

LA MORPHOLOGIE DE LA LUNE
COMPARAISON AVEC LA TERRE ET MARS

Camille EK
Chef de travaux et
maître de conférences
à l'Université de Liège

RESUME

La morphologie de la Lune montre essentiellement l'influence des impacts de météorites. Les différences avec la morphologie terrestre (absence d'océans, de vallées, absence aussi de plissements et donc de chaînes de montagnes) sont dues à l'absence d'eau, elle-même liée à l'absence d'atmosphère. Nous suivons ainsi A. CAILLEUX qui lie les caractères tectoniques majeurs à la présence sur la Terre et l'absence sur la Lune d'atmosphère d'hydrosphère.

Mars se présente, dans ce cadre schématique, comme un cas intermédiaire entre la Terre et la Lune, avec toutefois un caractère original : sa température moyenne plus basse, liée à sa plus grande distance du soleil.

ABSTRACT

Moon morphology compared with the Earth and Mars. Moon morphology displays overall the effects of meteorites falls. The differences with terrestrial morphology (absence of oceans, valleys, folded formations and mountains ranges) are due to water absence, itself linked to the absence of any atmosphere. We thus follow A. CAILLEUX who relates, on both globes, tectonic characteristics to the occurrence of an atmosphere and a hydrosphere.

In this schematic frame, Mars is typically an intermediate case between the Earth and the Moon, with an original feature : its lower mean temperature, linked to its greater distance to the Sun.

Plusieurs courtes publications d'André CAILLEUX ont attiré notre attention sur l'intérêt de la comparaison de la morphologie de la Lune avec celle des planètes.

Nous tenons à rendre hommage à l'originalité de la pensée d'André CAILLEUX que nous confrontons ici avec les données les plus récemment acquises sur le relief de la Lune et celui de Mars.

1. - LES ROCHES DE LA LUNE

Les six missions Apollo ayant aluni ont rapporté en tout 380 kilos d'échantillons. Les missions russes Luna 16 et Luna 20 ont rapporté en outre près d'un kilo supplémentaire (KING, 1976).

Dans les *Terres*, les roches sont surtout de la famille des anorthosites (roches magmatiques de teinte claire, composées essentiellement de feldspaths plagioclases) et des gabbros.

Dans les *Mers*, les roches sont surtout des basaltes et des microgabbros. Ces roches ont une densité qui peut dépasser 3, tandis que les anorthosites et gabbros des *Terres* ont une densité qui va généralement de 2,8 à 3,0.

La densité des roches de la surface de la lune est donc supérieure à la densité moyenne des roches terrestres (2,7) et n'est pas très inférieure à la densité moyenne globale de l'astre (3,3) tandis que la Terre a une densité moyenne de 5,5.

Les roches lunaires dont nous venons de décrire la composition se retrouvent parfois sous forme de brèches, ayant subi une fragmentation, une fusion partielle et une re-consolidation. Ces phénomènes sont dus aux chocs des météorites.

En beaucoup d'endroits, des brèches surmontent les anorthosites et les basaltes. Au-dessus des brèches s'observe un matelas de désagrégation formé de fragments de roches et de poussières. Le tout est souvent recouvert par le "sol" poussiéreux dans lequel se sont imprimés les pas des astronautes des six missions Apollo. Cette poussière a généralement une granulométrie dont la médiane vaut 30 à 100 microns et sont donc des *silts* (des "limons").

La matière des sols provient pour 98 ou 99 % de la Lune elle-même et pour 1 ou 2 % de météorites. Les météorites tendent à briser les roches en menus fragments, mais aussi, localement, à les fondre et par là à souder certains fragments. Les météorites volatilisent en outre les corps volatils (carbone, azote, etc,...) apportés (en quantités très faibles, il est vrai) par le vent solaire.

Les petites météorites et le vent solaire sont donc les deux facteurs principaux de l'évolution du "sol" lunaire : sur la Terre, il en est tout autrement car l'atmosphère arrête une grande partie du vent solaire et volatilise les petites météorites (CAILLEUX, 1976).

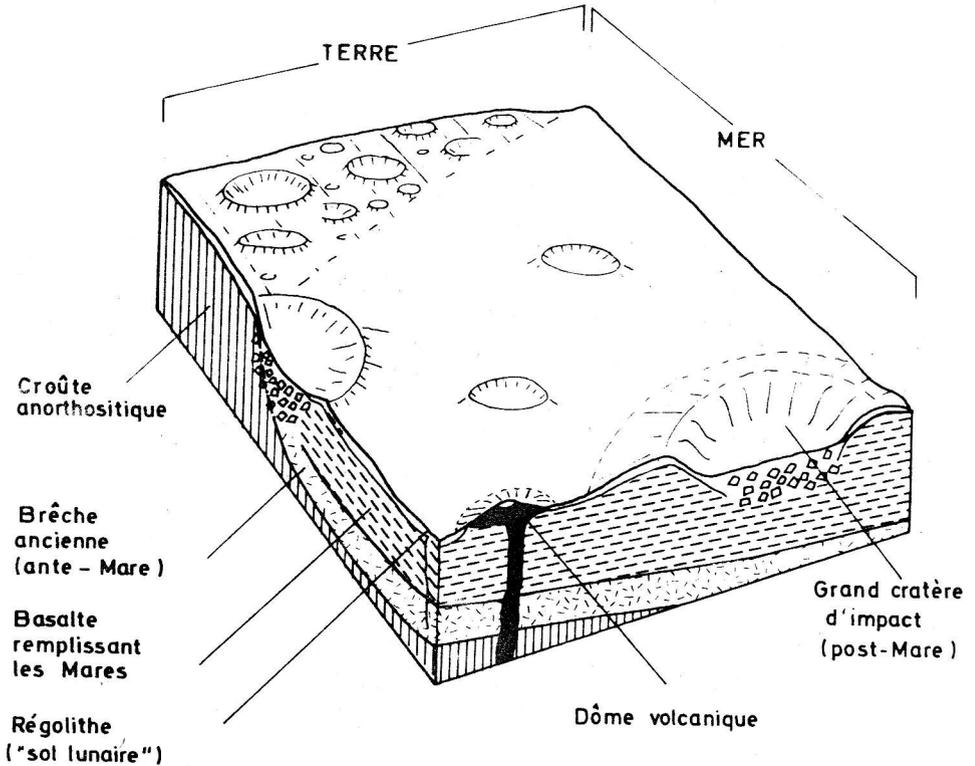


FIGURE 1 : Les traits majeurs de la morphologie lunaire
(inspiré de Moon, Mars and Meteorites, 1977)

2. - ANOMALIES DE PESANTEUR ET SEISMES LUNAIRES

L'étude des orbites des véhicules spatiaux tournant autour de la Lune a permis de détecter des anomalies de pesanteur significatives (MULLER et SJOGREN, 1968).

On sait que si la Lune était en équilibre isostatique parfait, les orbites de ses satellites occasionnels seraient de parfaites ellipses.

Les irrégularités des orbites ont permis de remarquer deux faits intéressants. Le premier est que l'équilibre isostatique de la Lune est plus poussé, mieux réalisé, que celui de la Terre : les anomalies sont moins importantes. Le second est que les anomalies positives (ou "concentrations de masse", *mascons*) sont situées dans les *Mers*.

Si l'on suppose que les basaltes, qui sont les roches les plus abondantes dans les *Mers*, continuent sous celles-ci jusqu'à 200 km de profondeur, ils doivent avoir là, du fait de la pression, une densité de l'ordre de 3,7. Cela est difficilement compatible avec la densité moyenne

de 3,3 de notre satellite. Il faut donc admettre que les basaltes ne se prolongent pas massivement à grande profondeur, mais qu'ils reposent sur un matériau moins dense, tel les anorthosites affleurant sur les *Terres*.

Les sismographes installés sur la Lune par les engins Appolo ont enregistré des secousses sismiques d'origine artificielle (impacts d'engins spatiaux, explosions expérimentales), mais aussi des séismes naturels, provenant soit de la chute de météorites, soit de l'intérieur de la Lune elle-même. Ces derniers sont nombreux (près de 2000 par an) mais très faibles : leur magnitude maximale ne dépasse pas 2 (sur la Terre : 8); les séismes les plus forts sont donc $10^8 : 10^2 = 10^6$ fois moins intenses que ceux de la Terre. L'intérieur de la Lune est donc beaucoup plus stable que celui de la Terre. De plus, les foyers des séismes (800 à 1100 km) sont beaucoup plus profonds que sur Terre (env. 30 km; presque jamais plus de 800 km).

En résumé, la Lune, surtout dans sa partie peu profonde, est très stable et sismiquement presque morte.

3. - LE RELIEF LUNAIRE

Grâce à un altimètre *laser*, le module de commande d'Apollo 15 a fourni un profil altimétrique de la Lune qui montre des dénivellations de l'ordre de 10 000 m entre les points les plus hauts et les points les plus bas survolés. La Lune a donc un relief proportionnellement beaucoup plus accidenté (quatre fois plus) que celui de la Terre.

La même expérience *laser* a aussi montré l'extraordinaire platitude de certaines *Mers*, dont l'altitude moyenne ne variait que de 150 m sur 200 à 600 km de parcours (KING, 1976) (1).

Les traits les plus spectaculaires du relief de la Lune sont les cratères d'impact de météorites. Mais si le relief dû à l'impact est impressionnant, par contre la matière apportée par ces météorites ne correspondrait qu'à une couche de 6 cm d'épaisseur depuis l'origine (CAILLEUX, 1976) : les météorites contribuent donc peu à l'accrétion de la Lune.

Les cratères peuvent être très grands : Clavius a 250 km de diamètre. Mais, en outre, les *Mers* semblent elles-mêmes de vastes cratères météoriques : leur forme est circulaire, les hauteurs qui les circonscrivent sont comme les traces d'un vaste bourrelet périphérique (2). Le fond basaltique des *Mers* semble dès lors être venu, fondu, de l'intérieur, à la suite des titaniques chocs, et on s'explique comment dans les *Mers*

(1) Le rayon *laser* "illuminait" sur la Lune une surface de 30 m de diamètre environ et fournissait des données altimétriques à 2 m près.

(2) Idée déjà émise par G.K. GILBERT en 1893.

affleurent au-dessus des anorthosites des roches venues d'en dessous. La forme des *Mers* serait donc d'origine cosmique et le remplissage autochtone.

Des rainures rectilignes semblent constituer des crevasses par où de la lave est montée ou, parfois, des grabens. Les sillons sinueux sont probablement des vestiges de tubes de laves car ils prennent naissance dans des cratères.

4. - EROSION, TRANSPORT, SEDIMENTATION

L'érosion du relief lunaire est surtout le fait des chutes de météorites. Celles-ci agissent par le choc de leur arrivée, mais aussi par la vaporisation de minéraux qu'engendre le dégagement de chaleur de l'impact : le vent de vapeur ainsi engendré peut déplacer des blocs très gros et est probablement à l'origine des raies observées autour de certains cratères. Les remparts des cratères ont un degré de fraîcheur très variable, probablement fonction de leur âge.

Le transport du matériel érodé se fait dans toutes les directions, de façon radiale comme le montrent les raies des cratères récents. Le matériel transporté dans une direction à la suite d'un impact peut l'être ultérieurement dans une autre direction, quelconque par rapport à la première. Il n'y a pas de transport dirigé linéairement vers des points bas comme c'est le cas sur la Terre, par les rivières, les glaciers et les courants marins.

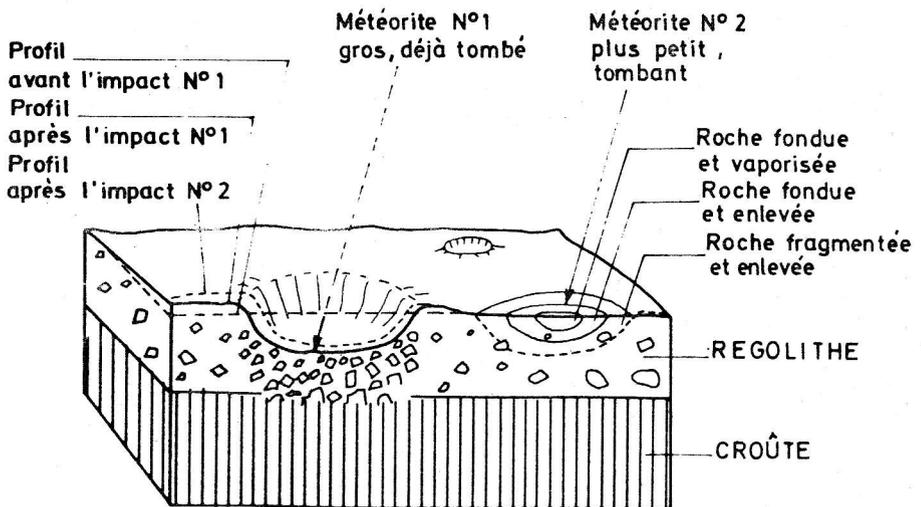


FIGURE 2 : Le régolithe lunaire. Erosion, Transport, Sédimentation.
(inspiré de Moon, Mars and Meteorites, 1977)

La sédimentation est essentiellement l'accumulation des éjectas. Ceux-ci, dispersés en tous sens, n'ont pas tendance à s'accumuler comme sur la Terre dans des fonds (marins), mais se répartissent sur toute la surface de l'astre.

5. - ANCIENNETE DES GRANDS TRAITES DE LA MORPHOLOGIE LUNAIRE

Les échantillons de roches lunaires ont été datés, surtout par les méthodes Strontium-Rubidium, Argon⁴⁰ - Argon³⁹ et Uranium-Plomb. Le tableau général ci-dessous donne la *moyenne* des âges obtenus en chaque site d'alunissage. Nous avons réparti les chiffres obtenus en deux colonnes, suivant que les sites sont des *Mers* ou des *Terres*.

Age moyen de cristallisation des roches datées (KING, 1976)

| MISSION | SITE | MILLIARDS D'ANNEES | |
|-----------|----------------------------------|--------------------|-----|
| Apollo 11 | <i>Mare Tranquillitatis</i> | 3,6 | |
| Apollo 12 | <i>Oceanus Procellarum</i> | 3,3 | |
| Apollo 14 | <i>Fra Mauro (hautes terres)</i> | | 3,9 |
| Apollo 15 | <i>Mare Imbrium</i> | 3,3 | |
| | <i>Apennins</i> | | 3,9 |
| Apollo 16 | <i>Descartes (hautes terres)</i> | | 3,9 |
| Apollo 17 | <i>Mare Serenitatis</i> | 3,7 | |
| | <i>Hautes terres au NE</i> | | 4,0 |
| Luna 16 | <i>Mare Fecunditatis</i> | 3,4 | |
| Luna 20 | <i>Hautes terres de l'E</i> | | 3,9 |

Les sites des *Mers* échantillonnés donnent tous, on le voit, des âges moyens plus récents que ceux des *Terres*.

Il faut se souvenir que, sur la Terre, les âges obtenus n'ont dépassé qu'une seule fois 3,3 milliards d'années : un échantillon a donné 3,8.

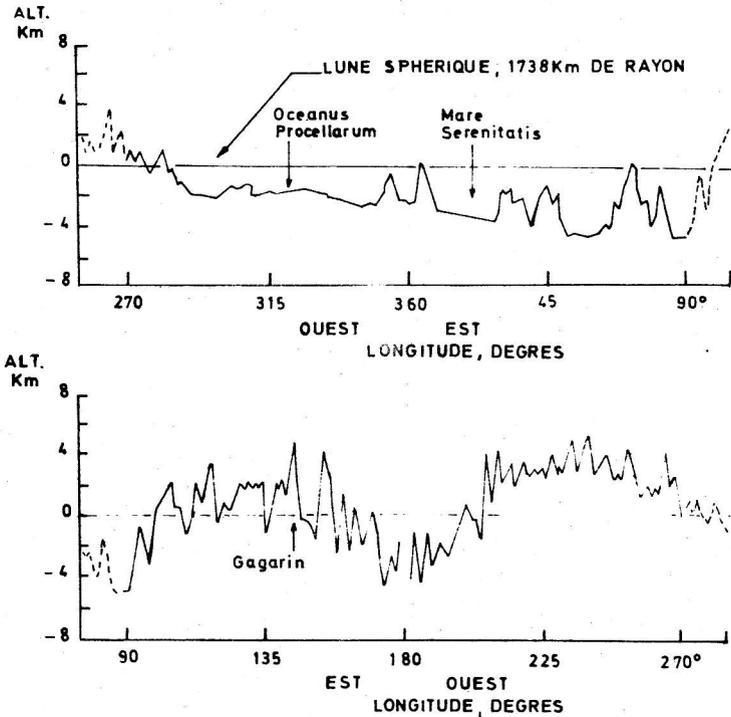
Sur la Lune, un échantillon au moins a été daté de 4,6 milliards d'années. C'est un âge que donnent aussi fréquemment les météorites (4,5 à 4,6).

Les anorthosites des *Terres* semblent avoir cristallisé à partir de 4,2 milliards d'années, surtout entre 4,2 et 3,9. La cristallisation des *Mers* est plus récente, comme le montre très bien le tableau ci-dessus, et s'échelonne entre 3,8 et 3,1 milliards d'années.

Depuis lors se sont produits des phénomènes nettement mineurs au regard des précédents : si les *Mers* témoignent des effets de cataclysme des chutes de météorites énormes, il n'y a plus guère à noter sur la

Lune, depuis 3 milliards d'années, que des chutes de météorites plus petites et un volcanisme tardif dont les basaltes ont 2,8 milliards d'années, si l'on ne compte pas le très faible volcanisme actuel, simple émission sporadique et minime de gaz.

Les grands traits de l'histoire de la Lune sont donc achevés au moment où, sur la Terre, les continents et les montagnes sont bien loin d'avoir leurs formes actuelles et où bien des roches magmatiques ou sédimentaires ne sont pas encore formées.



En haut : face visible En bas : face cachée

FIGURE 3 : Profil altimétrique laser de la Lune
(d'après KAULA et al., reproduit d'après KING, 1976)

6. - COMPARAISON AVEC LA TERRE

Alors que la Lune a une morphologie essentiellement due aux météorites et accessoirement au volcanisme, la Terre est caractérisée par l'opposition continents-océans et par la présence aussi de chaînes de montagnes plissées.

Le relief cratérisé de la Lune est évidemment en relation avec l'absence d'atmosphère. L'absence de plissements et de chaînes mon-

tagneuses est due à l'absence de transports dirigés : il n'y a pas de géosynclinaux car il n'y a pas de bassins de sédimentation, puisqu'il n'y a pas d'apports dus à des fleuves, des glaciers et des courants marins : tout cela en fin de compte se rapporte à l'absence d'eau sur la Lune, absence d'eau qui est elle-même liée à l'absence d'atmosphère, liée par là à la force d'attraction trop faible et en fin de compte à *la masse trop petite de l'astre.*

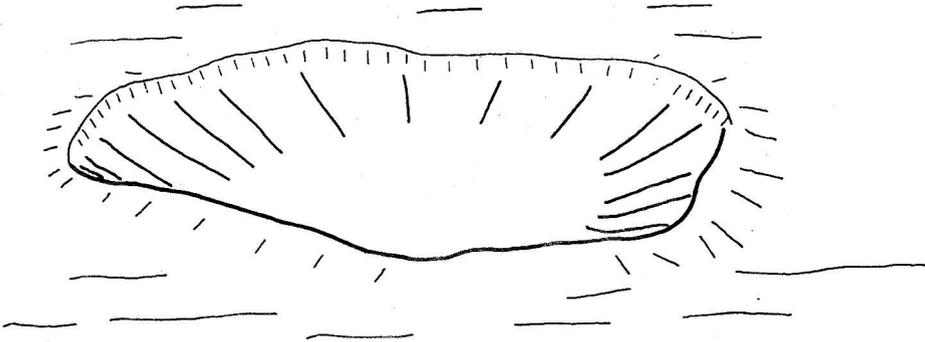


FIGURE 4 : Meteor Crater, Arizona, vue perspective
Diam.: 1 200 m, profondeur : 180 m.



FIGURE 5 : Lac Manicouagan, Québec
Diam.: 60 km.

Les géologues nous ont habitués à voir dans la tectonique et dans les actions profondes le moteur premier du relief de la Terre. A. CAILLEUX nous fait découvrir que la comparaison avec la Lune peut donner à penser que l'absence d'atmosphère, donc aussi d'hydrosphère et de *courants* superficiels de toutes sortes, entraîne l'*absence des déséquilibres* dus à

l'érosion et à la sédimentation, l'absence de plissements, donc aussi l'absence de courants isostatiques compensateurs sous la croûte, l'absence aussi de roches cristallophylliennes, gneiss et micaschistes...

Mais, à un tout autre point de vue, l'étude de la Lune éclaire l'origine de nombreuses structures terrestres.

Le Meteor Crater, dans l'Arizona, est connu comme d'origine météoritique depuis 1891, mais, depuis peu, pas moins de vingt structures d'impact ont été reconnues rien qu'au Canada. A côté du célèbre lac Manicouagan (60 km de diamètre) bien d'autres lieux se révèlent des cratères météoritiques, la plupart étant situés sur le bouclier canadien. Sur la Terre entière, où il y a près de 2 000 sites de chutes de météorites reconnus, il y a une cinquantaine au moins de cratères météoritiques importants et il faut y ajouter un nombre égal de structures météoriques probables, dont plusieurs peuvent receler des richesses énormes en minerai, telle la structure de Sudbury (Ontario) qui a déjà produit pour des milliards de dollars de nickel, de fer et de cuivre (KING, 1976).

7. - COMPARAISON AVEC MARS

Comparaison Terre - Mars - Lune (chiffres largement arrondis)

| | TERRE | MARS | LUNE |
|---|--------|-------|-------|
| Diamètre (km) | 12 000 | 6 800 | 3 400 |
| Densité moyenne | 5,5 | 4,0 | 3,4 |
| Gravité (cm.sec ⁻²) | 981 | 370 | 160 |
| Vitesse de libération (km.sec ⁻¹) | 11 | 5 | 2,4 |

Mars apparaît, sur le plan de la taille, de la densité moyenne et des caractères qui en découlent immédiatement, remarquablement intermédiaire entre la Terre et la Lune.

Mars possède une atmosphère, très ténue, de l'ordre de 6 millibars (variant de 2 à 8). Mais, éloigné du soleil et ayant une température moyenne de 230°K, (max : 300, min : 140), Mars n'a guère d'eau liquide. C'est, dit A. CAILLEUX (1976), la planète du *périglaciaire sec*. Après les Mariner 4, 6, 7 et 9 et les Mars 2 et 3, qui ont survolé la planète, Viking 1 et 2 y ont atterri en 1976, nous apportant une moisson d'informations nouvelles et de précisions sur la planète, nous confirmant, par exemple, par des analyses chimiques, que la teinte rouge du

sol martien est bien due à la présence de fer oxydé dans des laves basaltiques.

Un diagramme montrant sous quel état se présente l'eau et le dioxyde de carbone en fonction de la pression et de la température nous explique plusieurs choses : 1^o) il doit y avoir très peu d'eau à l'état liquide sur Mars car l'eau à l'état liquide ne peut exister à des pressions inférieures à 5 millibars; 2^o) il ne peut y avoir de CO₂ liquide du tout, celui-ci ne pouvant être présent qu'à des pressions très élevées; 3^o) la glace, vers -50^o, devrait être surtout de la glace hydrique, s'il y avait suffisamment de H₂O sur la planète; mais celle-ci est très rare (il y a moins de 1 % de H₂O dans l'atmosphère et pratiquement pas de H₂O liquide) et le givre des calottes polaires est surtout de la glace carbonique; il se pourrait cependant qu'il y ait plus de H₂O solide dans les calottes polaires persistantes ou peut-être sous la surface de Mars, et enterrée sous des dépôts éoliens. Le givre saisonnier représente en effet une couche très mince, d'après la grande vitesse de son extension et de sa fusion, mais les calottes polaires persistantes et des dépôts enterrés pourraient alors être de glace hydrique.

LUNE – MARS – TERRE

Tableau comparatif synthétique
(chiffres largement arrondis)

| | TERRE | MARS | LUNE |
|--|---------------------------------|---------------------|-------|
| Distance moyenne au soleil (en unités astronomiques = distance Soleil - Terre) | 1 | 1,5 | 1 |
| Diamètre (km) | 12 000 | 6 800 | 3 400 |
| Densité moyenne | 5,5 | 4,0 | 3,4 |
| Gravité (cm.sec ⁻²) | 981 | 370 | 160 |
| Vitesse de libération (km.sec ⁻¹) | 11 | 5 | 2,4 |
| Atmosphère, pression (millibars) | 1 013 | 6 | 0 |
| Atmosphère, constituants principaux | N ₂ , O ₂ | CO ₂ ... | — |
| Albedo (X100) | 39 | 15 | 12 |
| Température au sol | | | |
| maximum | 330 | 300 | 390 |
| moyenne | 283 | 230 | 283 |
| minimum | 185 | 140 | 90 |
| (°K) | | | |

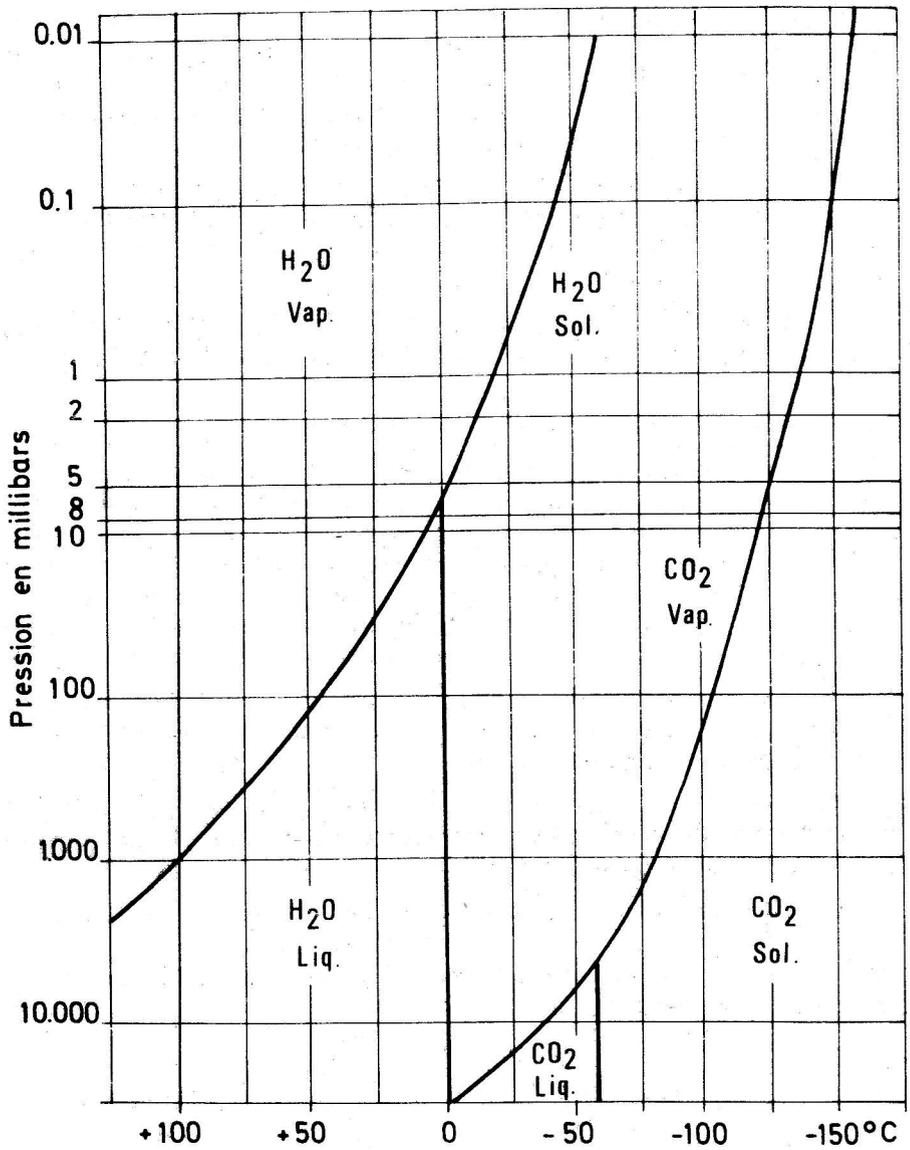


FIGURE 6 : Diagrammes d'état de H₂O et CO₂

8. - CONCLUSIONS

Mars, intermédiaire entre la Terre et la Lune en ce qui concerne la masse, la densité, et donc la gravité, confirme l'explication déjà proposée plus haut des différences entre les reliefs de la Terre et de la Lune : pour qu'un corps céleste conserve son enveloppe liquide et son atmosphère, il faut qu'il y ait une attraction suffisante.

La très faible vitesse de libération, sur la Lune, n'a permis à cet astre de rien conserver de liquide ni de gazeux à sa surface, et son histoire dès lors s'arrête très tôt, ce qui nous permet de lire des chapitres très anciens de cette histoire.

La Terre, qui conserve encore eau et atmosphère, a une histoire si agitée que nous ne pouvons pas trouver facilement de témoins des premiers chapitres.

Mars est très typiquement un cas intermédiaire.

Il y a des cratères sur Mars; ils sont nombreux, mais ont leurs formes fréquemment plus obliérées que les cratères lunaires; ils semblent avoir subi une certaine érosion ou un certain colmatage. Il y a aussi des appareils volcaniques, parfois très importants, formant des cônes surbaissés. Des grabens s'allongent sur de grandes distances. Des champs de dunes témoignent de l'action du vent, des vallées mortes de celle de l'eau, jadis.

Des facteurs cosmiques tels que la distance au Soleil ont donc un rôle fondamental dans le déroulement de l'histoire d'une planète, de même que la composition atomique originelle et la masse.

La présence ou l'absence des molécules légères (H_2O , CO_2 , O_2 , ...) en dépend directement et leur état, solide, liquide ou gazeux, dépend finalement de la distance au Soleil.

Ce qui nous permet de nous demander avec A. CAILLEUX si au lieu d'attribuer à des mouvements profonds et à des facteurs internes l'origine de l'état de la surface de la Terre et des planètes, on ne devrait pas renverser la question.

Mars 1978

INDICATIONS BIBLIOGRAPHIQUES

- ADAMS, P., 1977, Moon, Mars and Meteorites, Published by Her Majesty's Stationery Office for the Institute of Geological Sciences (49, High Holborn, London WC1V6HB) 36 pages. Opuscule constitué pour les trois quarts de remarquables illustrations en couleurs, très bien commentées, au prix de 70 p. britanniques.
- CAILLEUX, A., 1973, Astromorphologie : le relief de Mars, nouvelles interprétations. *Revue de Géographie de Montréal*, vol. 27, pp. 115-116. Premier et remarquable commentaire des photos envoyées en 1972 par Mariner 9, particulièrement aux points de vue du relief et de la météorologie.
- CAILLEUX, A., 1974, La Lune. *Revue des questions scientifiques*, tome 145, pp. 255-278. Texte remarquable, presque intégralement repris dans le chapitre sur la Lune de l'ouvrage cité ci-dessous (CAILLEUX, 1976).
- CAILLEUX, A., 1976, Géologie générale. Terre, Lune, Planètes. Masson, Paris, et Fides, Montréal, 346 pages.
- CAILLEUX, A., 1977, Satellites, Planètes, Terre : géomorphologie comparée. *Bull. Ass. Géogr. français*, n° 444, pp. 185-194. Dans ce bref article, A. Cailleux étend sa comparaison à Mercure et à Vénus.
- KING, E.A., 1976, Space Geology, an Introduction. Wiley and Sons, New York, 347 pages. L'ouvrage traite remarquablement de la géologie des météorites, du métamorphisme d'impact, des roches de la Lune (90 pages), et de ce que l'on savait en 1976 de Mars et des autres planètes.
- MULLER, P.M. et SJOGREN, W.L., 1968, Mascons, lunar mass concentrations. *Sciences*, vol. 162, pp. 1408-1410.
- POLLACK, J.B., 1975, Mars. *Scientific American*, septembre, pp. 106-117.
- SCHAEFER, K., 1974, Martian Tithonius Lacus Canyon and Rhinegraben - a comparative morphotectonic analysis. *Approaches to Taphrogenesis, Scientific Report*, n° 8, Stuttgart, pp. 52-59.
- WOOD, J.A., 1975, The Moon. *Scientific American*, septembre, pp. 92-105.