

E

QUELQUES REMARQUES SUR LA "PLANETOLOGIE"

- Techniques "classiques" utilisées pour l'étude des planètes ;
- Techniques infra-rouge et radio ;
- Techniques radar ;
- Planètes "telluriques" et planètes "géantes" :
- Pourquoi les planètes sont-elles rondes ?

GENERALITES SUR LA RECHERCHE PLANETAIRE

Pour comprendre la nature (et éventuellement l'origine) des corps planétaires, il faut tout d'abord connaître leurs caractéristiques physiques (masses, densités, températures, composition chimique...).

Un problème analogue s'était posé pour le Soleil. Nous avons vu qu'une analyse spectroscopique de son rayonnement nous permet de déterminer les conditions physiques superficielles et atmosphériques ; quelques hypothèses plausibles nous permettent ensuite de "bricoler" des modèles de la structure interne qui s'accordent avec les conditions superficielles.

On voudrait procéder de la même façon pour les planètes. Toutefois, les planètes présentent certaines difficultés particulières.

1° la lumière visible des planètes est le rayonnement solaire réfléchi. Donc, la forme du continu spectral dans le visible n'indique pas la température de la planète, et une grande partie des raies de Fraunhofer ne sont pas dues à la matière planétaire.

2° si les électrons d'une matière réfléchissante peuvent être excités sur des niveaux discrets par les photons du rayonnement incident, les photons responsables seront absents du rayonnement réfléchi et on observera de nouvelles raies d'absorption analogues aux raies de Fraunhofer. En pratique cette méthode s'applique très mal aux surfaces des planètes ; à faible température les atomes sont liés pour former la matière solide et par conséquent, les électrons atomiques ne sont pas excités par le rayonnement visible du Soleil. Il y a quelques exceptions importantes ; par exemple, la molécule CO_2 a été détectée spectroscopiquement dans la haute atmosphère de Vénus et dans l'atmosphère de Mars, tandis que l'ammoniac et certains hydrocarbures ont été observés dans les hautes couches atmosphériques des grandes planètes. On étudiera ceci en détail plus loin.

Bien que les molécules ne soient pas souvent excitées par la lumière visible, elles réagissent au rayonnement infra-rouge : chaque molécule possède une signature spectrale caractéristique dans ce domaine des faibles fréquences. On verra que les planètes sont de fortes sources de rayonnement infra-rouge.

3° Il semblerait que l'intensité de la lumière réfléchiée par une planète pourrait nous renseigner sur la nature de la surface réfléchissante.

Disposons côte à côte différentes substances (par exemple, une feuille de papier, une surface métallique polie, du sable, etc...) et éclairons-les par un faisceau de lumière blanche. Elles vont nous apparaître plus ou moins brillantes (selon la quantité de lumière qu'elles diffusent vers nous) et plus ou moins colorées (selon les longueurs d'onde qu'elles absorbent sélectivement). On peut ainsi caractériser en principe chaque substance et chaque type de surface par la couleur et par le rapport de l'intensité incidente à l'intensité diffusée.

On connaît les distances des planètes. Par conséquent, pour une planète donnée on peut calculer (comment ?) l'intensité de la lumière incidente ; le rapport de cette quantité à l'intensité de la lumière diffusée (essentiellement la brillance du corps) peut être comparé au même rapport établi en laboratoire pour diverses surfaces et substances.

Par exemple, on trouve que la fraction de lumière incidente réfléchiée (l'albédo) sur Vénus est d'environ .76 ; dans le cas de la Lune l'albédo est 0,07. Cette différence d'albédo est interprétée en supposant que dans le cas de Vénus, la lumière est diffusée par une couche de nuages, tandis que dans le cas de la Lune la diffusion est réalisée par une surface très poreuse.

Ayant établi l'albédo de la lune, nous pouvons aussi trouver l'albédo de la Terre, sans quitter notre foyer (ou, tout au moins, notre observatoire!). En effet, la lumière cendrée lunaire est une lumière qui a subi deux réflexions : une fois de la Terre vers la Lune et ensuite de la Lune vers nous. Comme on connaît la lumière incidente sur la Terre, la distance et l'albédo de la Lune, l'intensité de la lumière cendrée nous renseigne sur l'albédo de la Terre. On trouve ainsi un albédo d'environ 0,4. Cette valeur élevée est expliquée par la présence des mers et par le fait qu'environ 50% de la surface terrestre est couverte par des nuages.

Il est bien évident que l'albédo de la Terre peut être mesuré directement si on se paie un voyage dans l'espace !

L'albédo varie avec la longueur d'onde. La courbe qui traduit cette variation peut être elle aussi comparée avec celles de diverses substances.

Cette méthode peut être beaucoup raffinée, mais il est bien évident que les résultats sont extrêmement difficiles à interpréter et jamais sans ambiguïté. A l'époque des sondes interplanétaires qui "visitent" régulièrement les planètes proches, son intérêt principal réside dans l'étude des planètes lointaines, des satellites et des planétoïdes

4° La turbulence atmosphérique de la terre dégrade l'image obtenue à l'aide d'une lunette ou d'un télescope. C'est comme si on mettait un verre de mauvaise qualité optique devant l'appareil : à la limite, la résolution est déterminée par la qualité du milieu et donc on ne peut pas l'améliorer en construisant des télescopes de plus en plus grands. En effet, la meilleure résolution dépasse rarement 0,4" d'arc.

On pourrait résoudre le problème au sol en tenant compte, dans le traitement de l'image, de la turbulence atmosphérique : on enregistrerait l'image électroniquement (sur bande vidéo, par exemple) et on modifierait l'enregistrement selon les caractéristiques instantanées de la turbulence. Cette méthode n'est pas encore au point.

Remarquons qu'une résolution de 0,4" à la distance de Mars implique que toute structure dont l'échelle est inférieure à $70 \times 10^6 \times \frac{2}{360} \times \frac{.4}{60 \times 60} \approx 10^3$ km est inobservable. En effet, il a fallu envoyer des sondes interplanétaires vers Mars et vers Mercure pour se rendre compte (avec étonnement !) que ces planètes sont couvertes de cratères, de montagnes, etc.

5° En tout cas, en ce qui concerne les planètes, seules Mars et Mercure ont une surface découverte. Dans le cas de Vénus, il a fallu pénétrer dans la couche nuageuse avec des sondes pour pouvoir vérifier les extrapolations théoriques : on s'est rendu compte ainsi que certaines théories étaient fausses (surtout en ce qui concerne la structure de la surface et

la transparence de la basse atmosphère). Dans le cas de Jupiter, Saturne etc., on en est encore au stade d'étudier les nuages et plus généralement le voisinage de ces planètes, afin de calculer les conditions superficielles et internes.

Les analyses chimiques directes d'une surface planétaire sont importantes même quand elle est bien visible ; dans le cas de la Lune, on a trouvé que la composition chimique est semblable mais pas identique à celle de la matière terrestre.

6° La structure interne d'une planète est déterminée par la variation radiale de la densité, de la composition chimique, de la température et de la pression. On n'y a pas directement accès. Pourtant, ces quantités ne sont pas indépendantes et on peut "bricoler" des modèles à partir de ce qu'on pense savoir des conditions superficielles. Le problème est analogue à celui de la structure interne du Soleil ; toutefois, puisque la matière est solide ou liquide, les simplifications introduites dans le cas du Soleil par le fait que son état est gazeux ne s'appliquent pas.

Dans le cas de la Terre et de la Lune, les séismes imposent des contraintes importantes : nous voyons ainsi l'importance des dispositifs de mesure aux sols des planètes.

MESURE DE LA TEMPERATURE D'UNE PLANETE PAR TECHNIQUES INFRA-ROUGE OU RADIO.

La température de la photosphère a été obtenue à partir de son émission continue. Dans le domaine spectral du visible, la lumière provenant des planètes est la lumière réfléchie du Soleil : donc le visible ne peut pas nous renseigner sur les conditions thermiques des planètes.

Y-a-t-il un domaine spectral où les planètes rayonnent ?

Pour résoudre cette question, il convient d'abord de considérer quelle pourrait être la température superficielle d'une planète ; pour ceci, il faut d'abord considérer quelle pourrait être la température centrale.

Soit un corps planétaire de masse M et de densité moyenne $\bar{\rho}$. Dans un corps stable, les forces internes soutiennent le poids des couches externes. Ces forces internes sont en partie d'origine thermique, et en partie dues à l'incompressibilité de la matière solide ou liquide. Donc une limite supérieure à la pression et à la température interne d'une planète peut être trouvée en négligeant tout effet de résistance de la matière, c'est-à-dire, en supposant que la matière se comporte comme un gaz parfait. Sous cette forme, le problème est le même que pour déterminer la température centrale du Soleil, et peut être résolu de la même manière.

Considérons d'abord Jupiter, la planète la plus massive. Sa pression centrale ne peut pas dépasser

$$\begin{aligned}
 P_{\text{Jupiter}}^{\text{max centrale}} &= \bar{\rho}_{\text{Jup.}} \times G \times \frac{M_{\text{Jup.}}}{8} \times \frac{1}{2R_{\text{Jup.}}} \\
 &\approx 1,4 \times 6,67 \times 10^{-8} \times \frac{1900 \times 10^{27}}{8} \times \frac{2}{68700 \times 10^5} \\
 &\approx 7 \times 10^{12} \text{ dyne cm}^{-2}
 \end{aligned}$$

Donc la température centrale ne dépasse pas :

$$T_{\text{Jupiter}}^{\text{max centrale}} = 7 \times 10^4 \text{ } ^\circ\text{K}$$

Cette température est relativement élevée, mais elle est beaucoup trop faible pour entretenir une réaction thermonucléaire. Une certaine fraction de la chaleur interne paraît à la surface -les conditions superficielles thermiques sont alors déterminées par le rayonnement reçu du Soleil (faible, à cause de la distance de Jupiter) et par le flux d'énergie du centre vers le bord.

Considérons maintenant Mercure.

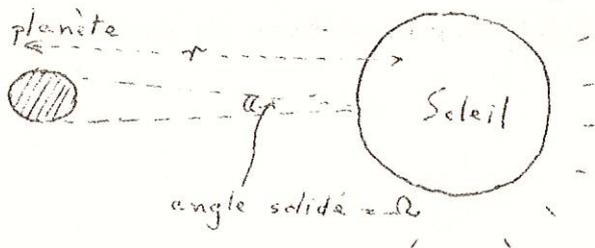
Un calcul analogue donne :

$$\begin{aligned}
 P_{\text{Mercure}}^{\text{max centrale}} &= \frac{5,4 \times 6,67 \times 10^{-8} \times 0,34 \times 10^{27} \times 2}{8 \times 2432 \times 10^5} \\
 &\approx 10^{11} \text{ dyne cm}^{-2}
 \end{aligned}$$

$$T_{\text{Mercure}}^{\text{max centrale}} \approx 10^3 \text{ } ^\circ\text{K.}$$

Cette température limite est encore plus faible que celle de Jupiter : les conditions thermiques superficielles sont alors dominées par le rayonnement reçu du Soleil.

Pour estimer la température superficielle maximale due à l'échauffement par le Soleil, considérons un corps sphérique de rayon R à la distance r du Soleil. On suppose que le corps est parfaitement noir, c'est-à-dire, qu'il absorbe toute la lumière incidente, s'échauffe à une température T et rayonne une quantité d'énergie correspondante. Un état d'équilibre est atteint quand l'énergie émise est égale à l'énergie absorbée.



Supposons que l'angle solide de la planète vue du soleil soit Ω . D'après la loi de Stefan, l'énergie totale rayonnée par le Soleil par sec. est E_{\odot} :

$$E_{\odot} = 4\pi R_{\odot}^2 \sigma T_{\odot}^4$$

R_{\odot} , T_{\odot} étant le rayon et la température de la photosphère, σ étant la constante de Stefan.

L'énergie rayonnée dans la direction de la planète (égale à l'énergie absorbée si on suppose que rien n'est réfléchi) est $E_{\text{planète}}^{\text{reçue}}$:

$$\begin{aligned} E_{\text{planète}}^{\text{reçue}} &= \frac{\Omega}{4\pi} E_{\odot} \\ &= \frac{\pi R_{\text{planète}}^2}{4\pi r^2} E_{\odot} \end{aligned}$$

L'énergie rayonnée par la planète est :

$$E_{\text{planète}}^{\text{rayonnée}} = 4\pi R_{\text{planète}}^2 \sigma T_{\text{planète}}^4$$

$T_{\text{planète}}$ étant sa température superficielle.

A l'équilibre :

$$E_{\text{planète}}^{\text{reçue}} = E_{\text{planète}}^{\text{rayonnée}}$$

d'où :

$$T_{\text{planète}}^{\text{surface}} \approx 6000 \left(\frac{R_{\odot}}{2r} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Dans le cas d'un corps ayant le rayon de Jupiter et situé à la même distance du Soleil que cette planète :

$$T^{\text{surface}} \approx 120^{\circ}\text{K}$$

Si on tient compte de la température centrale élevée de Jupiter, on conclut que sa température superficielle devrait dépasser 120°K .

Si on fait le même calcul pour Mercure, on trouve :

$$T^{\text{surface}} \approx 400^{\circ}\text{K}.$$

Dans le cas de Mercure, la contribution due aux flux d'énergie du centre vers la surface doit être très faible.

Ces estimations sont très approximatives, mais elles nous montrent que les températures des couches visibles des planètes devraient être de l'ordre de quelques centaines de degrés Kelvin.

D'autre part, on sait par mesure directe que la température moyenne à la surface de la Terre est 295°K .

Supposons alors qu'une planète rayonne comme un corps noir : son spectre suivra la loi de Planck et la maximum de son émission sera à la longueur d'onde λ_{max} (loi de Wien) :

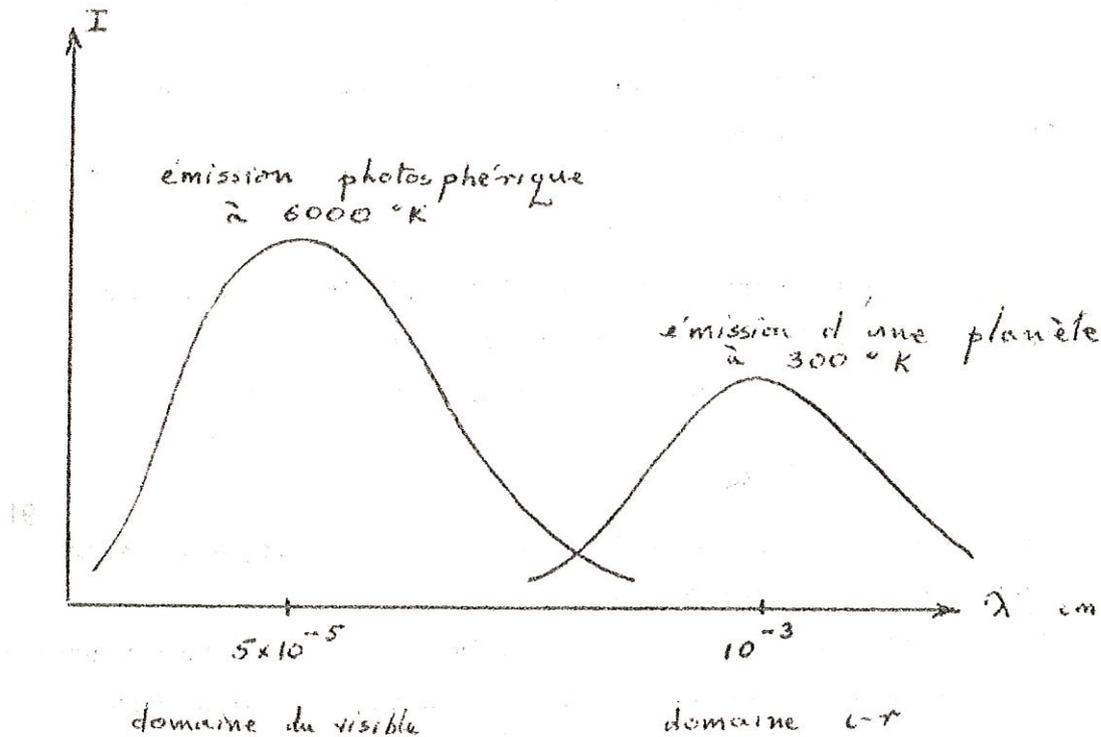
$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2989}{T} \text{ cm}$$

En prenant $T \approx 300$ comme valeur représentative,

$$\lambda_{\text{max}} \approx 10^{-3} \text{ cm}.$$

On voit (page 40 "l'introduction à l'Astrophysique") que ce domaine spectral correspond au rayonnement infra-rouge ou radio. La photosphère rayonne très peu dans ce domaine spectral : par conséquent, si

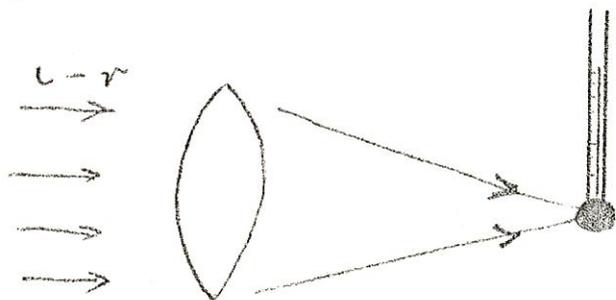
on observe d'une planète une émission en infra-rouge ou en radio, elle doit être due à la planète elle-même, ce qui nous permet de déterminer sa température superficielle.



Nous avons déjà remarqué que les molécules sont facilement excitées par le rayonnement infra-rouge. De plus, les planètes sont des sources relativement puissantes en infra-rouge ; par conséquent, en faisant de la spectroscopie infra-rouge, on va pouvoir étudier les atmosphères des planètes d'une façon analogue à l'étude de l'atmosphère du Soleil.

DETECTION DU RAYONNEMENT INFRA-ROUGE

Le rayonnement infra-rouge se comporte de la même manière que le rayonnement visible : en particulier, un faisceau peut être amené à un foyer par une lentille ou par un miroir concave. De plus, une surface opaque réagit à l'infra-rouge en s'échauffant ; on pourrait ainsi mesurer un rayonnement infra-rouge avec une lunette ordinaire au foyer duquel on placerait un thermomètre.



La quantité d'énergie rayonnée en infra-rouge par les planètes est relativement faible : un détecteur plus pratique et sensible est le thermo-couple. Deux métaux en contact produisent une FEM sous l'influence de la chaleur : la FEM est mesurée de façon habituelle et sa valeur est une fonction du flux de rayonnement infra-rouge au foyer de la lunette ou du télescope. Le thermocouple convient assez bien pour la Lune ; pour des sources moins puissantes, on est amené à utiliser des semi-conducteurs, dont la réponse est plus sensible.

La technique de l'astronomie infra-rouge exige certaines précautions.

1° Les signaux sont en général faibles : donc, tout signal parasite est gênant. A la température ambiante, c'est-à-dire $\approx 300^\circ\text{K}$, l'appareil émet lui-même un rayonnement tout à fait semblable au rayonnement qu'on voudrait mesurer et beaucoup plus intense. Il faut alors blinder le détecteur (mais comment le blinder, quand le blindage risque aussi de chauffer ?)

2° L'atmosphère de la Terre absorbe fortement l'infra-rouge : donc, il faut faire ces mesures en altitude (ballon, fusée, satellite, ...), ou aux quelques rares longueurs d'ondes (les "fenêtres" infra-rouge) où l'atmosphère est relativement transparente.

3° La température mesurée est celle de la couche émettrice. Dans le cas de la Lune, de Mars et de Mercure, c'est la "surface" du corps en question (mais voir plus loin "température de la Lune"). Par contre, dans le cas des planètes enveloppées des nuages, la couche émettrice se trouve quelque part dans l'atmosphère (voir plus loin "température de Vénus").

4° Pour déduire la température à partir du rayonnement infra-rouge, on suppose que la loi de Planck est applicable : pourtant, il est rare qu'on puisse vérifier directement cette condition.

"TATONNEMENT" DES SURFACES PLANETAIRES PAR TECHNIQUE RADAR.

Dans la technique radar, une onde radio-électrique (donc, une onde dont la longueur d'onde est au moins quelques millimètres) est émise vers un objet proche (la Lune, une autre planète) par un émetteur artificiel ; les caractéristiques du signal réfléchi (son intensité, la changement de la longueur d'onde, etc...) nous renseignent sur les propriétés de la surface réfléchissante.

Considérons une onde incidente sur un grain de matière solide.

Si la dimension du grain est beaucoup plus petite que la longueur d'onde du rayonnement, le rayonnement incident "ne se rend pas compte" de la présence du grain et il n'y a pas d'interaction entre la matière et le rayonnement : il n'y a ni réflexion, ni absorption, ni réfraction.

Si, par contre, le grain est de même ordre de grandeur ou plus grand que la longueur d'onde, le rayonnement peut interagir avec la matière et on observe des phénomènes de réflexion, de réfraction et d'absorption. Les détails dépendent de la nature du grain.

La longueur d'onde de la lumière visible varie environ de 1000 Å à 10 000 Å ; par conséquent, la lumière visible interagit avec tout obstacle qui dépasse quelques centaines d'angström. On remarque qu'elle est bien diffusée par les grains de poussière (dont la dimension varie typiquement de 3000 Å jusqu'à 10⁻³ cm), et les gouttelettes d'un liquide quelconque ; elle est réfractée, réfléchie ou absorbée par de grands morceaux de matière solide. Vénus et la Lune sont deux exemples différents : la surface de Vénus nous est cachée derrière une couche atmosphérique de matière diffusante, tandis que la surface solide de la Lune présente une barrière impénétrable à la lumière visible.

La longueur d'onde du rayonnement radio est supérieure à quelques millimètres ; par le même argument que précédemment (strictement non-rigoureux !) le rayonnement radio (en absence des électrons libres) est arrêté seulement par les obstacles dont la dimension est de même ordre de grandeur. Donc, avec une longueur d'onde donnée, on est sûr de pénétrer à travers une couche composée de particules beaucoup plus petites. Par exemple, une onde radio centimétrique traverse les nuages de Vénus (composés de grains et de gouttelettes), mais elle est réfléchie par la surface solide ; nous pouvons donc étudier la surface de Vénus avec le radar.

La lune présente un autre exemple important : les signaux radar ayant une longueur d'onde d'environ 4 cm réfléchis par la Lune révèlent une structure très semblable à celle que nous observons optiquement (cratères, montagnes, etc...). On conclut que ces signaux sont réfléchis essentiellement à la surface. Par contre, les signaux à 75 cm ne révèlent aucune structure semblable : avec difficulté on reconnaît quelques cratères. On interprète cette différence en supposant que la surface lunaire est composée d'une couche épaisse de matière relativement granuleuse : ainsi, le radar de courte longueur d'onde pénètre très peu, tandis que le radar de grande longueur d'onde est réfléchi, soit par de grands rochers superficiels, soit à une profondeur où la matière est plus "solide".

Le radar nous permet d'étudier les caractéristiques superficielles d'une planète d'une façon presque expérimentale (sans quitter le foyer !) ; nous pouvons choisir la longueur d'onde du rayonnement émis vers l'astre et la modifier selon les résultats obtenus.

PLANETES TELLURIQUES ET PLANETES GEANTES

Il est souvent commode de répartir les planètes du système solaire en 2 groupes : planètes "telluriques" et planètes "géantes".

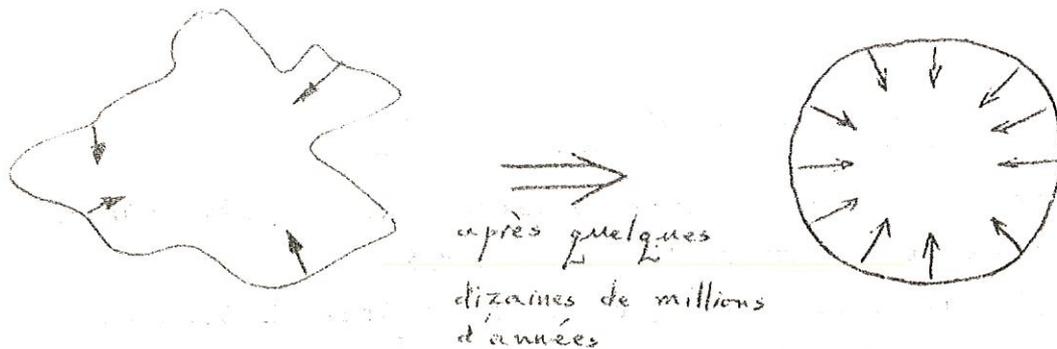
Les planètes telluriques comportent Mercure, Venus, la Terre et Mars. Elles ont toutes une faible masse (de $0,34 \times 10^{27}$ g dans le cas de Mercure jusqu'à $\approx 6 \times 10^{27}$ dans le cas de la Terre), une grande densité (d'environ 4 g cm^{-3} pour Mars jusqu'à environ 5,5 pour la Terre) et leur période de rotation sur elles-mêmes est relativement grande (environ 24 heures dans le cas de Mars jusqu'à environ 243 jours dans le cas de Vénus). De plus, elles ont peu de satellites naturels. La grande densité de ces planètes suggère que leur structure interne ainsi que leur structure chimique ressemblent à celles de la Terre.

Les planètes géantes comprennent Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. Leurs masses sont très grandes (de 57×10^{27} dans le cas d'Uranus jusqu'à 1900×10^{27} dans le cas de Jupiter) et leur densité est faible (de $0,7 \text{ g cm}^{-3}$ pour Saturne jusqu'à 1,4 pour Jupiter) ; leur période de rotation est faible (environ 10 heures dans le cas de Jupiter jusqu'à environ 16 h dans le cas de Neptune). En outre, Jupiter, Saturne et

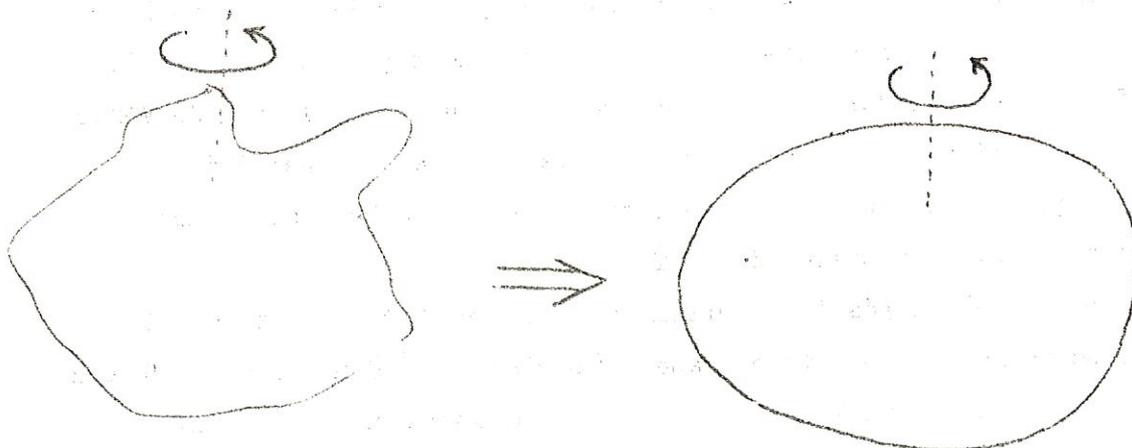
Uranus possèdent de riches systèmes de satellites (13,10 et 5 satellites respectivement). On remarque que la densité des grandes planètes est comparable à celle du Soleil : on suppose alors que leur composition chimique est très semblable à celle du Soleil.

POURQUOI LES PLANETES SONT-ELLES RONDES ?

Nous avons déjà calculé que la pression à l'intérieur de Jupiter et de Mercure ne dépasse pas environ 10^{13} dynes cm^{-2} et 10^{11} dyne cm^{-2} respectivement. Un calcul analogue pour la Lune donne environ 5×10^{10} . Or la rigidité de l'état solide n'est qu'une apparence : soumise à une pression suffisamment élevée, toute matière tend à "couler", c'est-à-dire à "céder" à la pression. Ce mouvement est très lent, mais à une échelle de temps cosmique, très efficace ; la matière d'un corps massif (la Terre la Lune, Jupiter) de forme arbitraire cède à la gravitation jusqu'à ce que toutes les forces soient équilibrées. Par conséquent, un corps irrégulier sans rotation atteindra une forme sphérique :



Un corps en rotation s'équilibre en prenant une forme ellipsoïdale :



A mesure que le corps tourne plus vite, la forme est plus ellipsoïdale. Remarquons la forme sphérique du Soleil, de Mercure, et de la Lune ; la Terre par contre, est légèrement aplatie.

Ce phénomène est dû seulement aux forces écrasantes de la gravitation. Donc, les corps peu massifs ne seront pas transformés par ce mécanisme : on remarque la forme irrégulière de Phobos, satellite de Mars, dont la masse est environ 2×10^{19} g.

L'aplatissement visible de Jupiter et de Saturne n'est pas celui de la planète, mais de la couche atmosphérique ; il est bien évident qu'une couche gazeuse en rotation rapide prendra une forme aplatie. Pourtant, le mouvement de la sonde Pioneer 10 dans le voisinage de Jupiter a montré que l'aplatissement de la planète elle-même est très semblable. Ceci suggère qu'une grande partie de sa matière est en état liquide.

