

Les cratères d'impact à la surface des corps planétaires, un chronomètre géologique pour retracer l'histoire géologique

Sylvain Bouley, planétologue et maître de conférences à l'Université Paris Saclay

Dans cet article vous découvrirez comment les géologues parviennent à faire une étude des couches géologiques successives (stratigraphie) des planètes telluriques, sans même y avoir jamais mis les pieds. Les échantillons de roches lunaires rapportées sur Terre furent d'une grande utilité pour élaborer un modèle applicable ailleurs.

Comment raconter l'histoire géologique d'une planète sans avoir accès aux roches de surface ? Telle est la problématique des planétologues. Sur Terre, les géologues ont depuis près d'un siècle la possibilité de dater certaines roches grâce aux méthodes radiogéniques basées sur la désintégration d'éléments radioactifs. Ces datations ont aujourd'hui permis de retracer assez précisément l'histoire de la Terre même si de nombreuses incertitudes existent sur les périodes anciennes. En effet, sur Terre, peu de roches âgées de plus de 3 milliards d'années existent. Sur la Lune ou sur Mars, c'est l'inverse, la majorité des terrains ont plus de 3 milliards d'années. Malheureusement, l'accès à des échantillons de roches est pour le moment très difficile. Il existe bien des météorites lunaires ou martiennes que l'on retrouve sur Terre et que l'on peut dater mais il est impossible de savoir leur contexte géologique passé. Si l'on veut un jour retracer l'histoire géologique de ces planètes, il faudrait pouvoir extraire des milliers d'échantillons pour les dater. Aujourd'hui la technologie ne nous permet ni de les dater in situ ni de les ramener sur Terre automatiquement.

La Lune, notre meilleure alliée pour dater

Une méthode indirecte de datation a été proposée voici une cinquantaine d'années et est aujourd'hui largement utilisée par les géologues planétaires. La première stratigraphie lunaire est établie en 1962 par Shoemaker et

Hackman. Cinq subdivisions stratigraphiques sont proposées et seront par la suite peu modifiées. La stratigraphie utilisée aujourd'hui est ainsi divisée en 5 périodes principales basées sur le nom de différentes formations lunaires, cratères et mers (figures 1 et 2).



Fig.1. Les cinq régions lunaires ayant donné leur nom aux cinq grandes périodes géologiques : la mer du Nectar (1), la mer des Pluies ou Mare Imbrium (2), le cratère Autolycus(4), le cratère Ératosthène (5) et le cratère Copernic (6). On a indiqué également les cratères Platon (3) et Tycho (7).

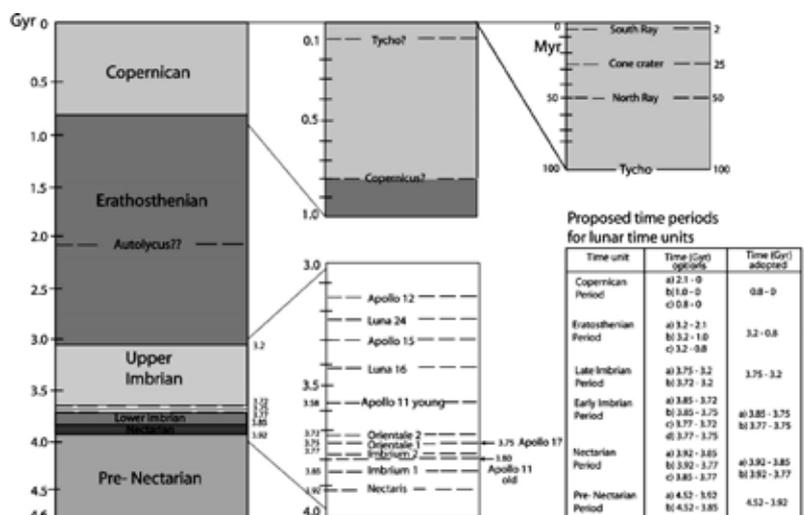


Fig.2. En gris, dates des principales périodes en milliards d'années (Gyr) ou millions d'années (Myr). On a aussi indiqué en blanc au centre l'âge des échantillons récoltés.

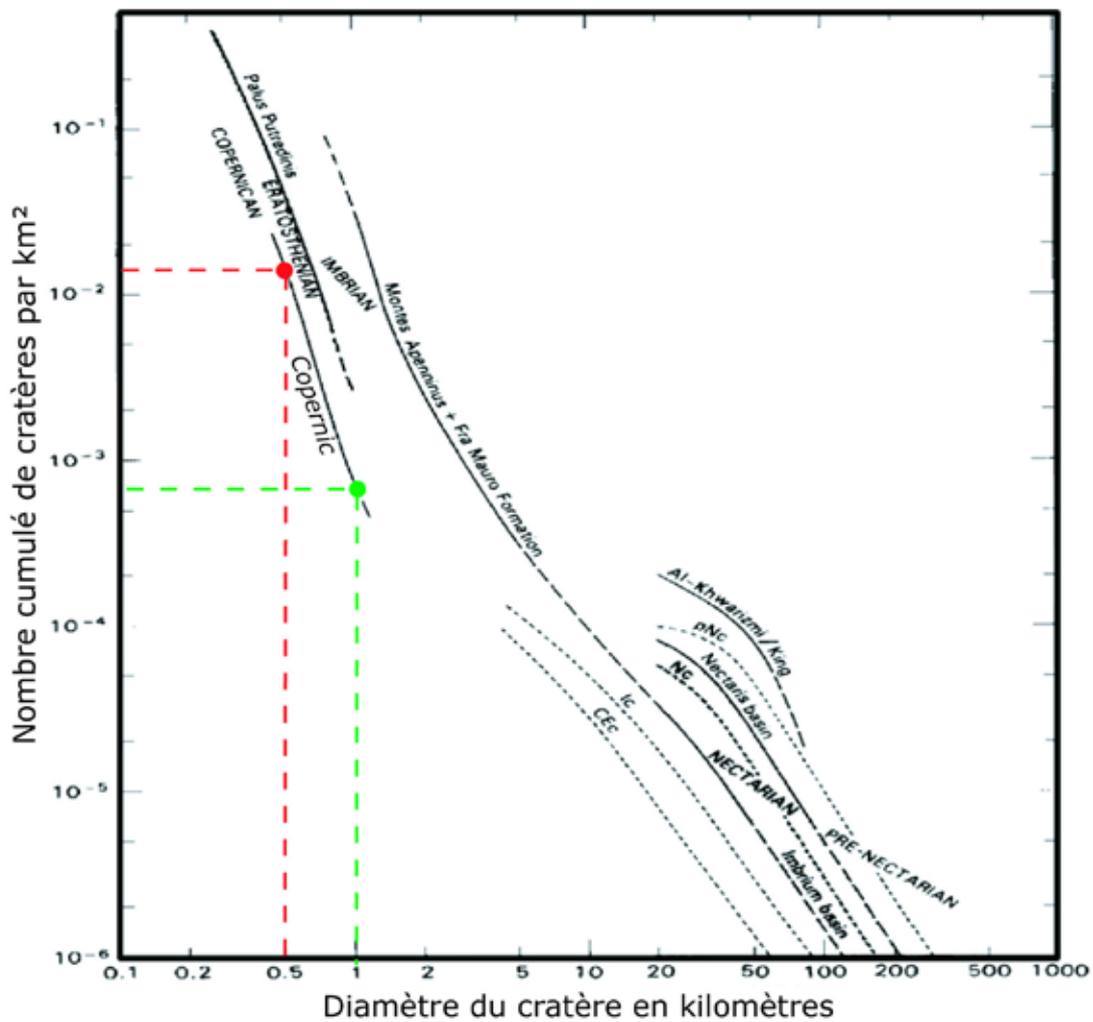


Fig.3. En ordonnée, le nombre cumulé de cratères au km² et en abscisse, le diamètre des cratères. Dans le cratère Copernic par exemple, on trouve environ 10⁻² cratère de plus de 0,5 km de diamètre par km² (point rouge) soit 10 cratères pour 1000 km² ou 10⁻³ cratère de plus de 1 km de diamètre par km² (point vert).

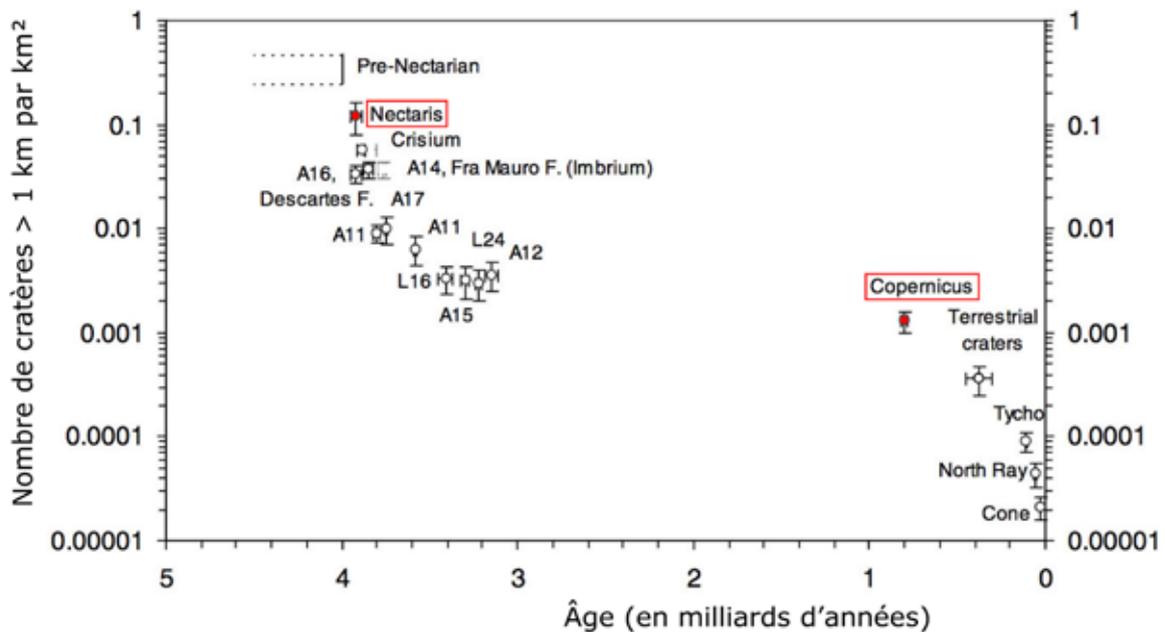


Fig.4. Dans quelques régions dont on connaissait l'âge grâce à des échantillons rapportés, on a comptabilisé les cratères de plus d'un km de diamètre. Deux exemples : Copernic en compte environ 0,001 par km² et son âge est estimé à près d'un milliard d'années ; la mer du Nectar compte beaucoup plus de cratères (0,1 par km²) et est beaucoup plus ancienne (4 milliards d'années).

Pour chaque unité stratigraphique, les cratères d'impact ont été comptés. Plus l'unité est vieille, plus la densité des cratères est importante et ce, quelle que soit la gamme de diamètres considérée. Ainsi, chaque unité est définie par une courbe décroissante reliant diamètre du cratère et densité cumulative des cratères (figure 3).

Grâce aux missions américaines Apollo (1969 - 1972) et Luna (1969 - 1976), près de 400 kg de roches lunaires ont été échantillonnées sur une dizaine de sites et ont été rapportées sur Terre pour être étudiées et datées. Les roches échantillonnées ont été datées grâce aux méthodes radiogéniques (Rb-Sr, Sm-Nd, ^{40}Ar - ^{39}Ar). On a attribué à chacune d'elle un âge de cristallisation pour les roches ignées et impactées et un âge de métamorphisme pour les roches recristallisées. C'est ainsi que la stratigraphie lunaire a été calibrée en fonction du temps (figure 2). Ces roches ont majoritairement des âges compris entre 3 et 4 milliards d'années même si certaines sont plus récentes (moins d'un milliard d'années). Alors que les âges du Pré-Nectarien à l'Imbrien sont relativement bien contraints par les datations réalisées in situ, il est plus difficile d'attribuer un âge à la formation des cratères récents. Par exemple, l'âge du cratère Copernic a été établi à partir de roches du site Apollo 12 situé à plus de 380 km de celui-ci. Les éjectas du cratère traversant le site d'Apollo 12, il a été accepté que des verres d'impact retrouvés sur ce site pouvaient dater la formation du cratère, ce qui peut être largement débattu. Pour le cratère Tycho, l'hypothèse est encore plus forte puisque l'âge retenu a été réalisé sur des roches échantillonnées dans un glissement de terrain du Massif Sud (Apollo 17) considéré comme ayant été déclenché par l'impact situé à 2 200 km.

Grâce à la datation absolue des roches lunaires, il est ainsi possible de relier les âges des différents terrains avec la densité de cratères en fonction du diamètre (figure 4).

Une loi de taux de cratérisation en fonction du temps peut être ainsi déterminée.

Pour chaque terrain avec un âge absolu, une densité de cratères a été déterminée par comptage permettant ainsi de déterminer l'évolution du flux d'impacts avec le temps. Neukum (1983) propose une loi permettant de relier sur la Lune $N(1)$, le nombre de cratères d'un diamètre égal ou supérieur à 1 km par km^2 et le temps d'accumulation de cratères T en milliard d'années.

$$N(1) = 5,44 \times 10^{-14} (e^{6,93 T} - 1) + 8,38 \times 10^{-4} T \quad (1)$$

Cette loi propose une décroissance du flux d'impacts entre 4 et 3 Ga d'un facteur 500 et un flux constant depuis 3 Ga. Bien établie entre 4 et 3 Ga, il existe de nombreuses incertitudes sur le flux durant la période pré-nectarienne (> 4 Ga) et les périodes ératosthénienne et copernicienne (< 3 Ga).

L'absence d'observation de terrain entre 4,5 et 4 Ga ne permet pas d'avoir des informations sur le flux d'impacts à cette époque et entraîne ainsi de nombreuses spéculations sur un possible bombardement tardif. Si l'analyse de certaines météorites lunaires propose un pic de cratérisation autour de 3,9 Ga, certaines études ont tendance à montrer que la cratérisation devait être tout aussi intense jusqu'à au moins 4,2 Ga.

Dater Mars à partir de la Lune

Après avoir travaillé sur cette loi lunaire, les scientifiques ont décidé de l'appliquer à la planète Mars après quelques adaptations. Comme sur la Lune, il a été possible de proposer une stratigraphie relative martienne. Grâce aux images de Mariner IV, Hartmann (1966, 1973) observe que la densité de cratères n'est pas homogène sur Mars. Grâce à ces données puis à celles des missions Viking, les premières cartes géologiques permettent de définir 3 grandes périodes basées sur 3 grands types de terrains :

- des terrains très cratérisés (figure 5 en rouge) dont les unités géologiques de référence sont les plaines intercratères à l'est d'Argyre Planitia (n° 1), les terrains situés à l'ouest d'Hellas Planitia (n° 2), les monts de Charitum (n° 3) et Nereidum (n° 4) et les terrains de Noachis Terra (n° 5). Ces terrains sont donc considérés comme très anciens et sont définis comme appartenant à une époque ancienne nommée **Noachienne**, en relation au nom de la région de référence ;
- des terrains relativement moins cratérisés (figure 5 en bleu) dont les unités géologiques de référence sont les plaines intercratères ridées d'Hesperia Planum (n° 6) et de Vasistas Borealis (n° 7). Ces terrains sont considérés plus jeunes que ceux décrits précédemment. Ils sont définis comme appartenant à l'époque appelée **Hespérienne** ;
- des terrains peu cratérisés (figure 5 en vert) dont les unités géologiques de référence sont les plaines volcaniques d'Amazonis Planitia (n° 8), d'Acidalia Planitia (n° 9) et du sud d'Elysium Planitia (n° 10). Ces terrains récents sont associés à l'époque **Amazonienne** en référence au nom de la région type.

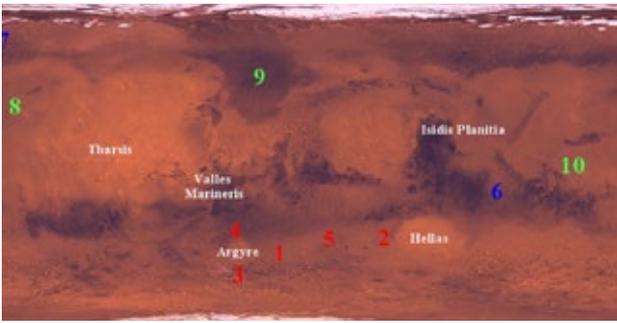


Fig.5. Planisphère de Mars. Les numéros rouges indiquent les régions les plus cratérisées donc les plus anciennes.

L'un des problèmes majeurs sur Mars est qu'aucune roche n'a été datée dans son environnement. Il n'est donc pas possible comme sur la Lune de calibrer la stratigraphie à partir de datation absolue. La stratigraphie absolue martienne a donc été calibrée à partir du travail réalisé sur la Lune en prenant en compte 2 hypothèses :

- la distribution en taille des objets qui heurtent la Lune est la même que la distribution en taille des objets qui heurtent Mars ;
- le rapport entre le nombre d'impacts sur la Lune et sur Mars est constant au cours du temps (s'il est moyenné sur une période d'au moins une dizaine de millions d'années).

À partir de ce travail, il est possible de calculer une loi de taux de cratérisation en fonction du temps. La différence entre la densité de cratère martienne et lunaire dépend :

(1) du rapport de gravité de surface Lune/Mars ($g_{\text{Lune}} = 1,622 \text{ m/s}^2$ et $g_{\text{Mars}} = 3,711 \text{ m/s}^2$) ;

(2) de la différence de vitesse d'impact moyenne entre les deux corps ($v_{\text{Lune}} = 10 \text{ km/s}$ et $v_{\text{Mars}} = 14 \text{ km/s}$) ;

(3) du rapport du taux de cratérisation Mars/Lune R_{bolide} ($R_{\text{bolide}} = 2.6 \pm 0.7$). Ainsi Mars capte davantage de projectiles que la Lune et ces objets y font des cratères plus petits que sur notre satellite. Basé sur la loi lunaire, Ivanov (2001) propose :

$$N(1) = 2,68 \times 10^{-14} (e^{6,93 T} - 1) + 4,3 \times 10^{-4} T \quad (2)$$

avec $N(1)$ le nombre de cratères d'un diamètre égal ou supérieur à 1 km et T le temps d'accumulation de cratères en milliards d'années.

Si les âges déterminés sont assez imprécis, cette méthode a le mérite de proposer une chronologie des événements géologiques sur la planète rouge. En effet, il suffit de compter les cratères, de comparer les densités de cratères des différents terrains pour savoir quels sont les terrains les plus récents et les plus anciens. Par exemple, le volcan Olympus Mons montre très peu de cratères à sa surface et est donc le témoin d'un volcanisme récent. Sur les autres surfaces des planètes (Mercure, Vénus), des astéroïdes ou des satellites des planètes géantes, il est également possible d'appliquer cette méthode mais les âges dépendront toujours du taux de cratérisation utilisé très variable en fonction de la localisation dans le Système solaire. ■

La version numérique sur le site contient en plus de nombreuses références de publications.

OBSERVATION

Éclipse partielle de Lune le 16 juillet 2019 au soir

Les horaires (heures légales)

Entrée dans l'ombre : 22 h 02.
Maximum de l'éclipse : 23 h 31.
Sortie de l'ombre : 1 h 00.

Comment l'observer

En France métropolitaine, la Lune se lèvera entre 20 h 50 en Corse et 22 h 12 à Brest. Il faudra observer la Lune côté nord-est, assez bas au-dessus de l'horizon.

La grandeur de cette éclipse est de 0,65, ce qui signifie que, au maximum de l'éclipse, 65 % du diamètre lunaire sera dans l'ombre.



La Lune au maximum de l'éclipse

Observation de la Lune les 12-13 juillet

À l'occasion des 50 ans du 1er homme sur la Lune, sortez vos lunettes ou télescopes pour faire découvrir notre satellite aux passants ! Cette opération, « On the moon again » devance la date anniversaire du 21 juillet, la Lune se levant bien tard (après minuit) à cette date.