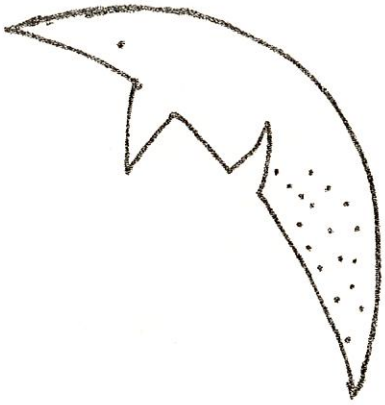


G

L A L U N E

Aspect Visuel ;

Forme et force gravitationnelle de la Lune ;

Structure interne ;

Structure superficielle ;

Composition chimique ;

Quelques remarques sur l'origine de la Lune.

GENERALITES

Les paragraphes qui suivent ne sont qu'un résumé très incomplet de quelques aspects visuels de la Lune et il est conseillé de consulter un ouvrage classique quelconque sur le sujet (il en existe plusieurs dans la bibliothèque de physique), pour une description plus détaillée.

En ce qui concerne l'interprétation physique, il faut pourtant se méfier de tout ouvrage écrit avant 1970 ! Un très bon ouvrage, à la fois simple et moderne (dont ce chapitre a été inspiré) est "The Moon in the Post-Apollo Era", par Z. Kopal, chez "Reidel Publishing Co".

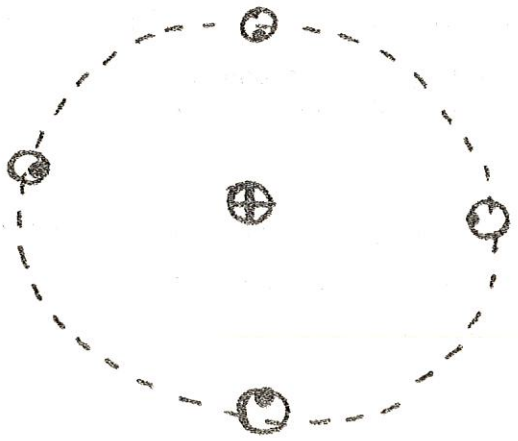
DISTANCE :

Distance moyenne = 384 400 km. Jusqu'à 1946, la distance a été déterminée par triangulation avec base terrestre. Depuis 1946, on a utilisé le radar, ce qui donne une précision d'environ 1 km ; plus récemment encore, on a pu poser sur le sol lunaire des dispositifs capables de réfléchir un signal laser -ce qui offre la possibilité d'atteindre une précision de quelques mètres.

L'excentricité de l'orbite est d'environ 0,05.

CARACTERISTIQUES ORBITALES :

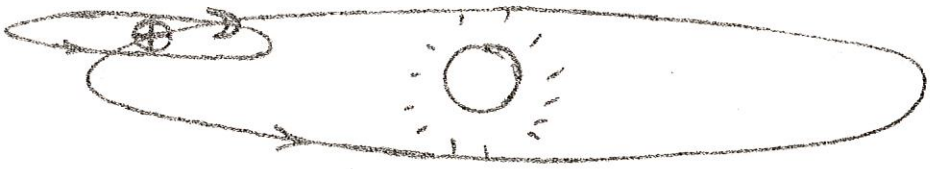
La période de rotation de la Lune sur son axe est d'environ 27,3 jours ; elle est égale à la période de révolution autour de la Terre.



De plus, l'axe de rotation est presque perpendiculaire au plan orbital -par conséquent, en première approximation, la Lune présente toujours la même face vers la Terre. En deuxième approximation, il faut tenir compte du fait que l'orbite de la Lune n'est pas circulaire : par conséquent, la différence entre la vitesse angulaire

de rotation et la vitesse angulaire orbitale (nulle dans la première approximation) varie au cours du mois. De plus, l'angle d'inclinaison de l'axe sur le plan orbital n'est pas rigoureusement nul ; il s'ensuit que nous observons, au cours d'un mois, environ 60% de la surface lunaire au lieu de 50%. On appelle ce phénomène la "libration optique".

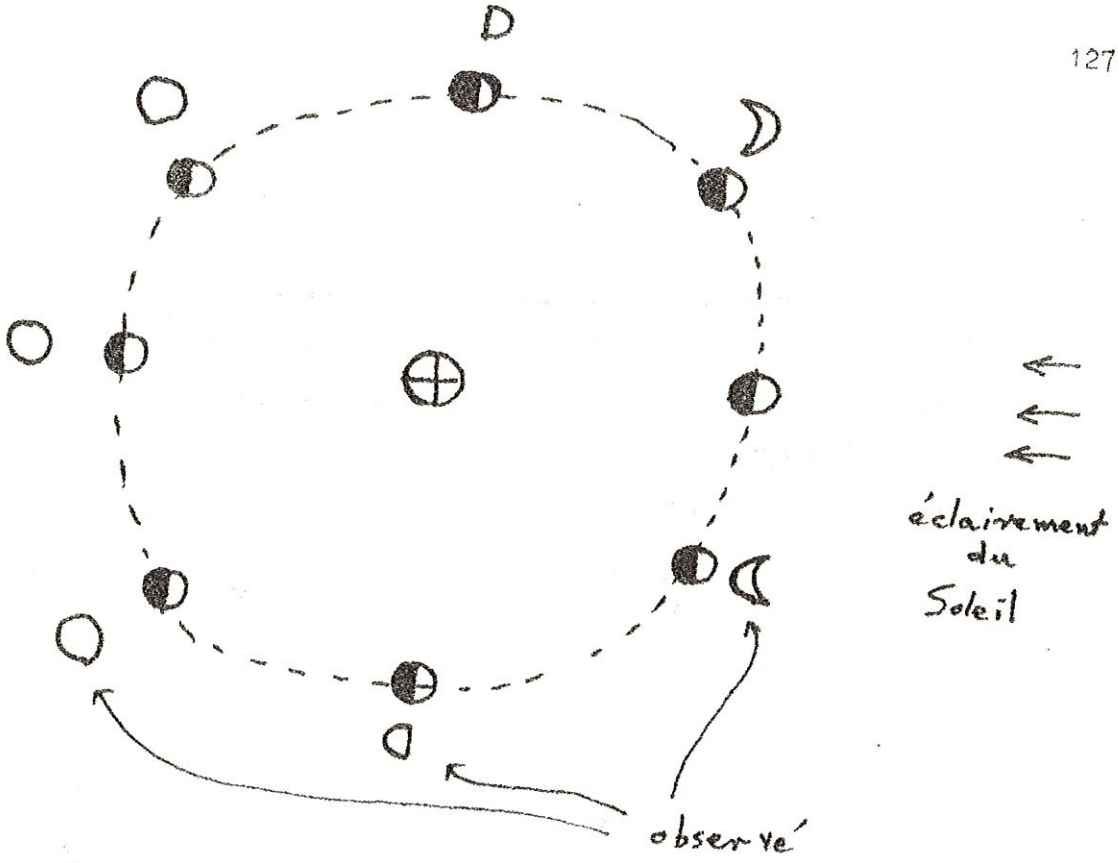
Le plan orbital de la Lune est presque confondu avec celui de la Terre autour du Soleil :



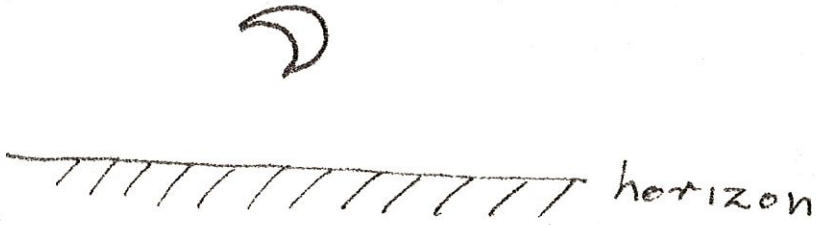
Le sens du mouvement autour de la Terre est le même que celui de la Terre autour du Soleil.

QUESTION G1 : Trouver un phénomène qui suggère que les plans orbitaux de la Terre et de la Lune sont presque confondus

Le mouvement de la Lune entraîne le phénomène des "phases" : le Soleil éclaire toujours une moitié de la surface lunaire, mais la fraction observée dépend de la po tion de la Lune sur son orbite



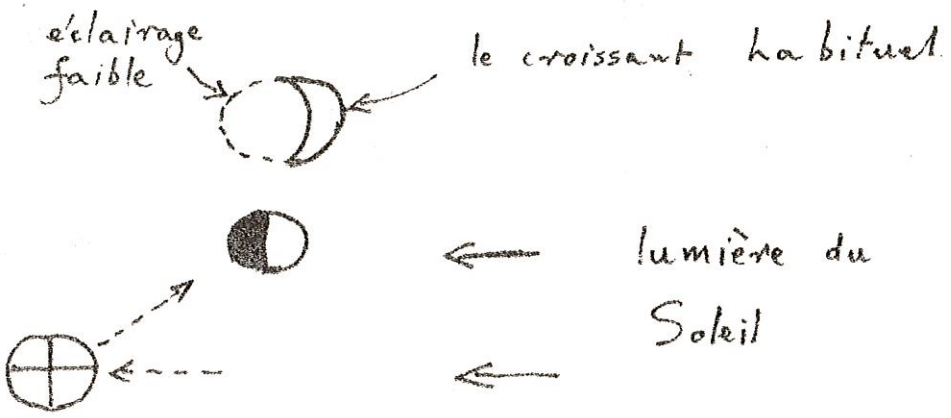
QUESTION G2 : A un moment donné, on observe la Lune comme ci-dessous :



Est-ce le jour ou la nuit ?

QUESTION G3 : La surface de la Lune n'est pas lisse, on observe des montagnes, des cratères, des failles, etc... A quel moment observe-t-on de la Terre les ombres les plus grandes ? les ombres les plus petites ? Trouver une méthode pour évaluer la porosité de la surface lunaire à l'échelle de quelques centimètres, sans y aller.

En principe, à un moment donné, on ne devrait pouvoir observer que la partie de la Lune éclairée par le Soleil. En pratique, près de la nouvelle Lune on distingue souvent, mais faiblement, la partie "sombre" : ce phénomène appelé "lumière cendrée" est dû à la lumière qui a été réfléchie de la Terre vers la Lune.



Nous avons déjà remarqué (cf. "La Terre") que la lumière cendrée nous permet de déterminer l'albédo terrestre.

RAYON :

Rayon moyen = 1738 km. Le rayon peut être déterminé à partir de la valeur moyenne du diamètre angulaire, soit 1865,2".

MASSE ET DENSITE MOYENNE :

Masse = $7,353 \times 10^{25}$ g

$\bar{\rho} = 3,34 \ gcm^{-3}$

Avant l'exploration spatiale, la masse de la lune a été déterminée par plusieurs méthodes assez indirectes ; par exemple, les perturbations du Soleil sur le mouvement de la Lune autour de la Terre, ou les perturbations de la Lune sur le mouvement de la Terre.

Depuis 1960, le mouvement des sondes dans le voisinage de la Lune nous a permis de déterminer la masse très précisément. Remarquons que ces

méthodes, bien que très exactes, donnent en réalité le produit $GM_{☾}$. Nous connaissons maintenant la valeur de ce produit avec une précision d'environ $10^{-3}\%$; malheureusement la valeur de G (mesurée en laboratoire) est beaucoup moins précise.

ASPECT VISUEL :

De façon très sommaire, on distingue sur la Lune deux types de "terrains" -les "mers" et les "continents". Les "mers" peuvent atteindre une dimension d'environ 1000 km.

Ces noms datent d'une époque où on croyait encore que la surface lunaire ressemblait à celle de la Terre : ainsi les régions sombres, enfermées dans des zones relativement brillantes, étaient assimilées à des étendues d'eau, donc à des "mers", les autres régions, par analogie, furent baptisées "continents". Avec le temps cette interprétation a été abandonnée, mais on a gardé la nomenclature ; on distingue ainsi deux types de terrains dont l'albédo et la nature semblent différents.

Remarquons que jusqu'à l'ère spatiale, on a conservé sans bonne raison un autre préjugé, associé avec la croyance en des étendues liquides : on pensait en effet que les "mers" étaient toujours plus basses que les "continents".

Il a fallu étudier la surface de près pour éliminer ce préjugé. De plus, on a pu constater que la face "cachée" possède très peu de "mers" par contre, on a observé quelques grands "bassins" dont la structure ressemble à celle des "mers", mais dont l'albédo est plutôt celui des "continents".

La structure la plus répandue est le "cratère". Les cratères sont généralement circulaires, on constate qu'ils représentent plutôt des "trous" dans le sol lunaire que des plaines entourées de "remparts. Quelques cratères sont associés à des "raies" de matière relativement brillante dont ils sont le centre ; ces "raies" s'étendent souvent jusqu'à quelques centaines de kilomètres des cratères.

Si on appelle "cratère" toutes les dépressions circulaires ou elliptiques aux contours réguliers (on verra par la suite pourquoi cette définition semble utile), on observe que la dimension des cratères varie de quelques centaines de kilomètres jusqu'à quelques microns. Il est bien évident qu'il a fallu observer la Lune à partir des sondes spatiales ou depuis se surface pour repérer la présence de cratères inférieurs à un kilomètre de diamètre, et rapporter en laboratoire des échantillons de matière lunaire pour observer les "micro-cratères".

Les cratères recouvrent uniformément la surface lunaire ; on observe par exemple, des cratères à l'intérieur d'autres cratères et même à cheval sur leurs bords. Pourtant, on observe très peu de grands cratères à l'intérieur des "mers".

QUESTION G4 : Trouver une méthode pour déterminer l'altitude d'une montagne lunaire à partir des observations faites à la surface de la Terre. Comment peut-on déterminer toutes les grandeurs qui interviennent ?

PRESSION ATMOSPHERIQUE :

Négligeable. Les mesures faites sur la surface de la Lune ont mis en évidence une "atmosphère" dont la densité varie d'environ 10^5 particules cm^{-3} (la nuit) jusqu'à environ 10^7 (le jour). Rappelons que la densité du milieu interplanétaire est de l'ordre de 10 particules cm^{-3}.

QUESTION G5 : (1) Trouver une explication pour la décroissance de la densité atmosphérique la nuit.

(2) La densité étant si faible, quel processus terrestre n'observera-t-on pas sur la Lune ? Quelle est votre conclusion concernant la structure superficielle de la Lune ?

(3) La densité étant si faible, y a-t-il une composante du milieu interplanétaire qui pourrait interagir avec la surface de la Lune ? Quel est maintenant votre conclusion sur la structure superficielle de la Lune ?

LA FORME DE LA LUNE

Avec une précision d'environ 3 km, la Lune peut être considérée comme sphérique. Les écarts sont très complexes ; en particulier, on n'observe aucun aplatissement polaire -ce qui est tout à fait compatible avec la faible vitesse de rotation de la Lune.

Depuis 1965, la forme a été étudiée avec une précision de quelques dizaines de mètres. Les mesures ont été accomplies par des sondes orbitant autour de la Lune. Les sondes étaient équipées d'altimètres qui transmettaient au laboratoire terrestre, de façon continue, la distance entre la sonde et la surface lunaire. De plus, puisque les mouvements des sondes étaient étroitement surveillés depuis la Terre, on connaissait à tout instant la distance entre la sonde et le barycentre de la Lune. Par conséquent, on a pu déterminer la forme de la Lune par rapport à son barycentre.

On a constaté ainsi que la face dirigée vers la Terre se trouve 2 km en dessous de la surface d'une sphère de rayon 1738 km, centrée sur le barycentre, tandis que l'autre face se trouve au-dessus : la Lune est déformée, mais pas du tout comme on aurait pu le croire naïvement par suite d'un phénomène de marées.

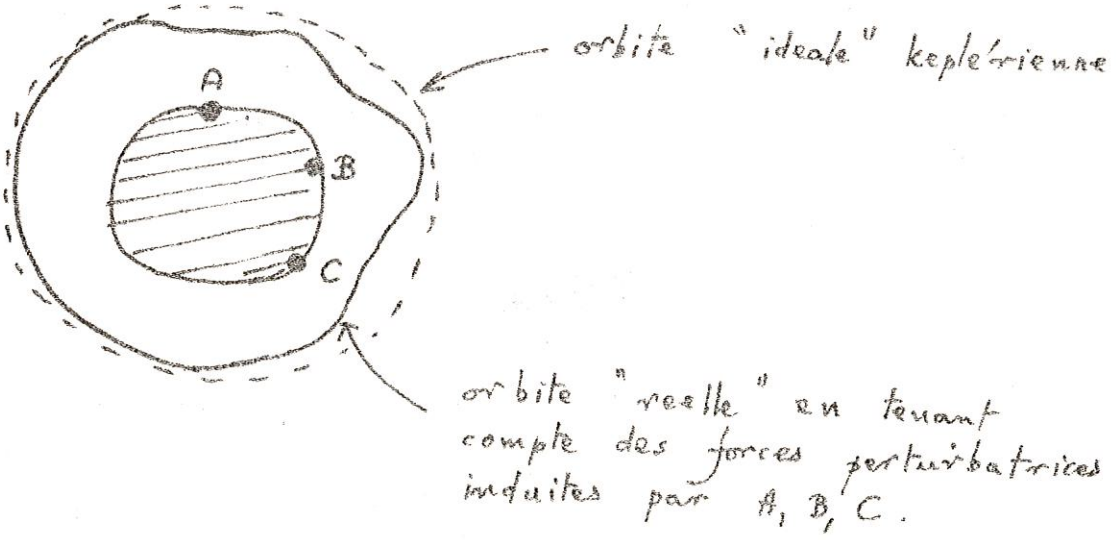
LE CHAMP GRAVITATIONNEL DE LA LUNE

Si la Lune était exactement sphérique et si sa masse était distribuée avec une symétrie sphérique, son champ gravitationnel pourrait être assimilé à celui d'une masse ponctuelle. Dans ce cas, la Terre ne créerait pas de "marées" sur la Lune et la période de rotation n'aurait pas pu se synchroniser avec la période orbitale (cf p. 32-38). On en conclut donc

que le champ gravitationnel de la Lune n'est pas celui d'une masse ponctuelle.

Les meilleures déterminations du champ gravitationnel lunaire ont été faites à partir des sondes en orbite. Nous avons vu (cf. p. 21-24) qu'un corps ponctuel dans le voisinage d'un 2ème corps ponctuel poursuit un trajet képlérien ; en particulier, dans le cas d'une trajectoire fermée, le mouvement est circulaire ou elliptique. Si l'orbite n'est pas képlérienne on en conclut qu'il y a des forces perturbatrices -(un 3e corps par exemple), ou que le champ gravitationnel n'est pas celui d'un point.

Considérons une sphère uniforme à la surface de laquelle sont posées quelques masses A, B, C, ... Si la masse totale de A, B, ... est faible par rapport à la masse de la sphère, l'orbite d'un corps est presque képlérienne.



Pourtant dans le voisinage des masses, l'orbite est déviée de sa forme "idéale" ; la grandeur d'un écart nous permet d'estimer la valeur de la masse pertrubatrice.

Les écarts se manifestent de deux façons : l'orbite est déformée et la vitesse du corps ne suit pas les lois de képler : en particulier, le corps est accéléré dans le voisinage d'une masse "supplémentaire". Quand les pertrubations spatiales sont petites, les variations de vitesse représentent la méthode la plus sensible pour la mise en évidence des "perturbateurs".

Remarquons qu'un "manque de masse -par exemple, une région où la densité est inférieure à la densité moyenne- se manifeste aussi par des écarts aux lois de Képler.

On a pu constater ainsi la présence de 2 sortes d'anomalies gravitationnelles ; nous verrons par la suite comment on les interprète (ou, plutôt, comment on n'arrive pas à les interpréter de façon satisfaisante).

1°) ANOMALIES POSITIVES : En certains endroits, le champ gravitationnel est supérieur au champ d'une sphère uniforme. Ceci suggère qu'une accumulation de masse s'y trouve -on les appelle des "mascons". On en connaît 9, et ils sont tous associés avec quelques grandes "mers" circulaires. On n'observe aucune accumulation de matière à la surface. Il est probable que les mascons ne dépassent pas 200 Km de diamètre, et ne sont pas enfoncés plus profondément que 100 km environ.

2°) ANOMALIES NEGATIVES : On a observé aussi quelques endroits où le champ gravitationnel semble inférieur à celui d'une sphère uniforme -donc, en ces endroits, il y a un manque de masse. Ces régions se trouvent associées avec des cratères dont la dimension est typiquement de l'ordre de 100 km.

LA STRUCTURE INTERNE DE LA LUNE

Comme dans le cas de la Terre et d'autres planètes, nous n'avons aucune information directe sur la structure interne de la Lune. Avant l'exploration spatiale, nous ne connaissions ni la composition chimique ni (de façon satisfaisante, mais voir plus loin) la nature de la couche superficielle. On savait seulement que la densité moyenne est de 3,34 g cm^{-3}, et que la surface n'est pas "lisse", même à petite échelle.

1) CONCLUSIONS FAITES A PARTIR DE LA DENSITE ET DE LA MASSE : LA PRESSION INTERNE :

La densité des rochers ramassés à la surface est d'environ 3 g cm^{-3} -une valeur très proche de la densité moyenne. On en conclut que la densité varie très peu à l'intérieur de la Lune. Remarquons la différence par rapport

à la Terre, où la densité superficielle est presque la moitié de la densité moyenne, témoin de changements physiques importants à l'intérieur.

Nous avons déjà obtenu, pour l'étude des conditions internes de la Terre, la pression à l'intérieur d'un corps homogène en équilibre hydrostatique. Dans le cas de la Lune, cette expression s'écrit :

$$P(R) = \frac{2}{3}\pi G \bar{\rho}_{☾}^{2} \left(R_{☾}^{2} - R^{2}\right)$$

Donc, la pression centrale est :

$$P(0) = \frac{2}{3}\pi G \bar{\rho}_{☾}^{2} R_{☾}^{2}$$

$$\approx 5 \times 10^{10} \text{ dyne cm}^{-2}$$

Remarquons que nous pouvons atteindre cette pression (donc étudier le comportement de la matière lunaire à toute profondeur), en laboratoire.

QUESTION G6 : Estimer à quelle profondeur terrestre la pression est égale à la pression centrale de la lune.

On a déjà remarqué pendant la discussion sur la structure interne de la Terre que toute matière solide soumise aux pressions de cet ordre de grandeur tend à "couler" ; à une échelle de temps historique cet écoulement est lent, mais à l'échelle géologique ($\gg 10^6$ ans) il est rapide, et d'autant plus rapide que la température est élevée. On en conclut que la forme presque sphérique de la Lune, ainsi que le fait que son champ gravitationnel soit presque celui d'un corps uniforme et homogène, sont dûs aux forces écrasantes de la gravitation.

Le même raisonnement nous permet de cónclure que tout écart à l'équilibre hydrostatique (par exemple, les mascons) sera limité à une couche superficielle où la pression ne dépasse pas (c'est-à-dire, la pression à laquelle la matière solide n'est plus rigide) -son épaisseur est d'environ 200 km.

Remarquons que cet "argument" n'explique pas la formation des inhomogénéités -seulement leur durée de vie une fois formée.

2) INFORMATIONS SISMIQUES :

Depuis 1969, grâce aux Apollos 11 à 17, on a pu disposer des sismomètres sur la surface lunaire. Ces instuments fonctionnent toujours et nous renseignent sur la propagation des ondes sismiques à l'intérieur de la Lune.

Les signaux sismiques terrestres sont généralement produits par une des deux sources distinctes : phénomènes naturels dans une couche superficielle (c'est-à-dire aux profondeurs inférieures à 3% du rayon terrestre) ou explosions artificielles à la surface même. Du point de vue de l'étude de la structure interne, les deux sources servent aussi bien l'une que l'autre, les explosions artificielles étant préférables puisque leur position est connue a priori.

Les sismomètres installés sur la Lune fonctionnent essentiellement de la même façon que ceux utilisés sur la Terre et les méthodes d'analyse des signaux sont analogues, la précision étant limitée par le nombre relativement faible d'instruments.

Considérons d'abord les séismes naturels. On observe que la LUne est sismiquement beaucoup plus "silencieuse" que la Terre : environ 10^{15} erg d'énergie (équivalent à l'explosion de 200 tonnes de TNT seulement !) est dégagée sismiquement par an dans le cas de la Lune, tandis que la Terre produit environ 5×10^{24} erg. La plupart des séismes lunaires se trouvent à environ 750 km de profondeur, soit presque la moitié du rayon. De plus, on a constaté que ces séismes sont cycliques : à un endroit donné, les séismes se répètent tous les 14 jours. Les sources sismiques ne changent pas de position au cours du temps.

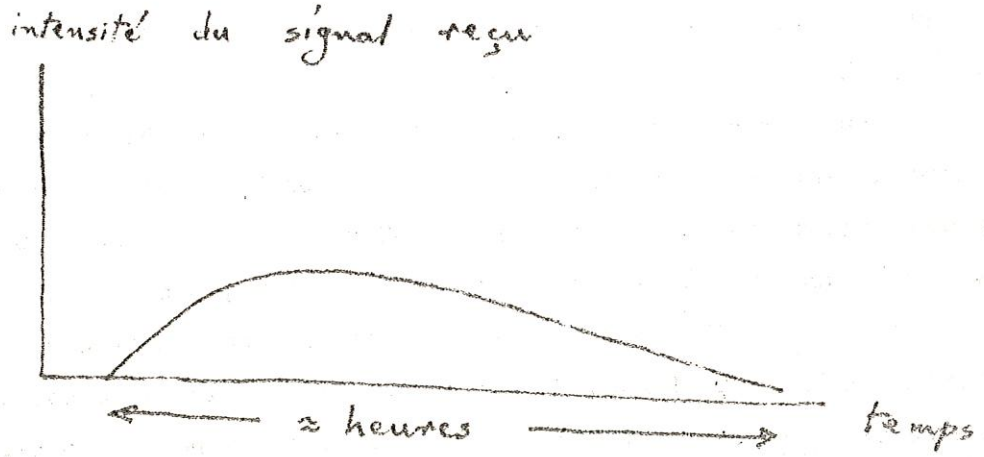
Tous les sismomètres ont été installés sur la face dirigée vers la terre. Or, quelques sources sismiques se trouvent de l'autre côté -par conséquent, on a pu étudier les ondes qui ont traversé les régions centrales On remarque que jusqu'à une profondeur d'environ 1000 km, les ondes longitudinales se propagent aussi bien que les ondes transversales. Par contre,

si le parcours passe plus près du centre que 700 km, les ondes transversales ne sont plus observées. En supposant que tout séisme déclenche les deux types d'onde, on conclut qu'il y a un "noyau" central dont l'état est plastique ou même liquide. Il est significatif que les séismes naturels se trouvent juste en dehors de la région où il pourrait y avoir un changement d'état.

La couche superficielle de la Lune paraît très stable -il y a très peu de séismes naturels. Les quelques rares événements observés sont généralement interprétés comme étant dûs à des impacts de météorites.

Pour étudier la Lune par des ondes sismiques, il a fallu créer des explosions ou (mieux encore) faire percuter le sol par des sondes ayant terminé leurs missions. Un avantage important de ces séismes artificiels est le fait qu'on connaît l'instant et la position du choc; on peut alors mesurer la vitesse de propagation de l'onde dans la couche superficielle de façon relativement précise. On observe ainsi deux phénomènes importants.

D'une part, le signal enregistré par un sismomètre donné croît très lentement ; une fois au maximum, l'amortissement est beaucoup plus faible. Pour des événements analogues sur la Terre, l'échelle de temps est de l'ordre de quelques minutes -sur la Lune, elle est de l'ordre de quelques heures.



QUESTION G7 : L'intensité d'un signal sismique superficiel croît lentement et s'amortit très lentement. En supposant que ce phénomène est dû aux propriétés de la couche superficielle quelle pourrait être sa nature ?

D'autre part, on a pu constater que, jusqu'à une profondeur d'environ 60 km, la vitesse des ondes longitudinales est de $\approx$ 7 km s^{-1}, et qu'elle change ensuite de façon discontinue à environ 8 km s^{-1} ; cette dernière vitesse s'applique jusqu'à $\approx$ 1000 km de profondeur. Par analogie avec la Terre, les premiers 60 km constituent "la croûte".

3) Informations thermiques :

Nous disposons à l'heure actuelle de très peu d'information sur l'état thermique à l'intérieur de la Lune. Au cours des missions Apollo 15 et 17, le gradient thermique a été mesuré en quelques endroits jusqu'à une profondeur d'environ 2 mètres : on a trouvé une croissance de la température de l'ordre de 1,5 deg m^{-1}. Il est bien évident que ces mesures sont sujettes à plusieurs incertitudes -par exemple, il pourrait y avoir des fluctuations locales très importantes (c'est le cas pour la terre) ; une profondeur de 2 mètres n'est pas particulièrement représentative, etc...

En tout cas, si la température s'accroît uniformément au taux indiqué, le "manteau" lunaire serait fondu et pas solide comme l'indique l'information sismique.

Nous avons déjà vu un phénomène analogue dans le cas de la Terre ; nous l'avons interprété par une accumulation d'élements radio-actifs près de la surface. En effet, les échantillons lunaires sont enrichis en matière radio-active -si la teneur en éléments radio-actifs était maintenue jusqu'au centre, l'énergie débitée par leur désintégration serait suffisante pour fondre le manteau.

Comme dans le cas terrestre, on ignore la raison de cette concentration de matière radio-active près de la surface.

LA STRUCTURE SUPERFICIELLE DE LA LUNE

L'étude de la structure superficielle de la Lune peut être répartie en deux grands domaines : d'une part, l'étude des grandes structures (les mers, les cratères, les "trous", etc...) ; d'autre part, l'étude des "aspérités" de sa surface, de sa nature à petite échelle ($\lesssim$ 1 m), de sa composition chimique et de son âge. Le premier groupe d'études a été

pratiqué depuis le début de l'astronomie télescopique ; quelques renseignements assez ambigus concernant la structure fine datent d'il y a un siècle, mais il a fallu des expériences spatiales pour les interpréter physiquement. On a trouvé que la structure fine ainsi que la structure à grande échelle trouvent une explication commune : on les interprète la plupart du temps en termes d'un processus universel de bombardement par météorites et "micro-météorites".

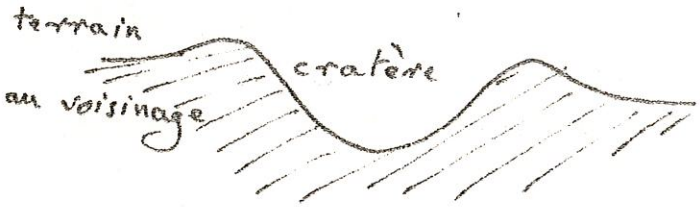
LES CRATERES :

Au premier abord, les cratères et les mers sont très grands, assez difformes et sombres ; les cratères sont relativement petits, presque toujours bien circulaires (mais aussi, dans quelques cas, elliptiques) et leur albédo est supérieur à celui des mers. Pourtant, depuis que nous avons pu observer la face "cachée" de la Lune, nous avons mis en évidence la présence de grand "bassins" dont l'échelle spatiale est celle des mers mais dont l'albédo est relativement élevé ; de plus, on observe des mers assez circulaires.

A l'heure actuelle, on pense que la plupart des cratères, ainsi que les mers, ont été formés à la suite d'un bombardement météorique.

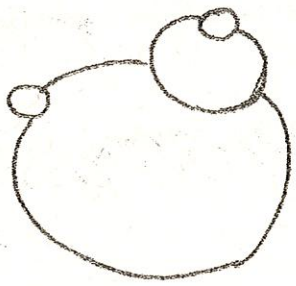
Mentionnons quelques raisons principales :

1) Vus de loin, la plupart des cratères ont très peu de caractères communs avec les volcans terrestres. En particulier, on remarque que les bords de beaucoup de cratères lunaires s'élèvent relativement peu au-dessus du terrain environnant : la profondeur est généralement plus grande que la hauteur des "remparts". On a souvent "l'impression visuelle" (!) qu'un cratère est la suite d'un effondrement.



De plus, les photographies prises en orbite autour de la Lune, et dont la résolution est de quelques mètres au moins (donc 1000 fois meilleure que la meilleure résolution possible avec des instruments terrestres) montrent que la surface lunaire est "parsemée" d'un très grand nombre de "mini-cratères" -essentiellement des trous de toutes dimensions (du mètre au kilomètre) dont l'origine ne peut pas être volcanique.

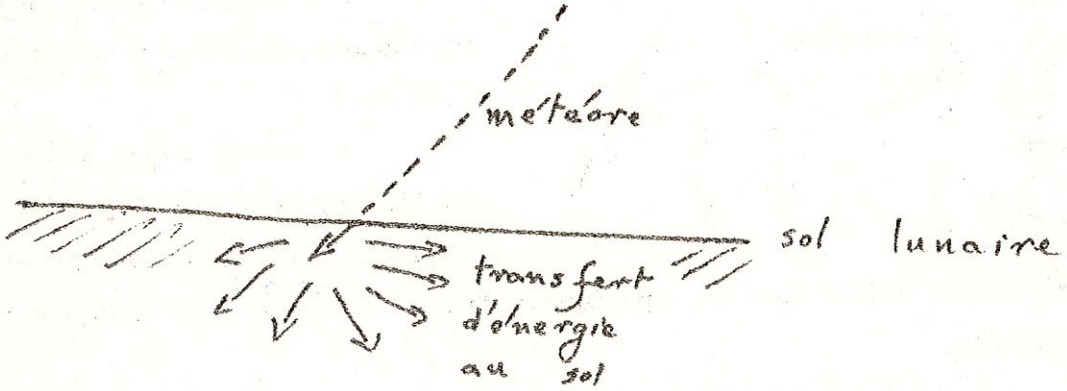
2) Beaucoup de cratères sont "à cheval" sur les bords d'autres cratères.

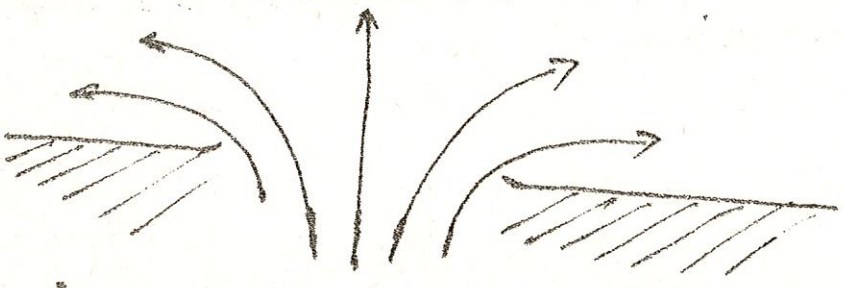


Le rempart du cratère "principal" n'est pas observé à l'intérieur du cratère "secondaire" : on a l'impression visuelle que le cratère secondaire (au moins) a été formé par l'impact d'un corps solide avec la surface.

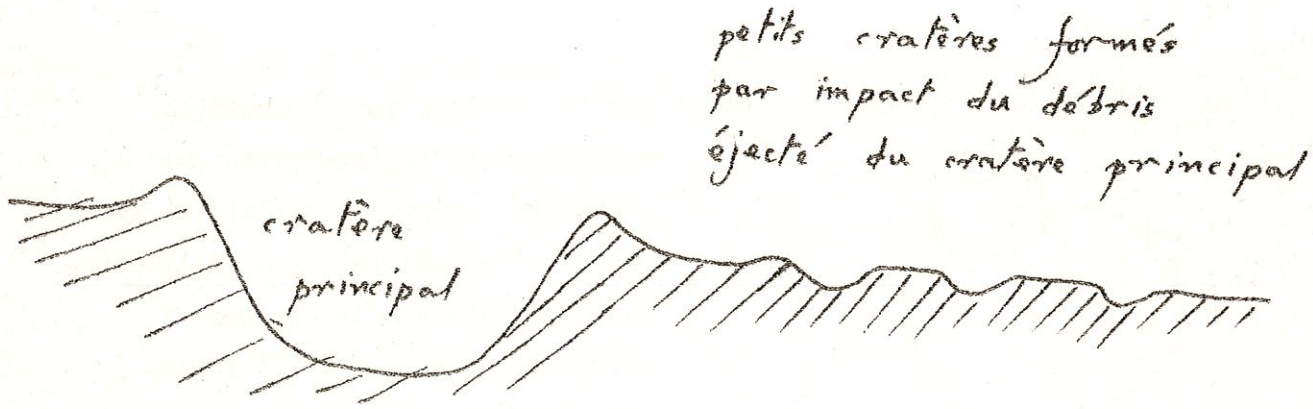
3) Une critique qui a été soulevée contre l'origine météorique des cratères est leur forme circulaire. Puisqu'il n'y a aucune raison pour que les météores n'arrivent que verticalement, on devrait, disait-on, observer un grand nombre de cratères elliptiques.

Cette critique suppose que les météores "creusent" des trous ; or, à l'heure actuelle, on pense que le processus est plutôt un <u>transfert</u> d'énergie cinétique du météore au sol, suivi d'une "explosion" de celui-ci. Or cette "explosion" est symétrique et les cratères ainsi créés sont circulaires.

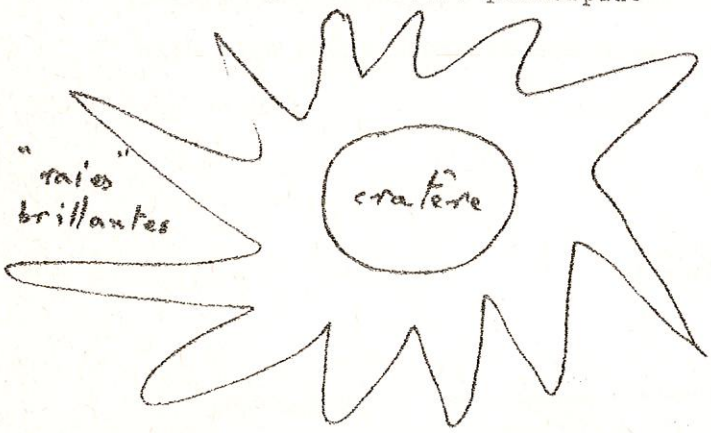




"explosion" due à l'énergie localement piégée dans le sol



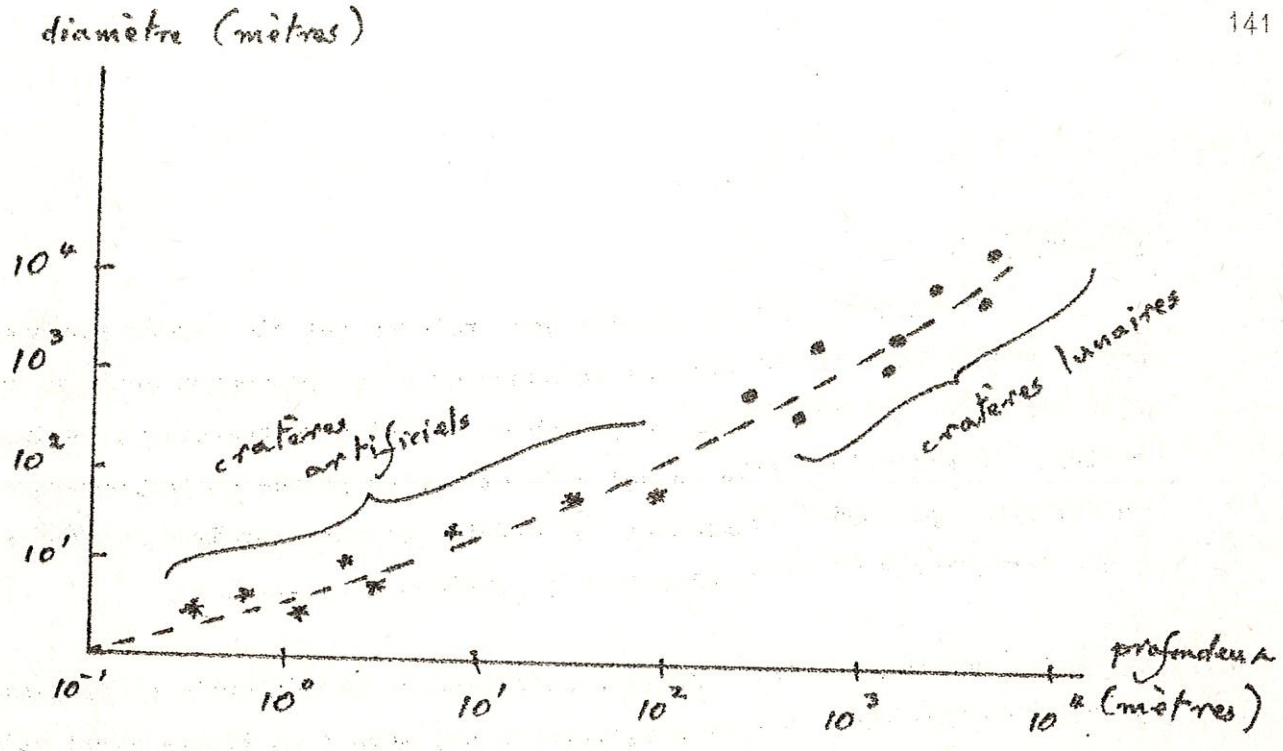
Cette interprétation prévoit l'éjection de grandes quantités de matière suivie éventuellement par la formation des petits cratères dans le voisinage du cratère principal.



On prévoit aussi l'éjection d'une matière fine, ce qui expliquerait la présence des "raies" relativement brillantes associées à certains cratères.

La formation des cratères est facile à étudier sur Terre -à partir des explosions artificielles. Ainsi a-t-on établi une loi empirique entre le diamètre d'un cratère et sa profondeur.

Le diamètre et la profondeur des cratères lunaires peuvent être mesurés de façon relativement simple (comment ?) ; on trouve que les cratères lunaires se placent très bien sur l'extrapolation de la courbe établie pour les cratères artificiels.



echelles logarithmiques !!

Remarquons que la loi expérimentale est très utile : puisqu'elle a été établie en utilisant des explosions de puissance connue, nous pouvons, à partir du diamètre d'un cratère arbitraire, estimer l'énergie cinétique nécessaire à sa création.

4) Si la plupart des cratères lunaires sont les produits d'un bombardement météorique, et si pendant ce bombardement la Lune était dans le voisinage de la Terre, celle-ci aurait dû également recevoir des "coups". Pourquoi n'observe-t-on pas beaucoup de cratères météoriques à la surface de la Terre ?

Les différences les plus importantes entre la Terre et la Lune à cet égard sont l'atmosphère et l'activité géologique terrestres.
En effet, dans un délai de l'ordre de quelques millions d'années (délai très faible à l'échelle cosmique de 10^9 ans), une structure terrestre qui n'est pas "renouvelé" disparaît par l'effet d'érosion, ou parce qu'elle s'enfonce dans la croûte. Il est intéressant de constater que les cratères météoriques récente (géologiquement) suivent la loi empirique masse-profondeur.

5) La micro-structure des roches recueillies à proximité des cratères met en évidence qu'elles ont été formées par un processus très violent -par exemple, par des chocs très forts.

LES "MERS" :

Si on admet que la plupart des cratères ont été formés par bombardement météorique, il est naturel de supposer qu'un processus analogue a créé les mers. Les météorites responsables devant être beaucoup plus importantes, l'énergie transmise au sol a dû être plus grande et par conséquent la surface a pu fondre localement. En effet, les mers lunaires ressemblent à des écoulements de lave solidifiée ; pourtant .....

1) La loi empirique entre l'énergie cinétique de la météorite et le diamètre du "trou" ainsi créé peut être extrapolée aux mers : on trouve ainsi qu'il faut une énergie de l'ordre de 10^{32} ergs pour créer une mer de quelques centaines de kilomètres de diamètre. On ne connaît pas à priori la vitesse des météorites présumées ; si on suppose qu'elle était typiquement inférieure à la vitesse d'évasion à la surface de la Lune, on trouve :

$$E_{cinétique} = 10^{32}$$

$$= \frac{m}{2}_{météore} \; v^2_{météore}$$

$$\simeq \frac{m}{2}_{météore} \left(\frac{2 G M_{☾}}{R_{☾}} \right)$$

d'où :

$$m_{météore} \approx 10^{22} \text{ g}$$

Si ce corps avait une densité de l'ordre de 4 g cm^{-3}, sa dimension devrait être de l'ordre de $(10^{22}/16)^{1/3}$ cm $\approx$ 300 km.
Il est très significatif à cet égard que les mers semblent être associées avec les "mascons" ; pourtant, ces anomalies gravitationnelles sont telles que la dimension du corps éventuel enfoncé dans le sol est de l'ordre de 50 à 200 kilomètres seulement.

2) Si on associe un mascon avec les restes de la météorite qui a creusé la mer, on prévoit que les grands cratères (ceux, par exemple, dont le diamètre dépasse 100 km) doivent être associés eux aussi avec des "mini-mascons". Or, l'expérience montre le contraire : les grands cratères sont associés avec un manque de masse.

3) Si on admet que toute collision de la Lune avec un très grand corps peut créér un énorme "trou", chauffant le sol à une température qui déclenche un écoulement de lave, on ne comprend pas la formation des grands "bassins" sur la face cachée de la Lune, dont la profondeur et le diamètre sont importants mais dont l'intérieur ne ressemble pas (visuellement) à la matière dont les mers sont composées.

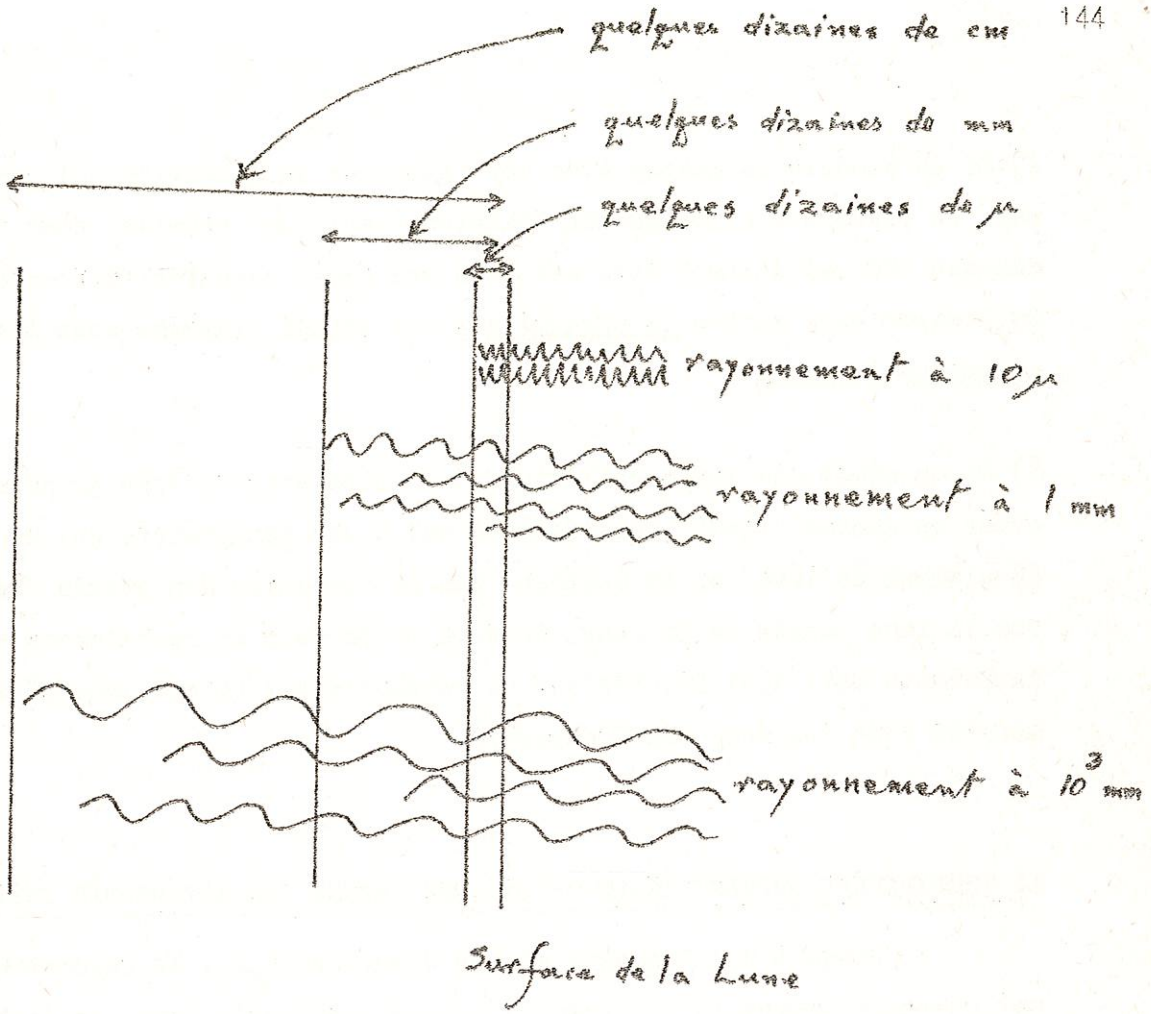
LA TEMPERATURE SUPERFICIELLE DE LA LUNE (ETUDE PAR ASTRONOMIE INFRA-ROUGE)

Jusqu'à une longueur d'onde d'environ 5 μ , le rayonnement lunaire est essentiellement le rayonnement solaire réfléchi. Donc, sa distribution spectrale ne peut pas nous renseigner sur la température superficielle de la Lune.

Comme nous l'avons déjà vu, un corps en équilibre thermique à la même distance du Soleil que la Terre se chauffe à une température de l'ordre de 300°K ; on prévoit alors que la surface éclairée de la Lune va émettre la plupart de son rayonnement dans le domaine spectral autour de $\frac{3000}{300} \approx 10\mu$

On en conclut que les propriétés thermiques de la Lune peuvent être étudiées dans l'infra-rouge lointain.

Remarquons qu'il s'agit ici d'un rayonnement émis : par conséquent, l'étude n'est pas limitée à une analyse de la surface seulement. En effet, (comme nous l'avons remarqué dans le cas du radar), différents domaines spectraux pénètrent différentes épaisseurs de matière. En particulier, le rayonnement observé à 10 μ est émis par une couche dont l'épaisseur est de quelques millimètres seulement, tandis qu'un rayonnement observé à $\approx$ 1 m est émis par une couche dont l'épaisseur est de quelques dizaines de cm.



L'atmosphère terrestre est très opaque à l'infra-rouge, sauf dans quelques rares "fenêtres" -par exemple autour de 10 μ et aux longueurs d'ondes supérieures à 1mm. Par conséquent, il n'est pas question de dresser la courbe de Planck pour la Lune à toutes les fréquences. En effet, on suppose que le rayonnement est celui d'un corps noir ; on a alors :

$$E(\nu) \propto \frac{\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

la constante étant constituée des quantités connues (puisque l'on connaît la superficie de la Lune). Donc, en principe, il suffit de mesurer l'énergie rayonnée par la Lune à une fréquence donnée (ou dans un domaine spectral limité) pour pouvoir estimer la température.

QUESTION G8 : Pour quel autre corps a-t-on utilisé différents domaines spectraux pour étudier différentes régions ?

Les observations faites dans le domaine 8-12 μ -(résultats qui concernent par conséquent une profondeur de quelques dizaines de microns) montrent que la température superficielle est dominée entièrement par l'éclairement solaire ; en plein "jour" lunaire (mesures faites, par exemple, pendant la pleine Lune) la température atteint presque 400°K, tandis que pendant la "nuit" (mesures faites, par exemple, pendant une nouvelle Lune ou une éclipse) la température descend à 80°K. Le refroidissement (ou l'échauffement) à un endroit donné de la Lune sont rapides et suivent très bien les couchers et les levers du Soleil correspondants.

A mesure que nous observons sur des longueurs d'onde de plus en plus grandes -donc, à mesure que le rayonnement est émis par des couches de plus en plus épaisses- la différence entre la température journalière et la température nocturne diminue et la variation suit de plus en plus lentement les couchers et les levers du Soleil. Finalement, le rayonnement à 1000 mm (domaine radio) est stable : à une profondeur de quelques dizaines de centimètres, les observations nous amènent à penser que la température est constante et voisine de 240°K.

QUESTION G9 : A une profondeur de 30 cm, la température reste constante et proche de 240°K, même quand la température superficielle est de 400°K ou 80°K. En tenant compte du fait que la "nuit" et le "jour" lunaire en un endroit donné durent plusieurs jours, quelle est votre conclusion concernant la conductibilité thermique de la couche superficielle ? Pouvez-vous suggérer une raison ? Y a-t-il un rapport avec le comportement curieux des ondes sismiques déclenchées à la surface ?

LA NATURE DE LA COUCHE SUPERFICIELLE

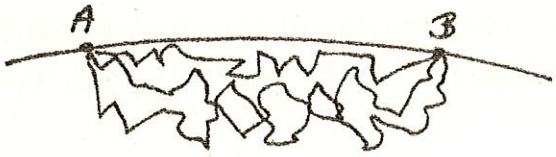
Depuis 1946, nous avons pu étudier le Lune par écho radar, en utilisant les ondes radio-électriques dans le domaine spectral compris entre 10 cm et quelques dizaines de mètres.

La puissance relative de l'écho peut être comparée avec celle obtenue en laboratoire en utilisant divers échantillons de matière terrestre. On a mis ainsi en évidence un phénomène remarquable : jusqu'à une longueur d'onde de quelques dizaines de mètres, l'écho est beaucoup plus faible que les échos obtenus expérimentalement en utilisant une cible composée de matière solide et continue. Les échos lunaires à ces longueurs d'onde sont beaucoup plus faibles que les échos des rochers, des montagnes, des écoulements de lave, etc...

La densité moyenne de la Lune étant de même ordre de grandeur que celle de la couche superficielle de la Terre, on suppose que les compositions chimiques sont semblables (mais voir plus loin). Par conséquent la faiblesse des échos radar doit être due à une différence de structure entre la surface de la Lune et celle de la Terre ; en particulier, le pouvoir de réflexion d'une couche granuleuse est très faible. De plus, nous savons que la profondeur de pénétration d'un signal radio-électrique est de l'ordre de quelques longueurs d'onde : par conséquent, puisque l'écho est faible jusqu'à une longueur d'onde de quelques dizaines de mètres, on en conclut que la profondeur de cette couche granuleuse est de l'ordre d'une centaine de mètres.

Nous pouvons maintenant interpréter le comportement des ondes sismiques superficielles et la variation de la température avec la profondeur.

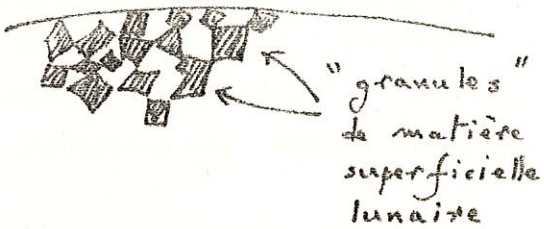
1) PROPAGATION DES ONDES SISMIQUES DANS UN MILIEU GRANULEUX



Considérons un choc superficiel en A et un sismomètre en B. Si le milieu était continu, le sismomètre enregistrerait un seul choc quelque temps après. Par contre, dans un milieu granuleux, le signal

peut arriver en B suivant des parcours différents. Comme la longueur de chaque parcours est différente, l'arrivée du signal est étalée dans le temps ; de plus, si on suppose que les "grains" sont durs, l'amortissement est faible et la durée de vie du signal est grande.

2) LA VARIATION DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DU TEMPS A DIFFERENTES PROFONDEURS



Considérons maintenant la conduction de chaleur dans un milieu granuleux. D'un "grain" à un autre, la plus grande partie de la chaleur n'est transmise que par les points de contact; par rapport à un milieu continu, le nombre de contacts est faible et la chaleur est très mal transmise. Donc, la conductibilité thermique d'un milieu granuleux est très faible et au-delà d'une profondeur particulière, le milieu reste isolé thermiquement.

En ce qui concerne la surface même, les expériences astronautiques et les photographies du sol lunaire ont complètement vérifié cette notion. La surface est loin d'être continue, contrairement à l'aspect qu'elle présente depuis la Terre : les objets posés sur le sol (sondes, astronautes, etc...) s'enfoncent de quelques centimètres dans un milieu granuleux. Il ne s'agit pas de poussière, les grains étant durs et résistants; ils sont manifestement les produits de processus plus ou moins violents.

Tous les endroits étudiés de près (mers, continents, cratères) sont couverts de cette couche finement "moulue" sur laquelle on trouve des cailloux, des rochers... On trouve des granules non seulement sur le sol, mais aussi dans les anfractuosités des grands rochers. Le terrain lunaire est loin d'être escarpé : il est plutôt ondulé -on dirait "érodé".

Les roches lunaires rapportées en laboratoire manifestent un autre phénomène remarquable : elles sont couvertes de petits trous à l'échelle de quelques dizaines de microns, apparemment creusés par des grains de matière arrivant à grande vitesse.

Topologiquement, ces "micro-trous" ressemblent en quelque sorte aux cratères habituels.

UNE HYPOTHESE UNIFIEE SUR L'ORIGINE DE LA STRUCTURE SUPERFICIELLE DE LA LUNE

Nous avons déjà interprété la formation des cratères et des mers en termes d'un bombardement par corps solides. Pourtant, à l'heure actuelle, très peu de corps massifs tombent sur la Lune (de temps en temps les sismographes enregistrent un impact -mais rien n'a été observé visuellement).

Or, d'une part, on a pu montrer (par l'analyse radio-active des roches rapportées de la Lune -on n'étudiera pas la méthode dans ce cours) que les événements principaux qui ont créé une grande partie de la topographie observée ont eu lieu il y a $3,3 - 4,2 \times 10^9$ ans. Cet "âge" varie un peu selon l'endroit considéré ; par exemple, on trouve que les écoulements de lave dont les mers sont composées sont de quelques centaines de millions d'années plus jeunes que les roches fragmentées apparemment associées avec la formation des mers mêmes. (Cette différence d'âge n'est pas encore comprise). De plus on trouve un petit nombre de cratères relativement jeunes -c'est-à-dire, dont l'âge est de l'ordre de 8×10^8 ans.

D'autre part, en utilisant les mêmes méthodes, on trouve que l'âge des échantillons du sol lunaire (c'est-à-dire, de la matière granuleuse) est proche de $4,6 \times 10^9$ ans ; cet âge varie très peu avec l'endroit.

QUESTION G10 : 1° La densité de cratères sur la Lune varie avec l'endroit. Si l'on admet l'hypothèse du bombardement, comment peut-on interpréter cette variation ?
2° Dans le cas des cratères ayant des "raies" de matière relativement brillante, on observe qu'elles paraissent "superposées" sur les cratères traversés. Quel est l'âge relatif des cratères ayant des "raies" ?

Un âge déduit par analyse de la matière radio-active indique essentiellement l'époque à laquelle la matière a été entièrement fondue. On observe que la matière la plus répandue (les "granules" du sol) est aussi la plus vieille : on conclut que déjà il y a $4,6 \times 10^9$ ans la surface de la Lune était solide.

Dans le système solaire, les corps les plus vieux dont on a pu estimer l'âge sont les météorites -leur âge est environ $4,6 \times 10^9$ ans.

Si l'on associe les météorites avec les restes de la matière dont le système solaire a été formé, on en conclut que $4,6 \times 10^9$ ans représente aussi l'âge du système solaire. Par conséquent, la Lune a dû se former tout-de-suite (cosmiquement parlant !) par un processus qui n'a pas fondu la surface (cf. plus loin).

On interprète la topographie lunaire en termes de bombardement : on observe que ce bombardement intense n'a duré qu'environ $1,3 \times 10^9$ ans. On en conclut que pendant cette période initiale, les environs du système Terre-Lune étaient remplis d'un grand nombre de météorites, d'astéroïdes, de planétoïdes, etc... Ce bombardement aurait non seulement "sculpté" la topographie, mais aurait contribué aussi à la formation des rochers, des cailloux et plus généralement à la "moulure" de la grande partie de la couche superficielle.

Au bout de $1,3 \times 10^9$ ans, le bombardement intense s'arrête (on ne sait pas pourquoi) ; pourtant, il subsiste encore quelques corps "errants" qui produisent les "jeunes" cratères. Plus important, malgré la disparition des grands corps, le bombardement par "micro-corps" (10^2 - 10^{-8} g) continue, ce qui amène à la formation des petits cratères, des "micro-trous" dans les rochers et plus généralement à une sorte "d'érosion" globale de la surface. Ce processus sera reponsable de la structure fine. D'une part, la matière météorique ramassée par la Lune y reste, formant au cours du temps une petite couche ; d'autre part, l'arrivée de ces "micro-corps" va "remuer" la surface, ce qui amène au cours du temps à un mouvement des granules de l'intérieur vers l'extérieur et vice versa. Ce "cyclage" n'est pas rapide, mais sur l'intervalle de 10^8 ans a pu pénétrer jusqu'à 10 - 100cm.

Si l'on admet cette hypothèse, la Lune représente un important "fossile" de l'état primitif du système solaire. A cause de son activité géologique, la Terre ne peut pas nous renseigner sur une période antérieure à $3,5 \times 10^9$ ans -c'est-à-dire, une époque où la Lune avait déjà acquis essentiellement son aspect actuel et où la plupart des corps responsables de sa sculpture avaient disparu.

QUESTION G11 : On suppose à partir des estimations expérimentales, que la quantité de poussière météorique déposée sur la Lune à l'heure actuelle est de $10^{-8} gcm^{-2} sec^{-1}$. En supposant que ce taux a été constant depuis la formation de la Lune, estimer l'épaisseur de la couche formée.

Si notre "scénario" est correct, la Lune représente aussi une importante "poubelle" : tout ce qui a été ramassé depuis sa formation y reste (mais, malheureusement, probablement pas à la surface même). Depuis sa formation, le système solaire a tourné environ 20 fois autour de la Galaxie ; la matière lunaire pourrait alors garder des traces des régions traversées pendant cette période.

LA COMPOSITION CHIMIQUE DE LA SURFACE LUNAIRE

La densité moyenne de la Lune, 3,3 g cm^{-3}, est très voisine de celle de la croûte terrestre. On en conclut que les compositions chimiques sont semblables -c'est-à-dire qu'on prévoit la présence de minéraux dont la composition est dominée par le silicium, l'oxygène et l'aluminium.

Les échantillons analysés en laboratoire confirment cette notion. On trouve, comme sur le sol terrestre, que les trois éléments les plus abondants sont respectivement l'oxygène, le silicium, l'aluminium et le fer.

Pourtant, une analyse détaillée met en évidence des différences importantes.

1) LES PROPORTIONS DE DIFFERENTS ELEMENTS NE SONT PAS LES MEMES QUE SUR TERRE

En particulier, l'oxygène et le fer semblent surabondants par rapport à la croûte terrestre, tandis que le sodium est sous-abondant.

2) LA REPARTITION DES DIVERS MINERAUX N'EST PAS LA MEME

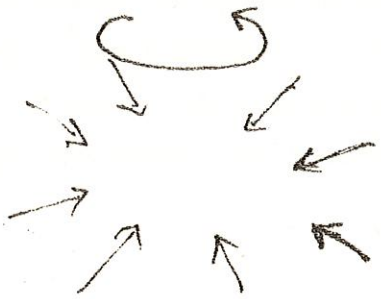
De plus, on observe que la distribution des éléments n'est pas uniforme : il semble que la teneur en métaux n'est pas la même pour les "mers" que pour le terrain "continental".

QUELQUES REMARQUES SUR L'ORIGINE DE LA LUNE

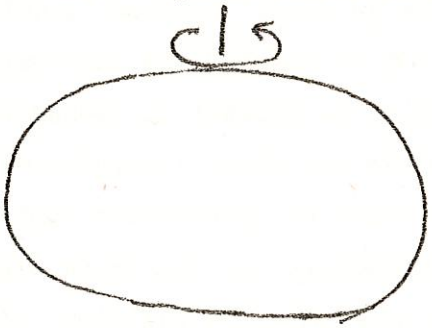
Nous avons déjà vu que la Lune s'éloigne lentement de la Terre à cause des phénomènes des marées. On en conclut que dans le passé la Lune a été plus proche de nous ; cette observation a donné lieu (vers la fin du 19e siècle) à l'hypothèse selon laquelle la Lune a été formée par fission de la Terre primitive.

Plusieurs "scénarios" ont été proposés : en voici une version relativement moderne :

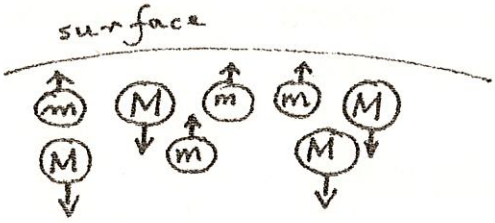
1)



La Terre est formée par la "condensation" de la matière primitive (sans préciser davantage ce que veut dire "condensation"). Sa vitesse de rotation sur elle-même est supposée beaucoup plus rapide que maintenant, de sorte qu'un "bourrelet" à peine stable se forme.



2) On suppose que la matière primitive dans le voisinage du Soleil était homogène. Par conséquent, la Terre primitive aurait dû l' être aussi.



Au cours du temps, un processus de "diffusion" a lieu ; les atomes massifs M (par exemple, le fer) diffusent vers le centre de la Terre, tandis que les atomes plus légers (par exemple le silicium) montent vers la surface. Or, le moment angulaire J d'un corps solide est exprimé par :

$$J = \omega \sum_i M_i r_i^2$$

où :

M_i = masse à rayon r_i

ω = vitesse angulaire de la Terre.

Si la distribution de masse change de sorte que les grandes masses s'établissent vers le centre, la somme $\sum_i M_i r_i^2$ décroît : comme le moment angulaire reste conservé, ω s'accroît.

QUESTION G12 : On considère une sphère de rayon R composée de nombres égaux d'atomes de masse m et de masse M. Au début, la distribution d'atomes est homogène, la densité est uniforme et la vitesse angulaire est . Au cours du temps, tous les atomes de masse M diffusent vers le centre et occupent une région de rayon R/2 ; tous les atomes de masse m occupent alors la couche superficielle. Trouver une expression pour la vitesse angulaire de la sphère quand la séparation est terminée.

3) 

A la fin de cette période, la Terre tourne plus vite qu'au début ; comme nous avons supposé que le "bourrelet" était à peine stable, l'accroissement de la vitesse angulaire amène à une division de la Terre en deux morceaux. L'effet des marées est déclenché sur la Lune : celle-là commence à s'éloigner et le système évolue jusqu'à l'état que nous observons maintenant.

La densité moyenne de la Terre -approximativement égale à celle de la croûte terrestre- semble en bon accord ; de plus, le noyau de la Terre (comme nous l'avons dit précédemment) est probablement composé d'un mélange de fer et de nickel.

A l'heure actuelle, il est très difficile de soutenir cette hypothèse (ce qui n'empêche pas que certains astrophysiciens la soutiennent encore !). Il y a trois raisons principales.

1) L'instabilité de la Terre était principalement due à sa rotation. On suppose que la Terre était dans un état plastique : par conséquent, la force de cohésion était essentiellement la force de gravitation et on peut trouver la limite inférieure de la vitesse de rotation au moment de la fission (pourquoi limite inférieure ?). Nous pouvons alors trouver le moment angulaire que la Terre aurait dû avoir pour pouvoir se diviser. Or, on sait que la distance de la Terre au Soleil n'a pas changé depuis sa formation ; donc, le moment angulaire du système Terre-Lune n'a pas changé depuis sa formation.

Nous pouvons calculer le moment angulaire du système à l'heure actuelle (il y a trois contributions, lesquelles ?) ; on trouve qu'il est beaucoup plus faible que celui exigé au départ. Il est difficile de bricoler un modèle plausible (par exemple, avec des corps "errants" qui emportent une fraction du moment angulaire....) qui soit satisfaisant.

2) L'âge de la matière superficielle de la Lune est le même que l'âge des météores. On en conclut que la création de la surface lunaire était contemporaine avec celle des météores, ce quisemble exclure la création d'une Lune encore "plastique" quelques temps après la formation du système solaire.

3) La composition chimique superficielle de la Lune n'est pas exactement celle de la Terre. Si on soutient l'hypothèse de la fission, il faut inventer un mécanisme qui aurait pu répartir les éléments de cette façon.

4) Le "scénario" présenté ici est limité à la Terre. Or, beaucoup d'autres planètes possèdent des satellites : il serait plus satisfaisant de pouvoir expliquer la formation de tous les satellites par un processus unifié.

A l'heure actuelle, on ne connaît pas l'origine de la Lune. On pense que sa formation est contemporaine de celle des autres planètes, et que des mécanismes analogues (inconnus jusqu'alors) ont fonctionné. En particulier, il n'y a aucune raison pour que le "bombardement" primitif présumé se soit limité à la Lune : on prévoit que le système solaire primitif était rempli d'une grande quantité de débris -des météorites, des astéroïdes, des planétoïdes de toutes sortes, etc... La Terre n'a pas gardé les traces de ce bombardement éventuel : y a-t-il d'autres corps dans le système solaire où l'activité géologique et atmosphérique ont été trop faibles pour l'effacer ?

En effet, depuis l'exploration spatiale, on en connaît trois : Mercure, Mars et Phobos, satellite de Mars.