

Rapport de l'écrit de Sciences de la Terre

Membres du jury : Tristan FERROIR (concepteur-correcteur), Clément GANINO (correcteur), Cyril LANGLOIS (correcteur), Pascal LECROART (correcteur), Alexandre SCHUBNEL (correcteur), Gérard VIDAL (correcteur).

L'épreuve de Sciences de la Terre est commune aux trois Écoles Normales Supérieures. Cette année, le sujet, centré sur l'étude de la Lune, faisait appel à une bonne connaissance des techniques de géophysique, minéralogie et géochimie ainsi qu'à une bonne connaissance des grands apports de ces domaines à la connaissance de la Terre. Il s'agissait ensuite pour le candidat de transposer ses connaissances sur la Lune sans pour autant chercher à tout prix à faire parfaitement coller le modèle de la Terre à la Lune. Ainsi, un trop grand nombre de candidats manque de recul face à l'apport des différentes techniques et surtout à la transposition de leurs résultats sur un corps céleste différent de la Terre.

La réalisation et la réussite d'une telle épreuve ne peuvent se concevoir que sur des connaissances de cours de qualité agrémentées parfois de certains points de culture générale. De plus, le jury tient à souligner l'aspect pluridisciplinaire des Sciences de la Terre par un questionnement faisant appel à des connaissances en sciences physiques et mathématiques pour résoudre des problèmes de géoscience.

Le jury tient à souligner que le concours 2011 a été de bon niveau, en progression par rapport à l'année précédente, avec un groupe important de copies assez homogènes montrant une bonne maîtrise des concepts vus en cours, et un groupe plus restreint ayant bien traité les différents problèmes. Certains points ont cependant été quasi systématiquement mal traités. Le présent rapport présente une synthèse des plus saillants de ces points et propose quelques pistes permettant de les améliorer. Cette synthèse est complétée par des éléments de corrections plus explicites.

La première partie étudiait la morphologie de la surface lunaire par des méthodes satellitaires suivi d'une étude gravimétrique de la surface. Le jury a été très surpris du nombre de candidats qui ont pu penser que la Lune a présenté voire présente encore de l'eau à sa surface. L'emploi du terme de « mer » pour la Lune semblait ? au jury être passé dans le langage scientifique courant pour que les candidats ne l'assimilent pas forcément à la présence d'eau. Par ailleurs, l'interprétation des contrastes présents sur l'image satellite en terme de nature lithologique est très souvent absente. Sur la gravimétrie, le problème proposé a été plutôt bien traité et le calcul correctement réalisé même si le jury déplore encore les confusions entre géoïde et ellipsoïde. Par ailleurs, le lien entre l'anomalie à l'air libre et la compensation isostasique semble complètement inconnu des candidats. Le lien entre flux de chaleur et épaisseur de la croûte a été pour partie correctement interprété. Certains candidats ont même soulevé que cette question ne pouvait être traitée que s'il était considéré que le rééquilibrage thermique du manteau lunaire ne s'était pas fait.

La seconde partie se concentrait sur la pétrologie de la surface de la Lune. L'étude de la lame mince a donné lieu à des reconnaissances de minéraux plus ou moins folkloriques. Le jury tient notamment à rappeler qu'il est impossible de trouver du quartz et de l'olivine ensemble dans une roche magmatique. De plus, trop nombreux sont les candidats qui associent le fait qu'un minéral soit noir en lumière polarisée non analysée et analysée à la présence de grenat. Les règles de substitution dans les minéraux sont plus ou moins maîtrisées, certains candidats utilisant l'ensemble du tableau sans en extraire les informations pertinentes. La diagnose de la roche macroscopique a très souvent

été râtée alors qu'une analyse rapide sans a priori quelconque aurait pu permettre une identification raisonnée de l'échantillon. Enfin, l'utilisation du diagramme de Streckeisen reste assez problématique voire énigmatique pour certains candidats, la moitié d'entre eux oubliant de remettre les proportions de minéraux blanc à 100% avant de placer la roche dans le diagramme.

La troisième partie était centrée sur l'utilisation de la sismologie afin de déterminer la structure interne de la Lune. Les candidats semblent mieux maîtriser les caractéristiques des ondes de volume ainsi que les grands paramètres qui gouvernent leur vitesse. Par contre, l'utilisation du document présentant l'évolution de la vitesse en fonction de la profondeur n'a été que vaguement utilisé par les candidats. S'ils sont nombreux à avoir identifié un moho vers 40 km de profondeur, le reste de l'analyse s'est bornée soit à une paraphrase du document soit à un « plaquage » de la structure de la Terre sur celle de la Lune. Pourtant, une augmentation forte de la vitesse des ondes était parfaitement visible vers 575km de profondeur ainsi que l'apparition d'une zone à moindre vitesse entre 620 et 680 km de profondeur. Ainsi, seuls les quelques candidats ayant réussi à prendre du recul par rapport à la structure de la Terre tout en intégrant les grands résultats tirés de la sismologie pour cette planète ont pu construire un modèle de Lune satisfaisant. Quant au calcul du rayon du noyau, certains ont oublié que l'étude ne pouvait se faire qu'en 3 dimensions et ont donc omis d'utiliser le volume d'une sphère dans ce calcul, ce qui amenait à des tailles de noyau bien trop faibles (~40 km contre 350 à 530 km en structure sphérique).

La quatrième partie faisait appel à des notions de géochimie et quelques notions de mathématiques. La définition du delta, son unité et son standard restent malheureusement relativement mal assimilés ?. Les calculs liés au fractionnement isotopique n'ont été traités que de très rares fois. Par ailleurs, le jury a été fortement surpris par la confusion existant entre les termes d'incompatible et d'immiscible. Nombreux sont les candidats qui pensent que deux éléments sont incompatibles lorsqu'ils ne peuvent pas se trouver dans le même minéral. A ce titre, le jury tient à rappeler qu'un élément est dit incompatible si ce dernier a tendance migrer dans le liquide lors de la fusion partielle et à y rester lors de la cristallisation fractionnée. Les notions d'élément réfractaire et d'élément volatil restent quant à elles plus ou moins bien maîtrisées.

La Lune

Le programme Apollo est un programme de la NASA qui a commencé en 1961 et a connu son apothéose par le premier pas de l'Homme sur la Lune le 21 juillet 1969. Cinq autres missions se sont posées par la suite sur d'autres sites lunaires et y ont séjourné jusqu'à trois jours. Ces expéditions ont permis de rapporter 382 kilogrammes de roches lunaires et de mettre en place plusieurs batteries d'instruments scientifiques. L'énorme moisson scientifique réalisée grâce au programme Apollo a permis d'apporter de nombreuses réponses aux questions concernant la Lune, notamment sa formation, son origine, sa structure interne etc.... Le but de ce devoir est de passer en revue quelques grandes avancées permises par les missions Apollo en faisant appel à différents domaines des sciences de la Terre. Les conclusions de ces études pourront être obtenues à partir de comparaisons avec la Terre.

Partie I : Morphologie de la surface lunaire

Les observations de surface peuvent être très précieuses pour les géologues lorsque les déplacements sont coûteux, périlleux, difficiles voire impossibles.

- 1 La figure 1 propose une image sous forme de planisphère de la Lune obtenue en lumière visible. *Commentez la morphologie de la surface? Quels types de lithologies pourriez-vous associer aux grandes zones que vous définirez ?*

La morphologie est dominée par deux grands types d'affleurements : des zones claires fortement cratérisées et des zones sombres, montrant parfois des formes circulaires. Les zones sombres ont une altitude inférieure à celle des zones claires. On pourrait donc définir des continents à altitude « élevée » qui seraient alors composés de roches différenciées et des mers à altitude faible qui seraient constituées de roches peu ou pas différenciées.

- 2 *Après avoir défini et expliqué comment est obtenue l'anomalie de Bouguer, commentez ces anomalies au niveau des zones entourées en noir sur la figure 2 et proposez une explication que vous justifierez quant aux anomalies enregistrées à leur niveau.*

On compare la valeur mesurée de g à celle théorique sur l'ellipsoïde de référence terrestre, ou ici lunaire. En général, la mesure de g n'a pas eu lieu à l'altitude 0 et il faut corriger cette différence d'altitude.

- **La première correction à prendre en compte est la différence de distance au centre de masse entre l'altitude de mesure et l'altitude 0, c'est ce que l'on appelle la correction à l'air libre.**
- **La seconde correction prend en compte le fait que de la roche est présente entre l'altitude de mesure et l'altitude zéro, et il faut corriger l'effet gravitationnel de cette masse rocheuse. C'est ce que l'on appelle la correction de plateau.**

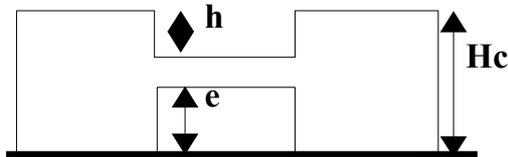
- La différence entre g mesuré et corrigé de l'effet de l'altitude et de plateau et g théorique définit l'anomalie de Bouguer.

On constate que les anomalies de Bouguer sont fortement positives au niveau des cratères entourés. On peut donc penser qu'il y a un excès de masse en profondeur. Par analogie avec la Terre, on peut supposer qu'il y a une remontée du manteau à cet endroit là.

- 3 A partir des observations précédentes, proposez un modèle isostatique au niveau d'un cratère. Puis, en appelant h la profondeur du cratère, H_c l'épaisseur de la croûte lunaire et e la différence de profondeur entre le moho sous une croûte normale et sous une croûte de cratère, calculez l'épaisseur de la croûte sous le cratère. Vous prendrez soin de préciser les hypothèses faites pour la réalisation de ce calcul.

Données : $h = 3\text{km}$, $H_c = 40\text{km}$, $\rho_{\text{croûte}} = 2,9$ et $\rho_{\text{manteau}} = 3,2$

Nous allons choisir le modèle de Airy, qui suppose une densité identique mais une épaisseur variable des colonnes au dessus de la surface de compensation.



On suppose l'équilibre isostatique atteint. On a donc une surface de compensation telle que :

$$\rho_c \cdot H_c = \rho_c \cdot (H_c - h - e) + \rho_m \cdot e$$

$$e = \frac{\rho_c \cdot h}{\rho_c - \rho_m} = 29\text{km}$$

$$\Rightarrow H_{\text{cratère}} = H_c - h - e = 40 - 3 - 29 = 8\text{km}$$

- 4 A partir du résultat précédent, comparez qualitativement et quantitativement le flux de chaleur au niveau des cratères d'impact lunaires et d'une croûte normale.

Le manteau étant plus proche de la surface, on va donc avoir un flux de chaleur plus important.

Par définition le flux de chaleur est défini par : $Q = -K \frac{\Delta T}{\Delta x}$

Or ici, la croûte est 5 fois plus fine donc Δx est 5 fois moindre, donc le flux de chaleur Q est 5 fois plus fort.

- 5 La carte présentée sur la figure 3 montre les anomalies à l'air libre de la Lune. Le calcul fait à la question 3 est-il encore valable? Justifiez votre réponse.

Les anomalies de masses sont atténuées mais restent positives une fois la correction à l'air libre effectuée. Il y a donc bien des excès de masse en profondeur sous les cratères. Ceci peut bien s'expliquer par une remontée de manteau.

En revanche, si le système était à l'équilibre isostatique, c'est à dire si la compensation était

réalisée, alors les anomalies à l'air libre devraient être nulles. On voit que ce n'est pas le cas. Donc l'équilibre isostasique n'est pas atteint. On en déduit donc que le calcul de la question 3 n'est pas tout à fait valable.

Partie 2 : Pétrologie de la surface Lunaire

Cette partie est dédiée à l'étude des échantillons rocheux lunaires ramenés par le programme Apollo.

- 1 Les photos de la figure 4 présentent une image en lumière polarisée non analysée et en lumière polarisée analysée d'un échantillon récolté par la mission Appolo 12 au niveau de l'Océan des Tempêtes. *Proposez une identification raisonnée des minéraux identifiés par lettres A à D et concluez quant à la nature de la roche.*

Minéral A : minéraux noir en LPNA, ce sont des oxydes.

Minéral B : minéraux blanc, à fort relief et craquelé en LPNA ayant un habitus xénomorphe. En LPNA, ces minéraux présentent des teintes vives de la fin du 2ème ordre : il s'agit d'olivine.

Minéral C : minéraux blancs légèrement colorés, présentant un fort relief et un habitus subautomorphe. En LPA, les teintes sont du milieu du 2ème ordre : il s'agit de pyroxène.

Minéral D : minéraux blancs, à faible relief ayant un habitus automorphe sous forme de baguettes allongées. EN LPA, les teintes sont du début du premier ordre. Quelques un s de ces minéraux présentent des mâcles polysynthétiques : ce sont des feldspaths plagioclases.

On peut donc conclure que cette roche est de chimie basique. Elle présente une structure microgrenue : il s'agit donc d'une dolérite ou d'un basalte.

- 2 *Comment ces roches sont-elles formées sur Terre? Que peut-on en déduire sur la pétrologie interne de la Lune?*

Sur Terre, ces roches sont formées par un phénomène magmatique, c'est à dire la fusion partielle d'une roche source. Dans le cas des basaltes, il s'agit de la fusion du manteau composé de péridotites. On peut donc penser que sur la Lune, il y a un manteau composé de péridotites comme sur Terre.

- 3 Les études des éléments en trace dans les échantillons récoltés par Appolo 11 et 12 ont permis aux géologues de supputer la nature lithologique des continents lunaires avant d'y envoyer une mission
 - 3.1 *Quelles sont les règles qui gouvernent la substitution des éléments au sein des minéraux?*

Pour qu'un élément puisse se substituer à un autre au sein de l'édifice atomique, il faut qu'ils aient un rayon ionique voisin et une charge identique.

- 3.2 *D'après le document de la figure 5, à quel(s) élément(s) majeur(s) peut-on substituer l'Europium?*

Les éléments qui peuvent se substituer à l'Europium sont donc essentiellement le calcium

(rayon ionique très voisin et même charge) et dans une moindre mesure le potassium et le sodium.

3.3 *En supposant que la Lune était chondritique lors de sa formation pour la composition des silicates, que nous apprend le spectre de terres rares (figure 6) des échantillons d'Appolo 11? Quelle roche pourrait constituer les continents lunaires?*

On peut en déduire que les continents doivent être riches en minéraux contenant du Ca (et dans une moindre mesure K et Na), donc certainement en plagioclases. La roche constituant les continents doit donc être essentiellement composée de plagioclases.

4 La roche proposée à la question 3.3 compose la majorité des continents. Cependant, elle est souvent fortement modifiée et présente l'aspect proposée à la figure 7. *Quel est ce type de roche? Comment peut-on la former?*

On observe que cette roche comporte deux parties : une partie claire correspondant certainement à la roche essentiellement composée de plagioclases et une partie sombre présente entre les morceaux de la roche claire. Cette roche claire semble avoir été brisée en éléments anguleux : c'est une brèche. On peut la former soit par un processus tectonique, soit par un processus sédimentaire.

Les morceaux anguleux pourraient avoir été formés lors d'un des nombreux impacts météoritiques sur les continents lunaires qui auraient permis aussi de fondre partiellement la roche et auraient engendré le liant sombre.

5 D'autres échantillons du même type que cette roche ont été récupérés et ont été datés. Les âges sont représentés à la figure 8.

5.1 *Au vu des résultats précédents, quelle technique de datation vous paraîtrait particulièrement appropriée. Expliquez le principe de cette datation, en faisant mention si possible des hypothèses formulées, des minéraux utilisés?*

Etant donné qu'on cherche à dater la formation de la roche, il faut dater le liant. La roche étant essentiellement composée de feldspaths, il est préférable d'utiliser une méthode radiochronométrique basée sur le Sm-Nd (le Rb-Sr peut aussi convenir). Le ^{147}Sm se désintègre en ^{143}Nd . Lors de la cristallisation des minéraux, tous n'intègrent pas la même quantité de ^{147}Sm et de ^{143}Nd . En normalisant les deux concentrations par ^{144}Nd pour s'affranchir de ce comportement différentiel et en utilisant la méthode de l'isochrone, on peut dater la formation de la brèche.

5.2 *Que cela nous apprend-il sur l'histoire de la Lune et du système solaire?*

Cela nous apprend d'une part que les continents lunaires étaient déjà présents moins de 0.7Ga après la formation du système solaire puisqu'ils ont pu être bréchifiés. C'est d'ailleurs vers 0.7Ga que l'essentiel du remaniement se réalise : on peut penser qu'il existe une période de bombardement intense par des corps météoritiques vers cette époque là.

6 En leur sein, certaines de ces roches peuvent présenter des fragments dont la composition minéralogique est donnée dans la figure 9.

6.1 *En expliquant votre démarche, replacez cette roche dans le diagramme de Streckeisen que vous rendrez avec votre copie.*

Seuls les minéraux blancs nous intéressent, à savoir donc quartz, plagioclase et feldspaths alcalins. Il faut donc recalculer la proportion de ces différents minéraux pour qu'ils forment 100% du triangle supérieur de Streckeisen. On a donc :

Plagioclases = $0,3/(0,3+0,16+0,17) = 48\%$

Feldspaths alcalins = $0,16/(0,3+0,16+0,17) = 26\%$

Quartz = $0,17/(0,3+0,16+0,17) = 27\%$

En la replaçant dans le diagramme de Streckeisen, on trouve que cette roche est une granodiorite ou un granite.

6.2 *Quelles hypothèses pouvez-vous formuler pour la formation de tels fragments?*

Sur Terre, les granodiorites proviennent d'une différenciation des magmas. On peut donc penser qu'il y a eu une différenciation encore plus poussée du magma qui a donné les continents lunaires puisqu'on a l'apparition de quartz dans ces granodiorites. Alternativement, on peut aussi suggérer que le choc sur le matériel des continents a refondu partiellement une partie de ce matériel qui en recristallisant a eu une différenciation plus importante.

7 L'observation de la surface lunaire a conduit dans les années 70, William Hartmann à la réflexion suivante : plus une surface est vieille et plus elle doit avoir de cratères puisqu'elle a été soumise aux bombardements depuis plus longtemps. Hartmann a calculé le nombre théorique d'impacts en fonction de l'âge de la surface et a ensuite pu se caler de façon absolue dans le temps grâce aux datations des échantillons Appolo. La carte de la figure 10 montre la limite entre un continent en bas et une mer lunaire en haut.

7.1 *Commentez cette image*

On observe deux parties dans cette image : le cratère en haut qui est faiblement cratérisé et les continents au sud qui sont fortement cratérisés. On peut donc penser que les continents sont vieux et les mers sont plus récentes puisqu'elles présentent moins de cratères.

7.2 *A partir de l'échelle de cratérisation de la figure 11, datez le continent lunaire et la mer Mare Undarum. Vous pourrez utiliser les gammes de taille de cratères fournies dans la figure 11.*

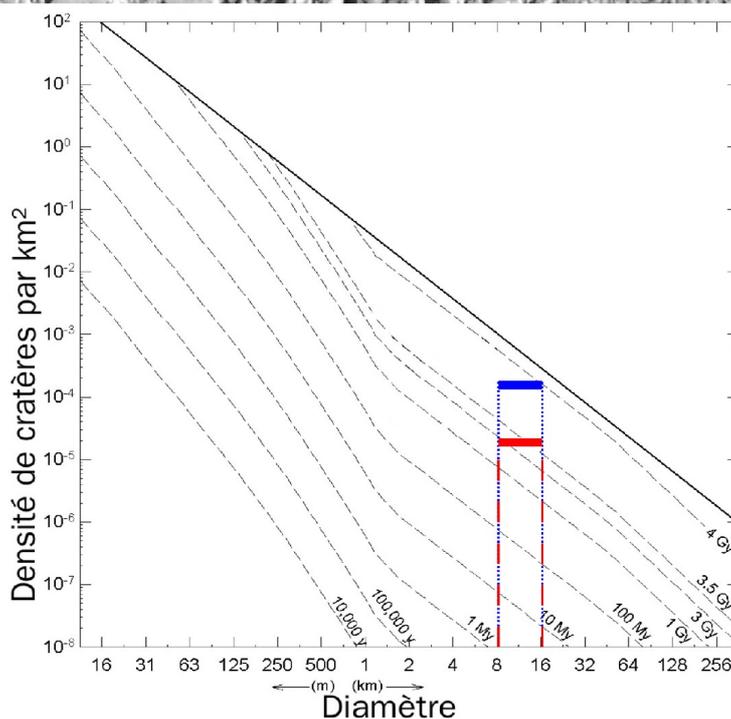
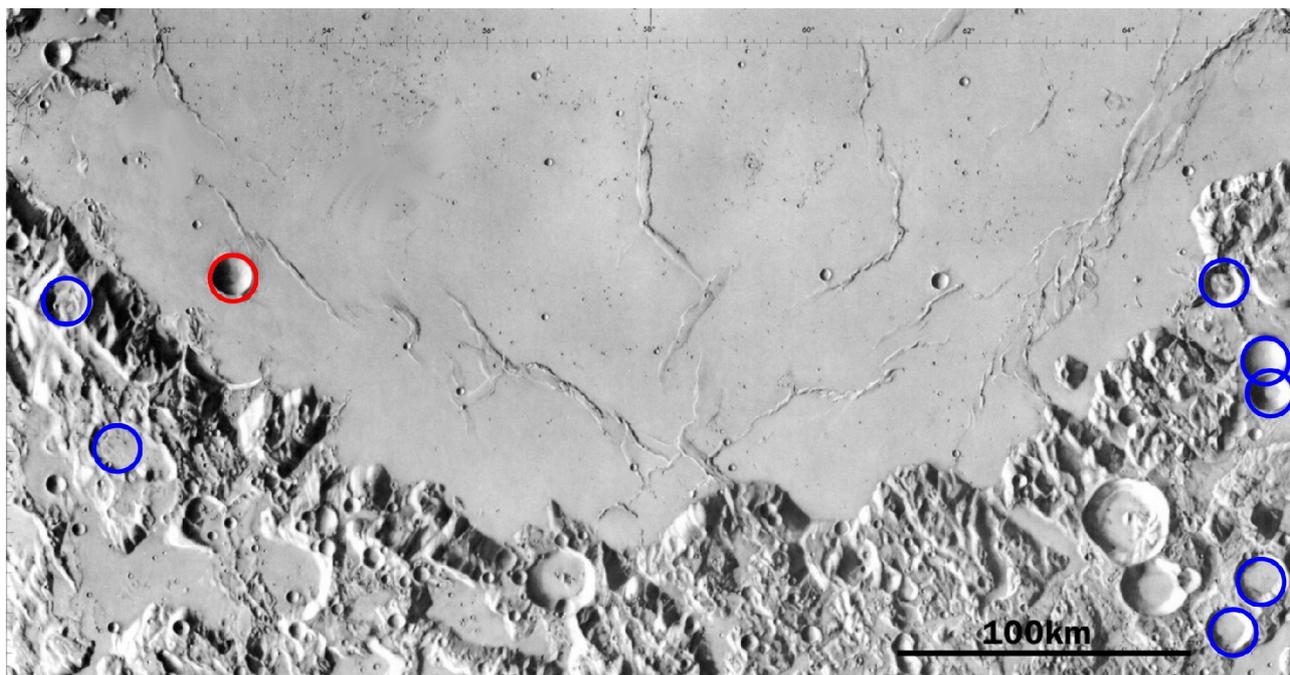
Rmq : Dans la figure 11, y = années.

L'aire de la surface représentée de Mare Undarum est d'environ 130 km par 425 km soit $A = 55\,250\text{ km}^2$.

L'aire du continent lunaire est d'environ 100 km par 425 km soit $A = 42\,500\text{ km}^2$.

Si on prend les cratères qui font 0,5 cm soit 12,5 km de diamètre, on en compte 1 dans Mare Undarum et 7 sur le continent. Ceci fait un taux de cratérisation de $1,8 \cdot 10^{-5}$ pour Mare

Undarum et 1,6. 10⁻⁴ pour le continent. En reportant dans le diagramme de Hartman-Neukum, on trouve que pour l'intervalle 8-16 km, cela conduit à un âge compris entre 2 et 3,5Ga pour Mare Undarum et 3,5 et 4Ga pour le continent.



Partie 3 : Structure interne de la Lune

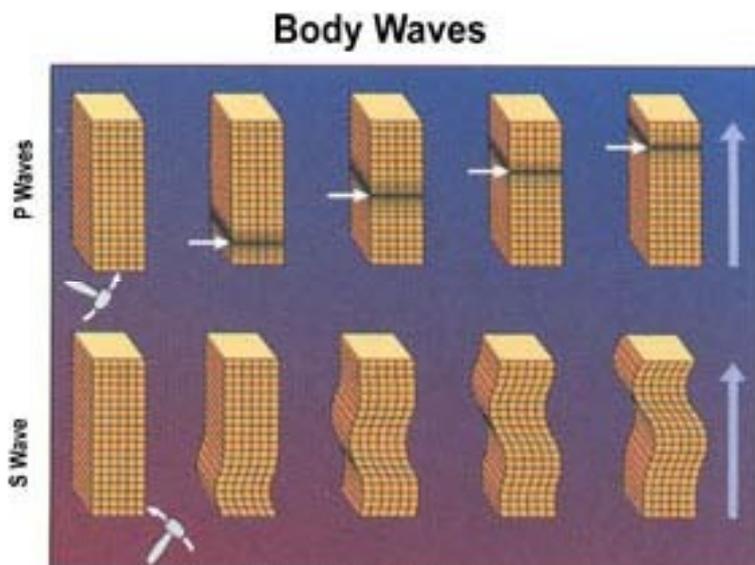
Parmi les instruments scientifiques laissés sur la Lune lors des missions Appolo figuraient plusieurs sismomètres. Grâce à ces instruments, il a été possible de sonder l'intérieur de la Lune tout comme cela a été fait pour déterminer la structuration en enveloppes concentriques de la Terre.

Sur la Lune, 20% des séismes sont d'origine externe et sont la conséquence des impacts météoritiques qui s'y produisent. La profondeur des foyers sismiques pour les séismes d'origine interne est située pour 0,4% aux alentours de 100km de profondeur et pour 99,6% entre 800 et 1000km de profondeur.

1. *Quels sont les deux types d'ondes de volume pouvant se propager dans un corps rocheux? Illustrez le mouvement des particules associé à ces deux types d'ondes à l'aide d'un schéma. Quelle est l'expression de la vitesse de ces ondes en fonction des propriétés du milieu ?*

Les ondes de volume sont les ondes de compression (longitudinales) (P) et les ondes de cisaillement (transversales) (S)

Les mouvements de la matière sont illustrés sur le schéma ci-dessous



En fonction du module d'incompressibilité K (Pa), du module de cisaillement μ (Pa) et de la masse volumique des roches ρ (kg m^{-3}), les vitesses sont $V_p^2 = (K + 4/3\mu)/\rho$ et $V_s^2 = \mu/\rho$ [pour expression, pour les propriétés, pour leurs dimensions]

2. La figure 12 montre le modèle sismique de l'intérieur de la Lune jusqu'à environ 1000km. *Identifiez les différentes enveloppes qui composent la Lune et nommez les en faisant des analogies avec la Terre. Rappelez à quoi sont dues les discontinuités qui séparent ces enveloppes sur Terre.*

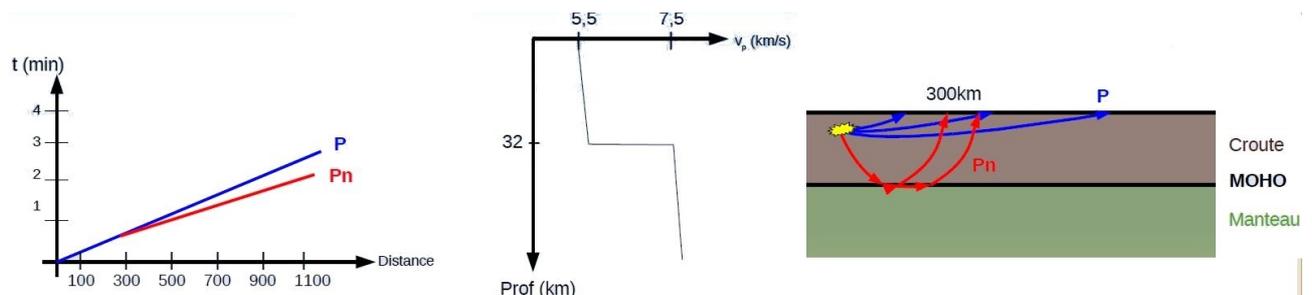
On observe les discontinuités suivantes :

- la limite croute-manteau vers 40km de profondeur. On peut l'identifier grâce au saut de vitesse des ondes P qui passe d'environ 6km/s à plus de 8km/s. Sur Terre, le Moho situé en moyenne vers 30km de profondeur correspond au passage de roche de la croute (gabbro ou granodiorite-granulite) aux roches du manteau que sont les péridotites.
- Une discontinuité vers 575km de profondeur qui pourrait délimiter un manteau supérieur et un manteau inférieur. Sur Terre, cette discontinuité est due au passage de l'olivine sous forme gamma à un assemblage de perovskite et magnésioiwustite.
- Une zone à moindre vitesse (LVZ) entre 620 et 680km qui sur Terre est due au fait que

le géotherme tangente le solidus des péridotites

3. *A l'aide d'un ou plusieurs schémas, expliquez comment la première discontinuité que vous avez identifiée a été découverte sur Terre*

Mohorovicic, en 1909, découvre que la relation distance (épicrocentre– station) et temps d'arrivée des ondes change brusquement avec l'arrivée d'une onde P guidée par l'interface du Moho. Celle-ci se propage à la vitesse des ondes dans le manteau supérieur.



4. Sur la Lune, l'existence d'un noyau est toujours soumise à débat. *Quels sont les arguments qui, sur Terre, permettent de penser qu'il y a un noyau dense au centre?*

Argument 1 : la densité moyenne de la Terre est de 5,5, celle des roches échantillonnables de 3 à 3,5 en moyenne donc il doit exister quelque chose de plus dense au centre.

Argument 2 : la valeur du moment d'inertie montre que la répartition des masses est inégale et que le centre est plus dense.

5. La figure 13 montre le champ magnétique rémanent enregistré dans les roches lunaires en fonction de leur âge.
- 5.1. *Comment le champ magnétique peut-il être fossilisé dans les roches? Quelle(s) application(s) géologique(s) cette fossilisation du champ magnétique a-t-elle sur Terre ?*

Lors de leur formation, certaines roches contiennent des minéraux ferromagnétiques donc aimantables comme la magnétite.

Les roches magmatiques particulièrement lorsque mises en place dans un champ magnétique environnant (ici lunaire) ont leur minéraux qui peuvent enregistrer le champ magnétique ambiant lorsqu'elles passent sous la température de Curie.

Au cours du temps le champ magnétique change régulièrement de sens. Les paléomagnétismes océaniques et continentaux qui permettent de retrouver la position passée de lieux sont des applications de l'enregistrement du champ magnétique dans les roches.

- 5.2. *Quelle(s) réflexion(s) vous inspire(nt) les données obtenues sur la Lune?*

Avant 3,8 Ga, la Lune possédait un champ magnétique plus fort. Or le champ magnétique terrestre est générée par la convection du noyau de fer liquide. On peut

donc penser que la Lune a eu un noyau liquide en convection avant 3.8Ga.

6. Dans le cas où il existerait un noyau, plusieurs compositions extrêmes sont envisagées : soit le noyau est fait d'un assemblage de fer pur, soit il est constitué de sulfure de fer. *A partir des données suivantes, calculez le rayon du noyau pour ces deux chimies.*

Données : $\rho_{\text{Lune}} = 3340\text{kg/m}^3$, $\rho_{\text{manteau}} = 3300\text{kg/m}^3$, $\rho_{\text{Fe pur}} = 8100\text{kg/m}^3$, $\rho_{\text{FeS}} = 4700\text{kg/m}^3$, $R_{\text{lune}} = 1731\text{km}$

$$\rho_{\text{lune}} \times V_{\text{lune}} = \rho_{\text{noyau}} \times V_{\text{noyau}} + \rho_{\text{manteau}} \times V_{\text{manteau}}$$
$$\rho_{\text{lune}} \times V_{\text{lune}} = \rho_{\text{noyau}} \times V_{\text{noyau}} + \rho_{\text{manteau}} \times (V_{\text{lune}} - V_{\text{noyau}})$$

$$\rho_{\text{lune}} \times V_{\text{lune}} = V_{\text{noyau}} \times (\rho_{\text{noyau}} - \rho_{\text{manteau}}) + \rho_{\text{manteau}} \times V_{\text{lune}}$$

$$V_{\text{noyau}} = (\rho_{\text{lune}} - \rho_{\text{manteau}}) / (\rho_{\text{noyau}} - \rho_{\text{manteau}}) \times V_{\text{lune}}$$

En rappelant que $V = 4/3 * \text{PI} * R^3$

Il vient $R_{\text{noyau}} = \text{RACINE CUBIQUE} [(\rho_{\text{lune}} - \rho_{\text{manteau}}) / (\rho_{\text{noyau}} - \rho_{\text{manteau}})] \times R_{\text{lune}}$

AN : Pour un noyau de FeS : $R = 529 \text{ km}$ et pour un noyau de Fe : $R = 351 \text{ km}$

7. La figure 14 présente l'influence de la taille du noyau sur la répartition des contraintes au sein de la Lune. *Ce résultat permet-il de trancher quant à la taille et la nature du noyau?*

Les séismes sont dus à un phénomène de rupture de la roche qui se produit lorsque la contrainte dépasse le seuil de rupture. La sismicité devrait donc se localiser là où les contraintes différentielles sont maximales. L'hypothèse d'un gros noyau (FeS) semble donc être en meilleur accord avec la distribution de sismicité.

Partie 4 : Origine et devenir de la Lune

Avant le programme Apollo, différentes hypothèses étaient proposées pour la formation de la Lune. La campagne Apollo, par ses retours d'échantillons, a permis de n'en retenir qu'une seule. C'est notamment la mesure de la composition isotopique en oxygène des différents échantillons lunaire qui a permis cette proposition.

1. On définit le coefficient de fractionnement isotopique $\alpha_{AB} = R_A/R_B$ où R_A et R_B sont des rapports isotopiques dans un échantillon A et un échantillon B. On appelle R_S , ce même rapport dans un standard.

1.1. *A partir de ces notations, définissez la notation delta pour l'échantillon A (δ_A). En quelle unité est-il exprimé ? Quel est le standard utilisé pour l'oxygène ?*

On peut écrire $\delta_A = (R_A/R_S - 1) \times 1000$. Le delta est exprimé en pour mille et son standard soit le PDB soit le SMOW. Ici, on préférera le PDB étant donné qu'on mesure des roches.

1.2. Démontrer que $\delta A - \delta B \approx 1000 \cdot \ln(\alpha_{AB})$

On peut écrire $\delta A = (\alpha_{AS} - 1) \times 1000$ or les fractionnements isotopiques sont très faibles donc $\alpha \approx 1$. On peut donc écrire $\alpha - 1 \approx \ln \alpha$.

Il vient alors : $\delta A = 1000 \cdot \ln \alpha_{AS}$ (1)

De même : $\delta B = 1000 \cdot \ln \alpha_{BS}$

On a donc $\delta A - \delta B = 1000 \ln(\alpha_{AS} / \alpha_{BS})$

Or $\alpha_{AS} = R_A/R_S$ et $\alpha_{BS} = R_B/R_S$

On peut donc écrire $\delta A - \delta B = 1000 \ln(R_A/R_B)$

On peut donc écrire $\delta A - \delta B = 1000 \ln \alpha_{AB}$.

NB : L'indication 1 sert lors d'un départ différent pour la résolution du problème.

Rmq : on rappelle que $(1+h)/(1+h') \approx 1+h-h'$ quand $h \ll 1$ et $h' \ll 1$ et $\alpha - 1 \approx \ln \alpha$ quand $\alpha \approx 1$

1.3. On pose que $\ln(\alpha) = f \cdot \Delta m$ avec f une constante et Δm la différence de masse entre deux isotopes. Démontrer que dans un diagramme $\delta^{17}O$ VS $\delta^{18}O$, les échantillons d'un système chimique isolé (même corps parent) s'alignent sur une même droite de pente $1/2$.

On a donc $\ln(\alpha) = f \cdot \Delta m$.

Appliqué au fractionnement ^{18}O - ^{16}O , on peut écrire $\ln(\alpha_{18-16}) = 2 \cdot f$ puisque la différence de masse entre l'oxygène 18 et l'oxygène 16 est de 2. De même, $\ln(\alpha_{17-16}) = f$.

D'après (1), $\ln(\alpha_{18-16}) = 10^{-3} \cdot \delta^{18}O$, donc $\delta^{18}O = f \times 2 \cdot 10^3$. De même, $\delta^{17}O = f \times 10^3$.

On peut donc en déduire que $\delta^{18}O = 2 \cdot \delta^{17}O$.

Dans une droite $\delta^{17}O$ VS $\delta^{18}O$, les échantillons d'un système chimique isolé (même corps parent) s'alignent sur une même droite de pente $1/2$.

1.4. D'après la figure 15, qu'en concluez-vous sur l'origine de la Lune?

On constate que les échantillons lunaires s'alignent sur la même droite que la Terre. Terre et Lune ont donc une origine commune : on peut penser que la Lune a été formée à partir de la Terre.

2. Des études des concentrations en potassium et en uranium dans les échantillons

terrestres et lunaires ont été effectuées afin de savoir si la Lune avait été formée par un impact ou bien par un phénomène magmatique. K est un élément très volatil alors que U est un élément très réfractaire. Par contre, les deux éléments sont incompatibles.

2.1. *Définissez les termes de volatil, réfractaire et incompatible.*

Un élément volatil est un élément qui va facilement se vaporiser c'est à dire à une température faible ou inversement se condenser à une température élevée.

Un élément réfractaire va quant à lui se condenser à haute température ou se vaporiser difficilement.

Un élément incompatible est un élément qui, lors des processus magmatiques comme la fusion partielle, va préférentiellement migrer dans la phase liquide et y rester.

2.2. *Le diagramme présenté à la figure 16 vous permet-il de trancher entre les deux hypothèses?*

Si la Lune provenait d'un phénomène magmatique comme un volcan terrestre géant, alors, étant donné que K et U ont le même degré d'incompatibilité, ceux-ci n'auraient pas été fractionnés. On devrait donc avoir un rapport K/U identique dans les échantillons terrestres et lunaires.

Si la Lune a été formée par un impact, alors, K a été préférentiellement volatilisé et U très peu. On voit donc un rapport K/U différent de celui de la Terre, ce rapport devant être plus faible puisque plus de K a été volatilisé que de U.

Le diagramme de la figure 16 montre que la deuxième hypothèse est à retenir.

3. Les équipages de la mission Appolo 11 ont déposé à la surface du sol lunaire des miroirs réfléchissants. Ces derniers sont régulièrement utilisés afin de mesurer la distance Terre-Lune. Pour ce faire, des laboratoires, comme celui de Grasse en France, possèdent un « laser-lune ». Des tirs de lasers sont régulièrement réalisés sur ces miroirs qui renvoient le faisceau au laboratoire : on peut ainsi déterminer le temps aller-retour de la lumière et en déduire la distance Terre-Lune.

3.1. *Le graphique de la figure 17 présente le résultat de ces mesures de distance Terre-Lune depuis 1987 jusqu'à 2005. Commentez l'évolution qualitative et quantitative de la distance Terre-Lune.*

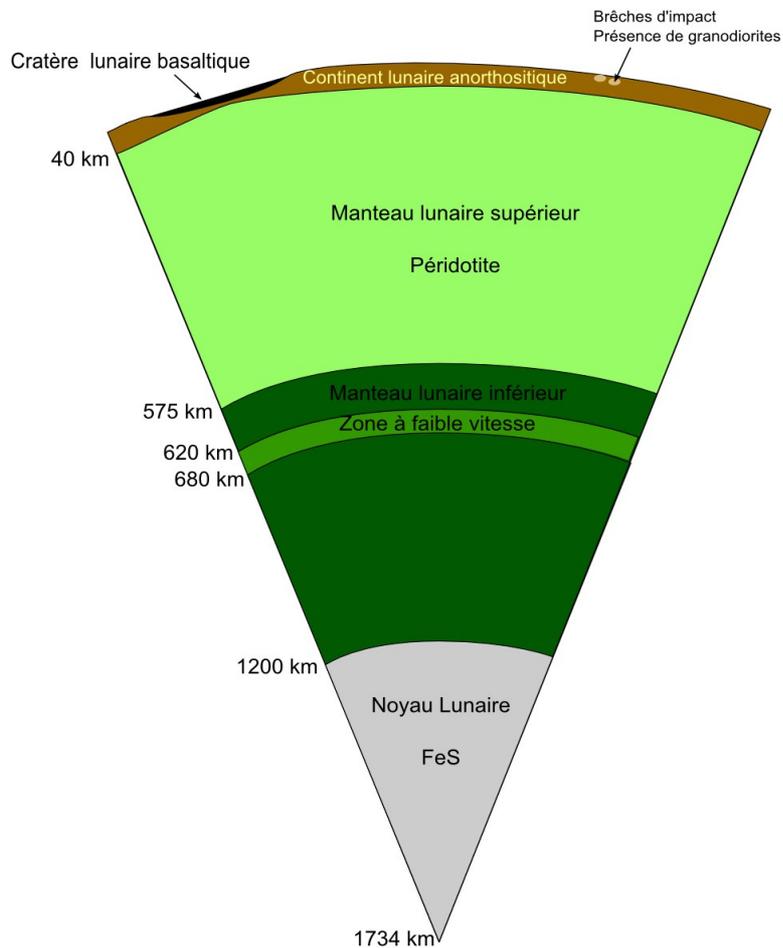
En traçant une droite approximative dans le diagramme, on constate que la distance Terre-Lune augmente linéairement avec le temps. La Lune s'éloigne donc de la Terre. De façon, quantitative, on peut calculer un éloignement de 3,5 cm/an étant donné la pente de la droite.

3.2. *Que se passera-t-il dans plusieurs millions d'années?*

On peut penser que dans plusieurs millions d'années, la Lune se sera suffisamment éloignée pour quitter la sphère d'attraction terrestre.

Partie 5 : Synthèse

Réalisez une synthèse résumant la structuration de la Lune et son histoire.



Pour l'histoire de la Lune, les dates clés sont les suivantes :

- 4.56Ga : Formation de la Terre
- 4.55Ga : Formation de la Lune
- Avant 4.0Ga : Formation des continents lunaires
- Vers 3.8 Ga : Bombardement tardif
- Vers 3.5 Ga : Formation des mers lunaires