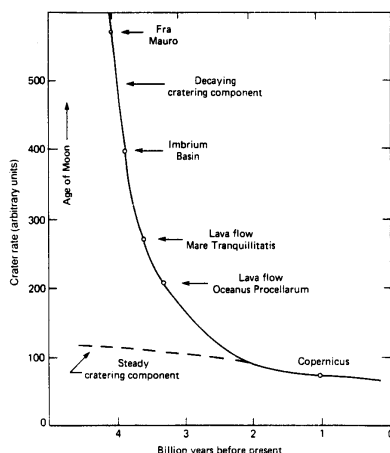


Fig 4.14 : données des missions Apollo : l'âge de rochers trouvés (datation par "horloges radioactives") en fonction de la densité en cratères d'une surface. On déduit : Le terrain le plus cratérisé est le plus ancien dans l'histoire du système solaire.

4.1.7 Mars

La planète effectue sa rotation propre en 24 h 37 mn ! L'inclinaison de l'axe de rotation sur son orbite de révolution autour du Soleil (en 1.8 ans) est la même que la Terre; il existe donc des saisons Martiennes. Au début de l'observation au télescope, on pensait que la variation saisonnière de taches était en fait révélatrice de la présence de vie sur Mars. L'hypothèse de la vie sur Mars se vit confortée par l'observation de canaux. Ces canaux observés par Schiaparelli en 1871, puis par Flammarion en 1882 devaient irriguer des plaines et donc être révélateur de construction martienne. Mais les photographies obtenues avec des télescopes et enfin les sondes spatiales n'ont montré ni canal, ni construction, ni vie organique.

Caractéristiques principales : Les hémisphères martiennes sont asymétriques (plus de cratérisation sur l'hémisphère sud - surface plus vieille)

L'un de ces volcans : Olympus Mons a des dimensions gigantesques, avec plus de 600 km de $\varnothing$ il culmine à environ 27 km. Sur Mars aucune formation montagneuse ne témoigne d'activité tectonique.

Des traces d'érosion (photographies des orbites Viking) nous montrent qu'autrefois il y avait de l'eau, des rivières, sur Mars. Aujourd'hui toute l'eau de Mars se trouve sous forme de glace et est située dans les calottes polaires.

Cependant on a observé dans Noctis Labyrinthus des "brouillards", des nuages matinaux d' H_2O ! Néanmoins même lorsqu'on pensait encore aux canaux on savait que les parties sombres n'étaient pas des mers. Car il n'y a pas de réflexion du Soleil pendant les conjonctions.

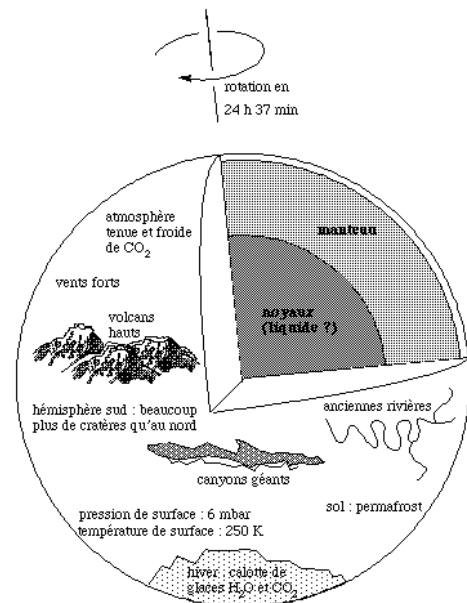


Fig 4.15 résumé mars

masse	$6.4 \times 10^{23} \text{ Kg} = 0.107 M_T$
rayon	3397 Km = 0.532 R_T
densité moyenne	3.93 g/cm ³
période de rotation	24.62 jours
période orbitale	686.96 jours
distance moyenne au soleil	1.523 UA
atmosphère, pression au sol	atmosphère secondaire, CO ₂ , 6 mbar
champ magnétique à la surface	pas encore détecté avec certitude
satellites	2

Phobos et Deimos : “Prévu” par certains auteurs, qui ont raisonné par analogie (J. Swift 1720/ Voltaire 1750). Les deux lunes de Mars ont été découvertes en 1877 par A. Hall à l’aide de la lunette la plus puissante de l’époque. Ils tiennent leurs noms de la mythologie grecque, ce sont les chevaux qui tirent le char de Ares (Mars).

	dist. de mars en rayon martiens	T _r révolution = rot. propre	
Phobos	2.7 r	7 H 39 min	freiné : T _r < 24.6 h
Deimos	6.9 r	30 H 18 min	accélééré : T _r > 24.6 h

Les deux satellites tournent en rotation synchrone par rapport à Mars, c’est à dire qu’ils présentent toujours la même face à la planète. Les phénomènes de marées que Mars exerce sur Phobos (bourrelets équatoriaux) le freine, ainsi dans 30 ou 100 millions d’années, le satellites éclatera à la limite de roche ou s’écrasera sur la planète.

4.1.8 Les Atmosphères

definitions :

Atmosphère : c’est l’ensemble des couches gazeuses situées au-dessus du relief de l’astre.

Atmosphère primaire : Atmosphère qui s’est formée en même temps que le système solaire. Elle est généralement composée de 90% d’hydrogène et de 10% d’hélium (ex : Jupiter)

Atmosphère secondaire : atmosphère qui s’est formée par dégazage ou par évolution chimique et biologique du relief de l’astre. Typiquement elle est composée de H, H₂O, CO₂, O₂, N₂ ... (ex : Vénus/Terre)

Composition d’une atmosphère

On peut estimer grossièrement la composition d’une atmosphère planétaire en supposant qu’un composant ne peut être présent que si l’énergie thermique des molécules est très inférieure à l’énergie requise pour franchir le potentiel gravitationnel; c’est à dire quand la vitesse thermique est nettement inférieure à la vitesse d’échappement.

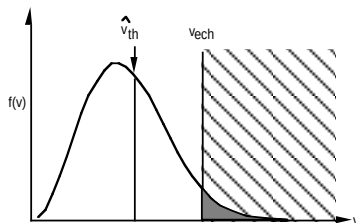


Fig. 4.16 : Seulement les molécules de gaz ayant une vitesse thermique nettement inférieure à la vitesse d’échappement vont se retrouver dans l’atmosphère d’une planète.

Pour une planète qui possède une atmosphère, la température qui importe n’est pas la température de surface mais celle à l’exobase. L’exobase est définie par l’altitude où la densité intégrée de l’atmosphère résiduelle correspond à un libre parcours moyen pour un atome rapide (le libre parcours moyen étant la distance parcourue par une particule entre deux collisions)

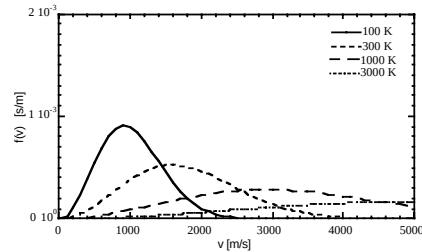
avec : k : constante de Boltzman 1.38·10⁻²³ JK⁻¹
μ : u.m.a. 1.66·10⁻²⁷ kg
G : constante de gravitation 6.67·10⁻¹¹ Nm²kg⁻²
A : nombre de masse
R : rayon de l’astre
T_{ex} : température à l’exobase de l’atmosphère
M : masse de l’astre

exemple simpliste : Quelles molécules peuvent rester dans l’atmosphère de la terre ? (T_{ex} ≈ 900°K, M = 6·10²⁴kg, R = 6.4·10⁶m).

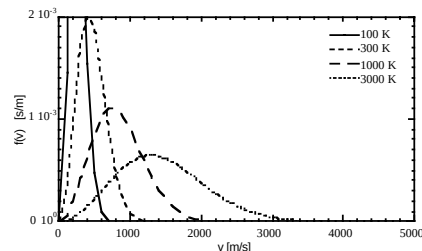
$$v_{ech} = \sqrt{\frac{2GM}{R}} \approx 11 \text{ km/s} \quad 4.5$$

$$v_m = \sqrt{\frac{2kT}{\mu A}} \approx 1/\sqrt{A} \cdot 3.9 \text{ km/s}$$

Une particule s’échappe rapidement si v_m > v_{ech} ; pour qu’une molécule reste dans l’atmosphère pendant plusieurs 10⁹ années nous supposons naïvement qu’il suffit que v_{ech} > 6·v_m. Pour les paramètres ci-dessus, les molécules avec A > (6·v_m/v_{ech})² ≈ 4 resteront dans l’atmosphère, tandis que l’Hydrogène moléculaire et l’Hélium s’échapperont.



hydrogène moléculaire



air

Fig. 4.17 : distributions de Maxwell : les vitesses thermiques des molécules d’hydrogène et d’air pour plusieurs températures.

Température d’équilibre des planètes telluriques

$$T_p = \sqrt[4]{T_s^4 \cdot \frac{r_s^2}{4d^2} \cdot (1 - A)} \quad \text{voir eq. 3.5}$$

T_p température globale moyenne / équilibre de rayonnement
r_p rayon de la planète
d distance soleil - planète
r_s rayon du soleil (7·10⁸ m)
T_s température à la surface du soleil (5850 K)

	Terre	Vénus	Mars
Rayonnement solaire			
reçu	345 W/m ²	660 W/m ²	
réfléchi	103 W/m ²	515 W/m ²	
=> absorbé	242 W/m ²	145 W/m ²	
A	0.3	0.78	0.15
r _p	6.4·10 ⁶ m	6.05·10 ⁶ m	3.4·10 ⁶ m
d	1.5·10 ¹¹ m	1.1·10 ¹¹ m	2.3·10 ¹¹ m
Température			
T _p calculé (2.37)	255 K	225 K	220 K
T mesuré	288 K	742 K	225 K
écart	33 K	517 K	5 K

Quelle est la raison pour cet écart, et pourquoi est-il si important sur Vénus ? Pour ces trois planètes, comparons leur

composition de l’atmosphère	Terre	Vénus	Mars
N ₂	77%	4%	2.7 %
O ₂	21%	<0.003%	0.13 %
H ₂ O	1.5%	<0.02 %	0.03 %
CO ₂	0.03%	92 %	95 %
pression	1 bar	92 bar	8 mbar
L’effet de serre sur terre			

Du au réchauffement par le rayonnement solaire la température du sol terrestres est de T_t ≈ 288 K. Un corps noir à T_t émet

son maximum d'intensité à $\lambda_{tmax} \approx 10 \mu$. Tandis que l'atmosphère est transparente à $\sim 0.4 \mu$ (le maximum d'intensité du rayonnement solaire, $T_s = 5850 \text{ K}$) à 10μ l'atmosphère terrestre est partiellement opaque.

$$\lambda_{max} = \frac{2.89 \cdot 10^{-3}}{T} \text{ [m]} \text{ loi de Wien (par. 3.1.2)} \quad 4.10$$

Modèle simple d'une serre

Un tiers du rayonnement émis par le sol de la serre est renvoyé par la verrière. (Fig. 4.18 : pas de convection, la température du verre est la même à l'intérieur et à l'extérieur)

B_s flux énergétique incident absorbée au sol
 B_e émittance du sol

$$\begin{aligned} \text{rayonn. incident total} &= \text{rayonnement émis} \\ B + B_e/3 &= B_e \end{aligned} \quad 4.11$$

$$\begin{aligned} B_e &= 3/2 B \\ T_{\text{serre}} &= 1.5^{1/4} T_{\text{ext}} \quad (B = \sigma T^4) \quad 4.12 \\ &= 1.1 T_{\text{ext}} \end{aligned}$$

Exemple :

pour une température extérieure de 0°C ($T_{\text{ext}} = 273 \text{ K}$), il fera environs 27°C ($T_{\text{serre}} = 300 \text{ K}$) à l'intérieur de la serre.

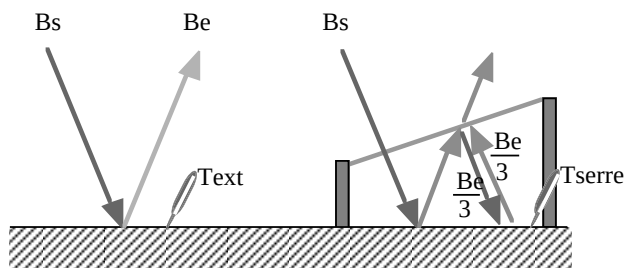


Fig. 4.18 : équilibre du rayonnement au sol d'une serre idéalisée

4.2 LES PLANETES GEANTES ET LEURS SATELLITES

Les points communs entre les planètes extérieures sont (voir Tab 4.1) leur :

- Grand diamètre
- Faible densité
- Nombreux satellites
- Présence d'anneaux

Comment peut-on comprendre qualitativement la similitude entre planètes extérieures, et leur différence avec les planètes telluriques ?

Les planètes ont pu se former dans le disque protoplanétaire d'abord par condensation chimique (jusqu'à quelques cm) puis par l'accrétion de grains par instabilité gravitationnelle qui produit les planétoïdes. Comme les planètes extérieures sont loin du Soleil, la température est assez basse pour que les glaces ne se subliment pas. Ceci permet la formation de noyaux très massifs, mais de faible densité. La distance au Soleil (T basse) et la grande masse (g important) des planètes extérieures ont pour conséquence que les gaz de H et He ne peuvent pas s'échapper : leur atmosphère est donc primaire.

L'étude de la composition de ces planètes est un moyen de comprendre la formation du système solaire : elle permet de remonter aux conditions (physiques/chimiques) de la nébuleuse primitive.

La composition des planètes extérieures aura donc des implications pour la cosmologie.

4.2.1 Les Atmosphères des Planètes Géantes (Exemple Jupiter)

Les atmosphères de Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune étant similaires, on se limitera à l'exemple de Jupiter. Cette planète tourne autour du Soleil en 11.86 ans, et parcourt donc à peu près une constellation par an. Etant donnée son énorme dimension (11 RT), sa rotation est extrêmement rapide (9h55min). Sa masse représente "seulement" 318 fois la masse de la Terre, à cause de l'abondance d'hydrogène, très léger, sur Jupiter. C'est Galilée qui, en 1609, découvrit ses quatre grands satellites (les satellites galiléens). Leurs mouvements autour de Jupiter ont été une "preuve" que tout ne tournait pas autour de la Terre !

Outre les observations astronomiques, Jupiter a été étudiée par 5 missions d'exploration satellites :

- deux sondes Pioneer (10 et 11),
- deux sondes Voyager (1 et 2),
- et Galileo (1989 - 1999)

Les couleurs vives de Jupiter : On peut observer à sa surface une structure en bandes allongées, parallèles à l'équateur, et de nombreuses taches. Les nuages de Jupiter sont très denses et très colorés, allant du rouge au brun, avec quelques teintes blanches ou bleues. L'atmosphère est principalement constituée de H_2 et He. Les autres constituants les plus importants sont le méthane (CH_4) et l'ammoniac (NH_3).

Les nuages hauts et blancs correspondent à des cristaux de NH_3 en équilibre thermochimique à une altitude définie.

En effet, à l'équilibre thermochimique :

- si on sait qu'un constituant est présent (grâce à la spectroscopie)
- si on connaît son abondance (grâce à l'intensité des raies obtenues)
- si on connaît sa courbe de saturation, par une expérience en laboratoire (courbe $P = f(T)$)
- si on connaît le profil thermique de l'atmosphère de la planète considérée

on peut alors évaluer l'altitude (correspondant à une valeur de la pression bien précise) où ce constituant doit se condenser, c'est-à-dire où le gaz devient nuage.

Les pressions (on en déduit les différentes altitudes) où se condensent ces constituants sont :

$$\text{NH}_3 \quad P = 0.5 \text{ Bar}$$

NH₄SH, NH₄OH
H₂O

P = 2 Bars
P = 5 Bars

La "surface" visible de Jupiter correspond donc au sommet d'une première couche de nuages constitués de cristaux de NH₃.

Zones et bandes : La lumière émise par le disque de Jupiter en infrarouge a montré que les bandes sombres et claires qui alternent correspondent à des nuages d'altitudes différentes. Les divisions ne sont cependant pas nettes, tout semble recouvert par un manteau supérieur de cirrus blancs : ce sont les nuages d'ammoniac.

Les bandes claires sont appelées *zones*, par opposition aux *bandes* (sombres), appelées aussi ceintures.

Les zones, plus élevées et plus froides que les bandes, sont le siège de vents anticycloniques (mouvement ascendant) ; à leur sommet se trouvent les nuages blancs d'ammoniac.

Au niveau des bandes, les gaz, libérés de leurs vapeurs condensables, descendent. Ce mouvement descendant correspond à des vents cycloniques.

Ce régime convectif montre qu'il existe une source de chaleur interne dans Jupiter. En effet, la température de Jupiter (1500 K, "surface" de l'atmosphère) est très supérieure à la température d'équilibre de rayonnement théorique due au Soleil. Jupiter produit donc une énergie supplémentaire (voir structure interne ci-dessous)

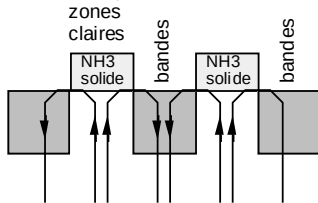


Fig 4.20 Zones et bandes : manifestation d'un régime convectif sur Jupiter

Dynamique de l'atmosphère

La structure de l'atmosphère présente une très forte symétrie axiale. Les vitesses des vents peuvent être définies par rapport au champ magnétique. La rotation est extrêmement rapide (9 h 55 min) - en présence du régime convectif, elle provoque des forces de Coriolis intenses (vitesse typique à l'équateur ≈ 130 m/s). Les mouvements verticaux Nord-Sud (présents sur Jupiter comme sur Terre) se transforment en mouvements horizontaux Est-Ouest. Les vents courent dans le sens de rotation de Jupiter mais aussi dans le sens inverse. La largeur des zones est inversement proportionnelle aux forces de Coriolis : cette largeur diminue donc avec la latitude. C'est pourquoi on observe des bandes minces vers les pôles et des bandes plus larges à l'équateur.

Le rapport Deutérium / Hydrogène

Les modèles pour le Big Bang indiquent que le rapport D/H (Deutérium/Hydrogène) au moment du Big Bang dépend de la densité des nucléons produits. Connaissant la masse totale de nucléons (protons et électrons) produits dans l'explosion initiale, on peut tenter de répondre à la question - l'Univers est-il "ouvert" (expansion continue) ou "fermé" (big crash). Un Univers fermé (préféré par les théoriciens) nécessite une densité de nucléons d'au moins $5 \cdot 10^{-30}$ - $2 \cdot 10^{-29}$.

Dans les planètes géantes par contre, le rapport D/H a dû rester constant depuis leur formation.

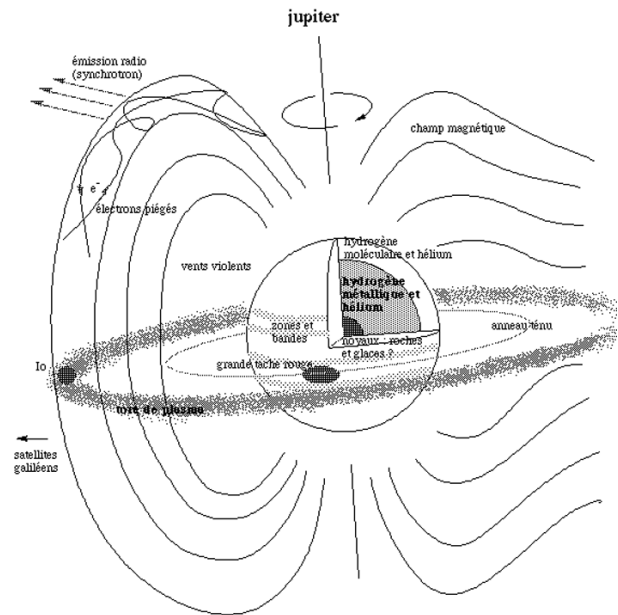


Fig 4.19 résumé Jupiter

masse	$1.89 \times 10^{27} \text{ Kg} = 317.8 \text{ M}_T$
rayon	71492 Km = 11.21 R _T
densité moyenne	1.33 g/cm ³
période de rotation	9.84 heures
période orbitale	11.86 ans
distance moyenne au soleil	5.20 UA
atmosphère, pression au sol	primaire, H, H ₂
champ magnétique à la surface	4.3 gauss
satellites	≥ 28

En observant les planètes géantes, on peut tenter de faire une estimation de cette quantité et donc répondre à des questions de cosmologie.

L'observation spectroscopique des planètes géantes montre que le rapport D/H y est plus important (5 à 8 fois plus) que dans le milieu interstellaire. En effet, les étoiles consomment le Deutérium, probablement suivant la réaction de fusion :

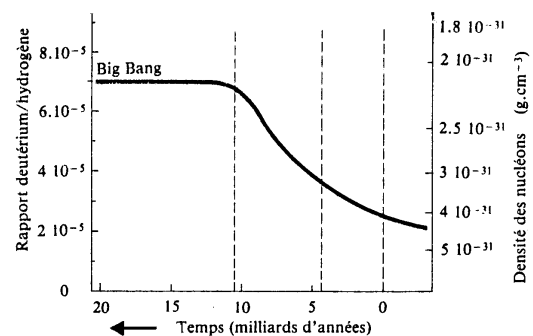
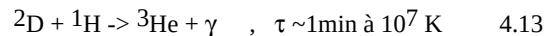


Fig 4.21 : Variation du rapport D/H dans le milieu interstellaire.

On peut mesurer le rapport D/H actuel, à partir des observations du milieu interstellaire, et on le connaît à l'époque de la formation du système solaire, il y a 4.5 milliards d'années, à partir des mesures actuelles sur Jupiter et Saturne. Maintenant on peut essayer d'estimer le rapport D/H au moment de la formation de la Galaxie, il y a $\sim 10^9$ ans. La valeur obtenue est de $\sim 7 \cdot 10^{-5}$ et correspond à une densité des nucléons de $2.2 \cdot 10^{-31}$ - indiquant un univers ouvert.

4.2.2 La Structure Interne des Planètes Géantes

La structure interne des planètes géantes est encore mal connue. A l'heure actuelle, on ne peut formuler que des hypothèses. Exemple, Jupiter : elle est essentiellement composée d'hydrogène et d'hélium. Ces gaz se compriment sous leur propre poids. A la pression de 2.10^6 atm (à environ 8500 km au-dessous du niveau des nuages visibles), l'hydrogène devient

probablement métallique et la densité saute brusquement de 1.1 à 4. Le noyau solide se trouve à 57 000 km au-dessous des nuages visibles, à des pressions de $45 \cdot 10^6$ atm, à la température de 20 000 à 30 000 degrés. Ce noyau est probablement composé de fer et de silicates, avec peut-être des glaces d'eau, d'ammoniac ou de méthane (densité ≈ 15).

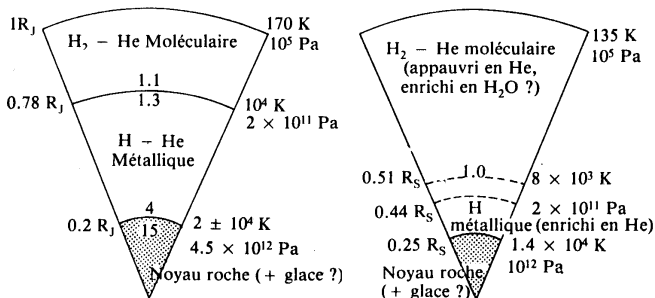


Fig 4.22 : la structure interne de Jupiter (gauche) et Saturne (droite)

Dans le cas des planètes géantes, le rapport énergie émise sur énergie reçue du Soleil est supérieur à 1 (Jupiter : 1.2 ; Saturne : 2.2). L'énergie supplémentaire provient d'effets de contraction gravitationnelle (contraction liée à l'effondrement ou différenciation interne entre éléments lourds/légers). Dans le cas de Saturne, on croit que cette source de chaleur peut provenir de pluies d'hélium liquide qui peuvent se former par condensation dans l'hydrogène métallique. Ces gouttes tombent en convertissant leur énergie gravitationnelle en énergie cinétique qui est finalement dissipée en chaleur par le frottement (goutte-atmosphère). Ce modèle est supporté par l'observation des couches supérieures de Saturne qui témoignent d'un appauvrissement en He par rapport à Jupiter ou au Soleil.

4.2.3 Les Anneaux (Exemple Saturne)

Depuis les missions Voyager nous savons que *toutes* les planètes géantes présentent des anneaux. Les plus remarquables restent pourtant ceux de Saturne ; ils seront discutés dans ce qui suit.

A partir d'environ 7000 km au-dessus de la couche supérieure des nuages de Saturne (qui a un rayon de 60300 km), les principaux anneaux s'étendent sur plus de 74 000 km. Ils ont été appelés D, C, B, A, F, G, E (du plus proche au plus éloigné de Saturne, l'ordre de cette appellation suit l'ordre chronologique des découvertes).

Depuis la Terre, on peut observer la *division Cassini*, séparant l'anneau B (très brillant) de l'anneau A (plus sombre). Pioneer 11 a permis de découvrir les anneaux C, D, F. L'anneau F est large de seulement 500 km et borde extérieurement l'anneau A. Tandis que ces anneaux ont un aspect à peu près homogène si on les observe depuis la Terre, les images des sondes nous montrent que les anneaux sont composés de centaines d'anneaux qui se divisent eux mêmes en structures encore plus fines.

La composition des anneaux

Ils sont formés de particules de glace d'eau, dont le diamètre va de 1 µm jusqu'à 1 km; la plupart des particules ont des dimensions entre 1 et 10 cm. Les grandes particules, pourtant moins nombreuses, portent la plus grande partie de la masse.

La masse totale des anneaux correspond environ à celle d'un satellite de Saturne, style Dioné (diamètre: 1120 km, $\rho = 1.4$). La température mesurée de ces "icebergs" s'élève à 70-90 Kelvins, selon l'ensoleillement.

En exagérant les contrastes par les méthodes de traitement d'images, on observe de grandes différences de "couleur" entre les anneaux (photos Voyager). On n'a pas encore pu relier ces contrastes à des différences de composition chimique de la surface des particules constituant les anneaux. Les différentes

"couleurs" montrent pourtant que le transport de grains entre anneaux n'est pas un effet dominant.

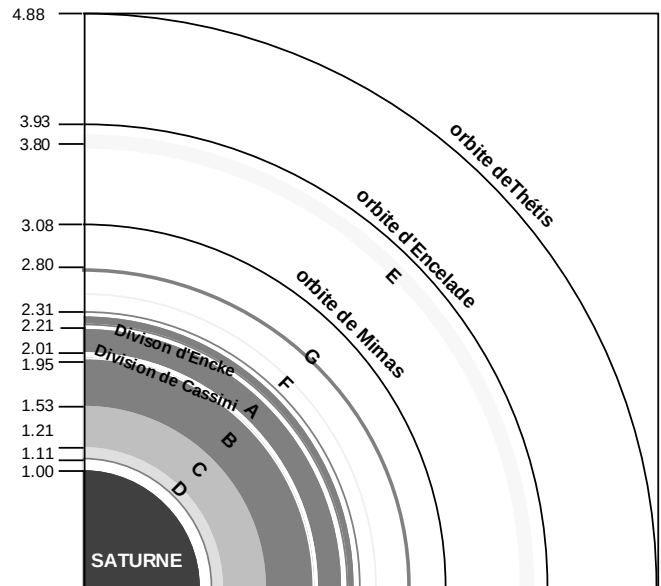


Fig. 4.23 : Les anneaux de saturne

La structure des anneaux

L'épaisseur des anneaux est extrêmement fine : 20 mètres en moyenne. Comment peut-on expliquer ce fait - pourquoi les anneaux sont-ils dans *un* seul plan ? (voir section 2.4)

On a vu ci-dessus qu'il ne semble pas exister de circulation radiale des particules d'un anneau à l'autre. Les anneaux possèdent des bords très nets, et il existe en fait des milliers d'anneaux minces nettement séparés. Il semblerait qu'un mécanisme de confinement de la matière soit à l'origine de ce phénomène. Les responsables de ce confinement seraient de petits satellites, ou de grosses particules (environ 1 km), qui auraient créé des divisions sombres, vides de matière, repoussant les anneaux voisins. L'étude théorique de l'interaction d'un satellite et d'un anneau formé de particules en collision, montre que les deux se repoussent.

Ainsi l'anneau F tient en orbite, malgré de très faibles largeur et épaisseur, grâce à deux satellites "gardiens" qui contraignent les particules constituant l'anneau F à rester à l'intérieur d'une bande étroite. Le satellite gardien le plus proche de la planète est le plus rapide et accélère les particules de l'anneau ($\Rightarrow$ particule décrit une spirale vers l'extérieur), le plus éloigné, plus lent, ralentit les particules ($\Rightarrow$ particule décrit une spirale vers l'intérieur) ; cette double interaction entraîne la stabilité de l'anneau.

Les "traces de doigts" : Ce sont des structures radiales qui ont plus de 20 000 km de long. Elles sont continuellement formées, détruites et reformées. Il s'agirait de manifestations d'orages magnétiques au sein des anneaux, créés par le champ magnétique de Saturne.

Origine des anneaux

Autour de Saturne (et des autres planètes massives), il existe une limite en deçà de laquelle un corps stabilisé par gravitation est brisé en morceaux par les effets de marées : c'est la *limite de Roche*. Sur Saturne, aucun gros satellite ne peut subsister à moins de 140'000 km du centre de Saturne. Les anneaux A, B, C et D se trouvent tous à moins de 140.000 km de Saturne.

Exemple : calcul de la limite de Roche de Saturne d_R (pour un satellite avec $\rho = 1.1g/cm^3$)

avec M :	$5.7 \cdot 10^{26}$ kg	masse de Saturne
ρ :	$1.1 \cdot 10^3$ kg/m ³	densité de Encelade

$$\Rightarrow d_R \geq \sqrt[3]{\frac{11.1M}{\pi\rho}} = 122'000 \text{ km } (-> \text{eq 2.32})$$

On ne sait toujours pas si les anneaux sont composés du matériau primitif qui existait au moment de la formation de Saturne et qui n'a jamais pu s'agglomérer aussi près de la planète à l'intérieur de la limite de Roche, ou bien s'il s'agit d'un corps capturé plus tard par Saturne qui aurait été brisé à l'intérieur de la limite de Roche. Actuellement, les astronomes penchent plutôt pour la première hypothèse.

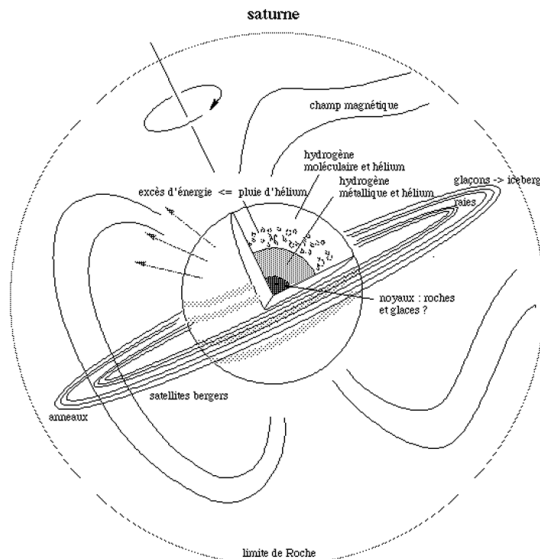


Fig. 4.24 résumé Saturne

masse	$5.68 \times 10^{26} \text{ Kg} = 95.2 \text{ M}_T$
rayon	$60268 \text{ Km} = 9.45 \text{ R}_T$
densité moyenne	0.69 g/cm^3
période de rotation	10.23 heures
période orbitale	29.46 ans
distance moyenne au soleil	9.52 UA
atmosphère, pression au sol	primaire, H, He
champ magnétique à la surface	0.2 gauss
satellites	≥ 30

4.2.4 Les Satellites des Planètes Géantes (Ex. Jupiter)

En 2002, 28 satellites sont connus - il y en a sans doute d'avantage; 20 satellites lointains sont probablement des astéroïdes capturés. On peut les diviser en quatre familles :

Satellites	demi grand axe	dimension Ø	révolution
4 petits très proches de Jupiter (Adrastée, Métis, Amalthée, Thébée)	0.12-0.22-10 ⁶ km	~10-50 km	directe
4 gros découverts par Galilée en 1610 (Io, Europe, Ganymède, Callisto)	0.4-1.8-10 ⁶ m	~1800-2600km	directe
petits lointains (p.e. Léda, Himalia, Lysthée, Elara)	11-12-10 ⁶ km	~8-90 km	directe
petits plus lointains (p.e. Anaké, Carme, Pasiphaé, Sinope)	21-24-10 ⁶ km	~15-25 km	rétrograde

Nous allons nous intéresser ici aux satellites galiléens. La densité des quatre satellites galiléens décroît régulièrement en fonction de leur distance à Jupiter. Ils ont suivi chacun des évolutions chimiques différentes.

Io : "C'est quoi, cette pizza" ? ont du se demander les scientifiques quand ils ont vu les premières images de Io obtenues par Voyager I en 1979. Io se trouve à 5 fois le rayon de Jupiter, sa densité est de 3.5 - il doit essentiellement être constitué de roches. Io est un satellite avec une surface très jeune (pas de cratères d'impact). Sa surface est composée de

sels cristallisés riches en sodium, de larges dépôts de soufre, de dioxyde de soufre, à différentes températures, d'où des couleurs rouge-jaune.

Voyager 1 a détecté 8 volcans, dont les projections atteignent 70 à 300 km d'altitude, à des vitesses de 300 à 1000 m/s. Les régions volcaniques, très actives, ne présentent pourtant ni dômes, ni reliefs apparents. Les volcans de Io produisent 100 mètres de couches volcaniques par million d'années. C'est pourquoi on n'observe aucun cratère d'impact, bien que l'on trouve des vallées, sillons, montagnes.

Quelle est la raison de l'activité de ce satellite ? Est-ce la désintégration d'éléments radioactifs contenus dans les roches (comme sur la Terre) ? Pour expliquer l'activité de Io avec cette source d'énergie, il faudrait 100 fois plus de thorium et d'uranium que ce que l'on trouve dans les planètes telluriques. Cette hypothèse n'est donc pas très vraisemblable.

Io étant très proche de Jupiter, il subit de très forts effets de marée qui le déforment en ellipsoïde. Si Io était sur une orbite circulaire autour de Saturne cet ellipsoïde pointerait constamment vers Jupiter (voir Lune : couplage spin-orbit 1:1).

Mais Ganymède et les autres satellites déforment l'orbite de Io, qui devient elliptique ; ainsi, la déformation n'affecte pas les mêmes zones de Io pendant sa révolution autour de Jupiter. Ces déformations incessantes provoquent une libération d'énergie à l'intérieur de Io (de l'ordre de 10¹³ watts), d'où un fort volcanisme.

Le tore de plasma de Jupiter : Les volcans de Io éjectent de grandes quantités de soufre et d'oxygène. Ces atomes, qui sont ionisés par le rayonnement U.V. du Soleil s'orientent sous l'effet du puissant champ magnétique de Jupiter, et se répartissent en un énorme tore de plasma de soufre entourant tout Jupiter, au niveau de l'orbite de Io.

Il existe des systèmes complexes de courants électriques entre le tore de plasma et l'ionosphère de Jupiter. La magnétosphère jovienne constitue un immense accélérateur de particules. Ces particules, ions et électrons, sont de très grande énergie. Cela entraîne une forte émission radio, et des aurores polaires sur Jupiter, qui sont associées aux lignes de force du champ magnétique jovien passant par Io. Les électrons ont ainsi un mouvement circulaire qui, vu de la Terre, donne l'impression d'un mouvement ondulatoire (les électrons sont accélérés puis décélérés), d'où la production d'un rayonnement électromagnétique (rayonnement synchrotron).

Europe : C'est le satellite galiléen le plus petit et le plus brillant. Sa surface, la plus lisse de tout le système solaire, est constituée d'une croûte de glace de 50 ou 100 km d'épaisseur. Il existe de nombreuses craquelures et fractures, causées par l'effet de marée de Jupiter. Son noyau est formé de silicates solides, ce qui explique une densité supérieure à 1 ($d = 3.03$). Le reste est constitué d'eau, où flotte la glace : Europe est une sorte de goutte d'eau en suspension.

Ganymède : C'est le plus grand satellite du système solaire. Son diamètre est supérieur à celui de Mercure. Sa densité est très faible ($d = 1.93$). Sa surface est composée de glace, son intérieur de glace et de silicates. On observe des montagnes (environ 1000 m), des vallées parallèles, et de nombreux impacts de météorites. On pense que son activité géologique a cessé il y a 3.5 milliards d'années.

Callisto : Il s'agit peut-être de la plus vieille surface du système solaire (environ 4.6 milliards d'années). C'est le moins actif de tous les satellites, un monde froid, montrant les cicatrices d'innombrables impacts de météorites (cratères d'environ 100 km de diamètre), et sa surface est relativement plate. Il ne présente aucun signe d'activité interne. Sa croûte est dure et épaisse, composée à la fois de glaces et de roches. Son noyau est constitué d'un mélange de glace et de silicates.

les satellites galiléens et la mesure de la vitesse de la lumière par Ole Rømer (1676)

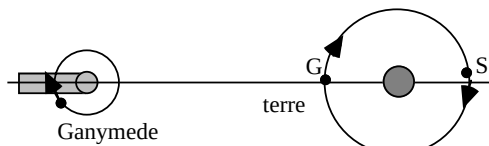


Fig 4.25 : les occultations de Ganymede

L'intervalle observé entre deux occultations de Ganymede est de 171.99 heures (~ 7.4 h) $\Rightarrow$ dans une demie année (pendant que la terre passe de G- $\rightarrow$ S) il y a donc ~ 25 occultations, c.a.d : la 26^{ème} devrait avoir lieu après 25×171.99 heures. Mais en réalité elle a lieu seulement 1000 sec (17 min) après cette prévision car entre-temps, la terre s'est éloigné de 3×10^8 km (point G- $\rightarrow$ S) $\Rightarrow c = 3 \cdot 10^8$ km/1000 sec = $3 \cdot 10^8$ ms⁻¹

4.3 ASTEROIDES, METEORITES ET COMETES

4.3.1 Les Astéroïdes

Historique : Entre Mars et Jupiter s'étend une grande lacune qui partage en deux le système solaire. La publication au 18^{ème} siècle de la "loi" de Titius-Bode amena les astronomes à envisager la présence dans cette lacune d'une planète encore inconnue.

$$D = 0.4 + 0.3 \cdot 2^n \quad [\text{ua}] \quad \text{"loi" de Titius-Bode} \quad 4.14$$

Mercur	n = -∞
Vénus	n = 0
Terre	n = 1
Mars	n = 2
?	n = 3
Jupiter	n = 4
Saturne	n = 5 etc.

avec D : distance planète-Soleil en [ua]
n : numéro associé au corps ou à son orbite.

La lacune en question correspond à n = 3. En 1801, Giuseppe Piazzi découvre un astre ne figurant sur aucune carte qui sera nommé Cérés. Par la suite, d'autres astronomes découvrent d'autres mini-planètes ayant à peu près la même orbite. Actuellement, 18000 astéroïdes ont été identifiés en deux siècles.

Il est important de préciser que la "Loi" empirique de Titius-Bode est précise $\sim$ à 5% près seulement; l'incertitude est encore plus grande pour Neptune et Pluton (22% et 49%). Avec des simulations numériques de systèmes planétaires quelconques (mais formés d'un nuage protoplanétaire) on montre, qu'on trouve toujours une "loi" de la forme générale de 6.1 qui décrit les orbites avec une incertitude de cet ordre.

orbite-localisation : La plupart des astéroïdes se concentrent dans un anneau appelé "ceinture principale" situé entre l'orbite de Mars et celle de Jupiter.

Cependant, dans cet anneau, la répartition n'est pas régulière : il existe des lacunes dites lacunes de Kirkwood, situées à des zones de résonance gravitationnelle où l'attraction de Jupiter interdit aux astéroïdes de se maintenir.

Dans ces lacunes, le rapport de la période de révolution des astéroïdes et de celle de Jupiter correspond à un rapport simple: 1/3, 2/5, 3/7, 1/2.

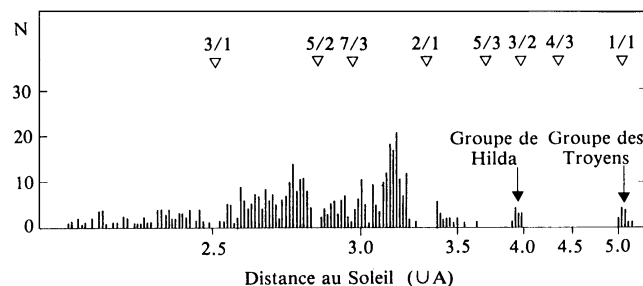


Fig 4.26 : Répartition des astéroïdes dans l'espace interplanétaire en fonction de leur distance au Soleil.

On a mis en évidence cinq grandes familles d'astéroïdes décrivant pratiquement la même orbite et qui résultent vraisemblablement de la fragmentation d'un objet unique. Leurs principaux représentants sont : Flore, Éros, Thémis, Coronis et Maria.

D'autres familles n'appartiennent pas à la ceinture principale :

- les familles situées entre la Terre et Mars : Apollo, Aten, Amor
- les "planètes" troyennes qui se concentrent au voisinage de points dynamiquement stables précédant et suivant la planète Jupiter sur son orbite de 60°: points appelés points de Lagrange L4 et L5.

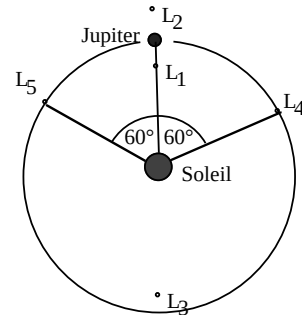


Fig 4.27 Les Points de Lagrange

description : La plupart des astéroïdes ont une forme irrégulière et un pouvoir réflecteur (Albédo) qui n'est pas rigoureusement uniforme en tout point de leur surface. La quantité de lumière qu'ils réfléchissent vers la Terre varie au fur et à mesure de leur rotation, ce qui permet de déterminer leur période de rotation. Leur composition superficielle est de plusieurs types. Les plus importants (type C, S, M) représentent plus de 80% des astéroïdes connus.:

- type C (47%) : surface carbonnée
- type S (35%) : surface silicatée
- type M (3%) : riches en métaux.

13% des astéroïdes n'ont aucune classification, ils sont dit de type U (unclassified ou unknown).

L'origine des astéroïdes : Il existe deux hypothèses : La première correspond à l'explosion d'une planète mère pour des raisons inconnues mais cette hypothèse se heurte à des difficultés : La masse totale de tous les astéroïdes connus est 1600 fois plus faible que celle de la Terre. Cette masse donne une "planète" de seulement 1/20 du rayon terrestre. La deuxième hypothèse serait qu'une planète ne se soit jamais formée, l'accrétion aurait été bloquée à un stade intermédiaire par suite de l'existence d'une instabilité gravitationnelle due à l'attraction de Jupiter.

Conclusion : Les astéroïdes sont des petits corps très anciens dont la matière n'a sans doute guère évolué depuis la formation du système solaire (pas de différenciation interne car ils se sont vite refroidi ayant un rapport surface/volume important). Ils représentent une source précieuse d'informations pour aider à comprendre la formation du système solaire.

4.3.2 Les Comètes

Historique : L'apparition spectaculaire et imprévisible des comètes explique qu'elles aient été regardées, pendant des siècles, comme des messagères des Dieux, annonciatrices de catastrophes. Ces phénomènes étaient difficilement explicables avec la vision d'un ciel incorruptible et immuable.

En 1682, Edmond Halley observe une comète, calcule ses éléments orbitaux grâce à la méthode mise au point par Newton sur l'attraction des planètes ; il reconnaît son caractère périodique en comparant les observations de 1531 et 1607. Il prédit alors son retour pour la fin de 1758. La prévision est vérifiée aux incertitudes de calcul près pour l'époque, elle signifie un autre grand succès pour la théorie Newtonienne.

Orbites cométaires : Les comètes sont originaires du système solaire; elles gravitent initialement autour du Soleil. Elles

peuvent avoir différentes trajectoires d'orbites; on les classe en 3 catégories : Ellipses faiblement allongées, Ellipses moyennement allongées et Ellipses très allongées (quasi-paraboliques ou faiblement hyperboliques).

Dans le cas des orbites très allongées, après leur passage au périhélie du Soleil, certaines de ces comètes, sous l'effet de perturbations gravitationnelles infligées à leur mouvement, viennent à suivre une trajectoire parabolique ou hyperbolique leur permettant d'échapper à l'attraction solaire.

Au contraire, dans certains cas, l'action perturbatrice des planètes géantes, a permis à Jupiter, par exemple, de capturer toute une famille de comètes, en transformant leur orbite en ellipse de courte période.

Les orbites cométaires se caractérisent aussi par leur inclinaison sur l'écliptique : celle-ci est comprise entre 0° et 180°. Si elle est supérieure à 90°, le mouvement de la comète est dit rétrograde.

Description : Les différentes parties d'une comète sont : le noyau, la chevelure et la queue.

le noyau : C'est un agrégat fait de glaces, de poussières et de graviers - c'est une "boule de glace sale". On a pu observer la forme d'un objet oblongue (cacahuètes ou pomme de terre) - ce qui fut réalisé en 1986 pour la comète de Halley mesurant environ 16 km sur 8 km.

Son Albédo est de 0.04 seulement, donc il absorbe pratiquement toute la lumière qu'il reçoit et apparaît donc extrêmement sombre.

C'est à partir de lui que se forme au voisinage du Soleil la chevelure et la queue.

La chevelure ou coma, c'est une nébulosité plus ou moins circulaire engendrée par la libération des gaz et des poussières du noyau à l'approche du Soleil. La glace se sublime (à cause du rayonnement solaire <-> Albédo faible) et les gaz s'échappent en entraînant dans l'espace des poussières et des petits fragments solides. Un noyau peut perdre ainsi quotidiennement plusieurs milliers de tonnes de vapeur d'eau. (En 1986, la comète de Halley éjectait 25 tonnes de H₂O et 5 à 10 tonnes de poussières par seconde.)

La queue : C'est la partie la plus spectaculaire de la comète - mais ce n'est qu'une émanation de la chevelure. Elle est en fait composée de 2 parties :

- la queue de plasma : elle est repoussée par le vent solaire, les ions formés (ionisation) dans la chevelure engendrent dans la direction opposée au soleil une longue queue dite: "queue de plasma". Celle-ci est rectiligne car elle se déplace très rapidement (400 km/s).
- la queue de poussières : les poussières éjectées par le noyau, repoussées par la pression du rayonnement solaire forment une queue jaunâtre, plus large et incurvée. La courbure s'explique par le fait que la comète se déplace sur son orbite pendant que les poussières se déplacent dans la queue plus lentement (de 0.1 à quelques km/s). Dans les 2 cas, la queue est toujours opposée au Soleil.

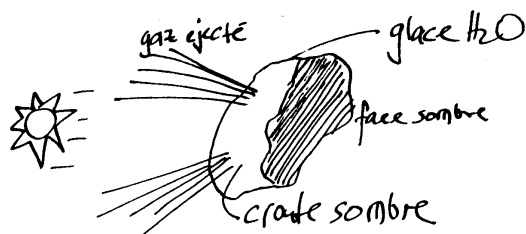


Fig. 4.28 : La comète - une boule de glace sale

L'origine des comètes : La théorie la plus généralement admise est celle développée depuis 1950 par le néerlandais Jan Oort.

L'étude statistique de plusieurs orbites cométaires fait apparaître une prédominance remarquable d'orbites dont l'aphélie se situe à une distance du Soleil comprise entre 40000 et 150000 ua.

Selon Oort, cette zone lointaine du système solaire constituerait un vaste réservoir de comètes, que l'on appelle alors le nuage de Oort.

Sous l'effet des perturbations créées par des étoiles proches ou des nuages moléculaires (on pense aussi que les effets de marée de la Galaxie interviennent), les comètes sortiraient de temps en temps de ce réservoir sphérique.

L'avenir d'une comète : Les comètes peuvent tout d'abord se désagréger périodiquement au passage au périhélie. Leur évolution lente peut être parfois accélérée par la fragmentation de leur noyau.

La comète West en est un exemple (la désintégration de son noyau est due à une différence importante de température entre la partie chaude éclairée et la partie froide sombre.)

Le cataclysme de Tougouska est un phénomène inexplicable qu'on peut attribuer à un morceau de comète (parmi les hypothèses avancées, on trouve la collision avec un astéroïde, une comète ou un mini-trou noir.)

En 1908, à 800 km au nord du lac Baïkal, des témoins ont vu un énorme bolide traverser le ciel puis exploser. La déflagration et l'onde de choc furent si considérables que l'événement à provoqué un signal sismique dans toutes les stations du monde. Les arbres furent arrachés dans une zone de 30 à 40 km de rayon. Par contre on n'a pas trouvé de cratère.

Beaucoup d'hypothèses furent émises, toutefois la plus généralement admise est la suivante :

Un petit noyau (l'orbitographie est en accord avec un morceau de la comète Encke) ayant perdu tous ses matériaux volatils aurait pénétré dans l'atmosphère et s'y serait totalement désintégré à basse altitude, sous l'effet de la compression des couches d'air. L'explosion d'un objet de 40 m de diamètre (30 000 tonnes de glace) correspond en fait à une bombe de 12 mégatonnes TNT.

4.3.3 Les Météorites

Description : Les météores ou météorites sont des fragments de matière solide, d'origine interstellaire. Lors de leur traversée dans l'atmosphère terrestre, les météorites s'échauffent en surface par frottements et ionisent l'air. C'est pourquoi ils laissent une traînée lumineuse sur leur passage que l'on nomme étoile filante. (météorites : arrivent jusqu'à la surface terrestre, météores : sont consumés dans l'atmosphère)

Lorsque l'objet se rapproche du sol, il peut être accompagné d'un phénomène sonore qui est lié à une onde de choc. Cette onde de choc peut provoquer le fractionnement de la pierre. Leur masse peut être comprise entre 1 gramme et 60 tonnes. Les cratères météoritiques visibles sur Terre sont des formations jeunes et sont relativement petits : un des plus grands est le célèbre Meteor Crater dans l'Arizona dont l'âge est évalué à 50000 ans. La quantité d'objets reçue est évaluée à 10000 tonnes par an. Leur vitesse varie de 11 à 70 km/s.

étoiles filantes : La Terre en mouvement sur son orbite croise des essaims de météorites. Ceci explique la fréquence des étoiles filantes au cours de l'année (Quadrantides, Taurides, Perséides, Orionides, Géminides).

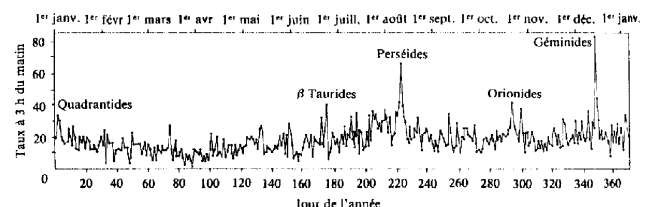


Fig 4.29 : L'évolution annuelle du taux de météores visuels

De plus, la région matinale, dirigée vers l'avant dans le mouvement de la Terre sur son orbite, rencontre plus de météorites que la région vespérale (comme le pare-brise d'une voiture en mouvement vers l'avant reçoit plus de pluie que la vitre arrière.).

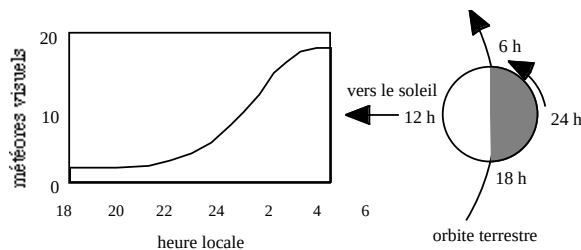


Fig 4.30 : L'évolution horaire du taux de météores visuels

Par effet de parallaxe, quand la Terre est dans un essaim, tous les météores semblent émaner d'un même point du ciel appelé le point radiant.

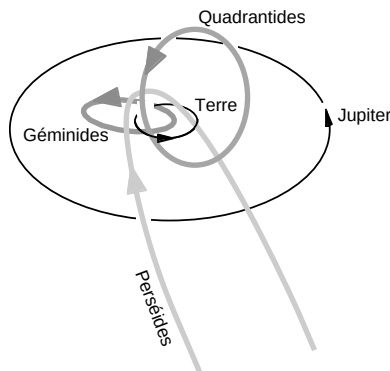


Fig. 4.31 : les essaims cométaires principaux

provenance : La plupart des météorites sont de nature pierreuse (aérolithes constitués surtout de silicates) et semblent avoir une origine interstellaire ou cométaire par désagrégation du noyau de la comète après des passages répétés au périhélie. Certains gros météorites de nature ferreuse (sidérites, constituées de fer associé à du nickel) ou ferropierreuse (lithosidérites, constituées d'un mélange de fer et de silicates) sont certainement des débris d'astéroïdes.

4.4 PROBLEMES : SYSTEME SOLAIRE

4.1 La température de surface de Vénus est de 469°C alors que celle de la Terre n'est que de 15°C. L'albédo de Vénus est de 0.78 tandis que l'albédo de la Terre est de 0.3. Le rapport des distances au Soleil des deux planètes est de 0.73.

Le rapport des distances peut-il seul expliquer cette différence entre les deux températures ? Justifiez. Quelle explication qualitative pouvez-vous fournir à cet écart ?

4.2 Atmosphères

Discutez les dissemblances des atmosphères de chaque paire (masse et diamètre sont du même ordre de grandeur)

- Jupiter et la Terre
- Mercure et Titan
- Quels sont les facteurs qui agissent sur le pouvoir de rétention atmosphérique d'une planète ?
- Pour un astre de masse M , donnez une expression pour la vitesse d'échappement v_{ech} depuis un rayon R .

4.3 Quelles molécules peuvent être trouvées dans l'atmosphère de Jupiter, Mars, et Mercure ? Peut-on y trouver de l'Hydrogène ou du CO_2 ? On supposera que les molécules sont retenues pour $w > 10$, avec $w = v_{ech}/v_m$ (rapport entre la vitesse d'échappement v_{ech} et la vitesse thermique la plus probable v_m)

	Jupiter	Mars	Mercure
T [°K] (exobase*)	100	350	700
v_{ech} [km/s]	59.5	5.02	4.3

A : nombre de masse - Carbone : A=12, Oxygène : A=16

* Mercure : surface

4.4 Cherche question, désespérément

étant donné : le résultat d'une mesure, par exemple :

- Viking a trouvé des anciennes rivières sur Mars, ou :
- Voyager a observé des volcans sur le satellite Io qui éjectent de la matière avec une vitesse entre 300 et 1000m/s)

cherchez : (à partir de ces faits expérimentaux) - des questions qui mènent plus loin, et des observations possibles pour répondre à ces nouvelles questions.

4.5 Surfaces planétaires et transferts d'énergie

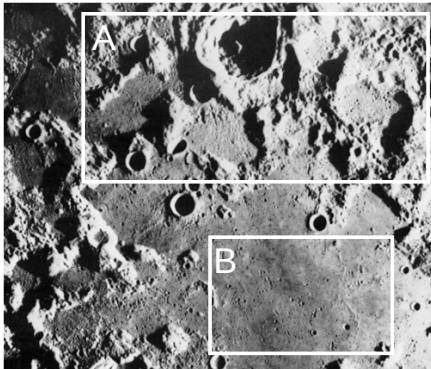
- Quels sont les principaux processus qui forment les surfaces des corps telluriques ?
- Quelles forces/énergies peuvent être responsables de la chaleur à l'intérieur des planètes telluriques et des satellites ? Quels mécanismes peuvent transporter cette chaleur de l'intérieur vers l'extérieur ?
- Pourquoi la température interne d'un objet planétaire augmente généralement avec la taille de l'objet.
- Dans le système solaire, nous connaissons deux objets avec un volcanisme actif : la Terre et Io. Comment expliquez-vous l'activité d'Io qui a une taille comparable à notre lune ? Comparez la source d'énergie à l'intérieur d'Io avec celle de la Terre.

4.6 La surface de la Lune

Jusqu'aux années 60, les astronomes ont préféré expliquer les cratères lunaires par le volcanisme, tandis que les géologues penchaient plutôt pour une cratérisation par bombardement ...

- Qui avait raison et quelle expérience a permis de trancher cette question à la fin des années 60 ?

- b) Dans l'hypothèse d'une cratérisation par bombardement, comment expliquer que les cratères ont quasiment tous une forme à peu près circulaire ?
- c) L'image de la Lune ci-dessous montre une région proche de Mare Serenitatis. Comparez les régions encadrées [A] et [B] :



- d) Donnez un scénario possible pour la formation des deux surfaces [A] et [B].
- e) Laquelle des deux surfaces a été formée avant l'autre ? Justifiez votre raisonnement.

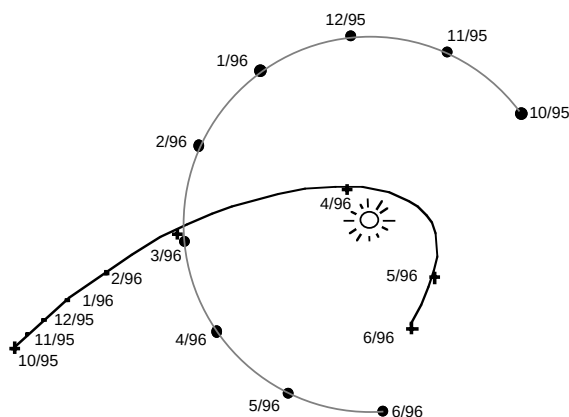
4.7 Halley

Cette comète correspond bien au modèle de la "boule de neige sale" :
rayon $r = 5.7$ km; densité $\rho = 20$ kg/m³; albédo $A = 0.04$.

- a) Pourquoi peut-on observer ce petit astre à l'oeil nu tandis que les astéroïdes (certaines sont pourtant plus grandes et plus réfléchissantes p.e. Vesta : $\varnothing$ 500 km, $A \approx 0.1$, distance d'observation du même ordre de grandeur) ont seulement été découverts à l'aide de télescopes au 19ème siècle.
- b) Au dernier rendez-vous avec le soleil, Halley éjectait environ 35 tonnes de matière (H₂O, poussières) par seconde. Commentez cette perte de masse sachant que les observations de cette comète remontent au moins à 240 av. J.-C.

4.8 La comète Hyakutake

Le schéma ci-dessous montre les trajectoires de la comète Hyakutake entre octobre 1995 et juin 1996. Pour les positions marquées (+), esquissez la queue de la comète (la direction et la taille relative) sur le croquis.



4.9 De quoi sont faits les voeux ?

Chaque année, autour du 12 août, on peut observer une averse d'étoiles filantes (les Perséides).

- a) Quelle est la raison de ces averses régulières ?

- b) Pourquoi toutes les étoiles filantes d'une averse semblent diverger de la même région du ciel ?
- c) Quel est la meilleure heure pour observer des étoiles filantes. Motivez votre réponse!
- d) Vous observez une étoile filante qui passe proche de Algol, une étoile de 2^{ème} magnitude dans la constellation de Perseus. Vous avez pu noter que la magnitude du météore et celle de Algol étaient comparables. Calculez la masse du météore.

On suppose que : le météore a duré 1 seconde et s'est détruit dans la haute atmosphère à une distance de environ $d \approx 100$ km, la vitesse relative de la particule correspondait à la vitesse orbitale de la terre $v = 30$ km/s, seulement 1% de l'énergie totale dissipée dans l'atmosphère par le météore est émise en forme de lumière visible.

rappel : le flux lumineux f est lié à la magnitude apparente m par $f \approx 2 \cdot 10^{-8} \cdot 2.5^{-m}$ [Wm⁻²]