

Concours BCPST 2020 – Écoles normales supérieures et ENPC

Épreuve écrite de sciences de la Terre – Rapport du jury

- Alexandre Aubray, PRAG Sciences de la Terre, Aix-Marseille Université
- Armelle Baldeyrou-Bailly, Professeur Agrégé, Université de Strasbourg
- Sylvain Bernard, Chargé de Recherche CNRS, MNHN
- Kristel Chanard, Chargée de Recherche CNRS, IPGP
- Olivier Dequincey, Professeur Agrégé, ENS de Lyon
- Stéphanie Durand, Chargée de Recherche CNRS, ENS de Lyon
- Patrick Meunier, Maître de Conférence, ENS de Paris

1. Remarques générales sur le sujet et les copies

Le sujet Sciences de la Terre 2020 comprenait trois parties indépendantes, chacune portant sur la Lune. Il s'agissait donc d'un sujet en lien avec l'actualité puisque l'année 2020 marque le début de la décennie du retour sur la Lune. Chaque partie couvrait une des grandes disciplines des sciences de la Terre, permettant ainsi à chacun(e) des candidat(e)s de s'exprimer quelle que soit leur discipline préférée. Si ce n'est un peu de culture générale de base (cf ci-dessous), aucune connaissance préalable concernant la Lune n'était requise pour répondre aux différentes questions. Ce sujet, pourtant construit de manière à trier plus qu'à classer les candidats, a permis aux candidat(e)s de mettre en lumière leurs qualités, comblant ainsi en partie l'absence d'épreuve orale. Il semble que les candidat(e)s ont pris le temps de bien lire le sujet, peu de réponses hors sujet ont été rencontrées. Sur l'ensemble des copies corrigées, des réponses exactes ont été données à toutes les questions. Les copies ont été pour la plupart bien écrites et illustrées (comme chaque année, la présentation des copies comptait dans la note finale). Le jury a apprécié la qualité des schémas proposés mais souligne qu'il convient de faire attention à la cohérence de ces derniers avec la réponse rédigée. Si un schéma contredit la réponse rédigée, le correcteur ne peut donner aucun point. Comme chaque année, certain(e)s candidat(e)s ont cherché des points 'faciles' dans les différentes parties du sujet, mais certaines de ces questions 'faciles' ne l'étaient qu'en apparence, et pour y répondre, il fallait en avoir résolu des plus ardues au préalable. Le sujet était construit de sorte qu'il était plus payant de répondre à des enchaînements de questions que de chercher les réponses 'faciles'. Les meilleures copies sont celles de candidat(e)s qui ont essayé de répondre à toutes les questions d'une partie avant de passer à la suivante. Le jury déplore cette année (comme les précédentes) les erreurs trop fréquentes lors des applications numériques, et ce bien que la calculatrice ait été autorisée. Pour rappel, les données doivent généralement, pour obtenir le bon résultat chiffré, être exprimées en unités du système international. La suite de ce rapport décrit chaque partie et, sans pour autant faire un catalogue des « perles du concours », souligne les erreurs trop fréquemment rencontrées pour qu'elles puissent être seulement attribuées au stress du concours.

Suite aux conséquences de la crise sanitaire sur l'organisation des épreuves, nous avons été amené à adapter les coefficients. Pour cette session, l'épreuve de Sciences de la Terre comptait pour 10% du total des points dans le cas d'une option « Biologie » et 25% dans le cas d'une option « Géologie ». Ces modifications ont été apportées pour compenser le fait que les oraux n'ont pas pu être organisés.

2. Remarques détaillées

2.1 Partie 1: Origine, Faces, Phases, Age

La correction de la partie 1 est donnée à la fin de ce rapport. L'objectif de cette partie était d'estimer l'âge de la Lune en utilisant deux méthodes différentes de radiochronologie, la méthode Sm-Nd et la méthode Pb-Pb. En guise d'introduction à cette partie, des questions de culture générale étaient posées. Il s'agissait de présenter les différentes hypothèses concernant l'origine de la Lune, d'expliquer pourquoi la Lune a une face visible et une face cachée, de discuter de la topographie de la Lune et d'expliquer pourquoi on parle de différentes phases. Bien qu'a priori simples, ces questions ont fait chuter beaucoup de candidat(e)s. Il était conseillé de faire des schémas, et beaucoup de candidat(e)s s'y sont essayé(e)s. Malheureusement, peu de candidat(e)s ont proposé des schémas justes, et encore moins les ont utilisés correctement. Il a été proposé (à tort) par bon nombre de candidat(e)s que si la Lune a une face visible et une face cachée, c'est par qu'elle ne tourne pas sur elle-même. De même, pour beaucoup, la nouvelle Lune est une éclipse lunaire, la Lune n'étant pas visible car dans l'ombre de la Terre, et il est quasi impossible d'expliquer la pleine Lune. Ces questions qui n'auraient dû servir qu'à plonger les candidat(e)s dans le vif du sujet ont finalement été les plus sélectives.

La partie portant sur la radiochronologie a dans l'ensemble été bien réussie, même si les applications numériques ont été le plus souvent ratées. Les formules à utiliser devaient être démontrées, mais l'énoncé était construit de manière à accompagner les candidat(e)s. Il était possible d'obtenir un grand nombre de points sans avoir jamais fait de radiochronologie. Malheureusement, bon nombre de candidat(e)s ont obtenu des résultats faux en utilisant les formules sans convertir les âges donnés en milliards d'années en secondes, quand bien même il était précisé que les équations n'étaient valables que si les variables étaient exprimées dans les unités du système international. Le plus triste reste l'absence de réactions chez certain(e)s candidat(e)s qui obtiennent des résultats aberrants (comme par exemple un âge de 500 Ga). Une erreur dans l'énoncé de la question 1.2.3.5. a stoppé un grand nombre de candidat(e)s (la correction a été adaptée pour compenser) mais pas la totalité, certain(e)s ont en effet mis le doigt sur le problème et ainsi pu trouver la bonne réponse. La fin de la partie 1 abordait le concept de datation par comptage de cratères (il était bien entendu question de cratères d'impacts, comme cela était précisé dans l'énoncé). Là encore, aucune connaissance n'était requise. Malheureusement, peu de candidat(e)s ont tenté de répondre à ces questions et seul(e)s quelques un(e)s l'ont fait de façon satisfaisante.

2.2 Partie 2 : Nature, Structure

Comme son nom l'indique, l'objectif de cette partie était d'aborder la nature et la structure de la Lune sous différents angles : pétrographie, gravimétrie, sismologie. La plupart des candidat(e)s ont engrangé des points sur la reconnaissance de roches. Les roches magmatiques sont bien connues par les candidat(e)s, une majorité de bonnes réponses a donc été donnée, mais peu de candidat(e)s ont identifié la brèche d'impact et expliqué la formation du régolithe correctement. Cette partie souligne néanmoins que les bases de pétrographie sont plutôt bien maîtrisées, même s'il reste regrettable que certain(e)s candidat(e)s concluent à une structure microlithique sans lame mince, ou parlent de pléochroïsme sur la base d'une seule microphotographie. La suite donnait les pourcentages en poids d'oxydes d'une olivine dont il fallait déterminer la formule structurale. Très peu de candidat(e)s s'y sont frotté(e)s, et seul un nombre encore plus faible a réussi à répondre correctement, bien qu'il s'agisse à nouveau d'une procédure classique en sciences de la Terre.

La deuxième moitié de la partie 2 nécessitait d'avoir déjà entendu parlé des concepts de base de la gravimétrie, et notamment de l'anomalie à l'air libre, même s'il restait possible de décrire et d'interpréter les figures fournies sans maîtriser le sujet. Cette question a montré la confusion assez

générale chez les candidat(e)s entre topographie et tomographie, entre pesanteur et gravité, entre anomalie et correction, entre ellipsoïde de référence et géoïde (ou lunoïde/sélénoïde). Le concept d'isostasie n'a malheureusement été que très peu discuté. Beaucoup de candidat(e)s n'ont consacré que peu de temps à cette question, celles et ceux qui ont fourni des réponses argumentées et illustrées ont engrangé des points. La sismologie constituait la fin de la partie 2. Même si la notion d'ondes sismiques et leurs caractéristiques semblent bien connues, l'interprétation des profils de vitesse n'a pas été simple pour bon nombre de candidat(e)s. Le calcul du rayon du noyau de la Lune a plutôt été bien fait, même si de nombreux résultats incorrects ont été obtenus du fait d'applications numériques erronées.

2.3 Partie 3 : Distance, Période, Marées, Frottements

Cette partie était la plus physique. Trois exercices étaient proposés et devaient permettre aux candidat(e)s de déterminer la distance Terre-Lune, de calculer la période synodique de la Lune, et de discuter du phénomène des marées. Beaucoup d'informations étaient données dans les énoncés. Les deux premiers exercices ont été plutôt bien réussis par les candidat(e)s, même si un bon nombre s'est perdu dans les unités. La principale difficulté (qui n'aurait pas dû en être une) du premier exercice pour les candidat(e)s a été de convertir des minutes d'arc en radians. Le deuxième exercice, portant sur la période synodique de la Lune, a été traité par une majorité de candidat(e)s, mais seule une fraction a fait l'effort de répondre de façon rigoureuse à la dernière question qui rapportait le plus de points.

La partie concernant les marées a malheureusement souvent été négligée ou abordée trop superficiellement, probablement parce qu'en fin de sujet. Quoi qu'il en soit, cet exercice souligne la moins bonne disposition des candidat(e)s BCPST pour les aspects les plus physiques des sciences de la Terre. Néanmoins, comme tous les ans, certain(e)s candidat(e)s, plus à l'aise en physique qu'en géologie, ont trouvé là une possibilité de s'exprimer. Cet exercice était construit de telle sorte qu'il n'était pas indispensable de répondre correctement aux premières questions pour aller plus loin, mais malgré cela, les difficultés rencontrées par les candidat(e)s sur les premières questions les ont, semble-t-il, souvent découragé(e)s à poursuivre (à moins qu'il ne s'agisse seulement d'un manque de temps). Il en aurait peut-être été différemment si cet exercice avait été proposé dès le début de l'épreuve.

3. Eléments de correction

Partie 1 – Origine, Faces, Phases, Age

Rappel : Une équation n'est utilisable que si les variables sont exprimées dans les unités du système international.

1.1. Généralités

1.1.1. Quelle est l'origine de la Lune ? Quelles sont les autres hypothèses ? Pourquoi la Lune a-t-elle une face dite 'visible' et une face dite 'cachée' ? Illustrez vos réponses.

L'hypothèse de l'impact géant propose que la Lune a été créée à partir de la matière éjectée par une collision entre la jeune Terre et un corps planétoïde (protoplanète) de la taille de Mars nommé Théia. Cette hypothèse demeure la plus robuste pour expliquer la formation de la Lune.

D'autres scénarios ont été proposés, comme celui de la fission, celui de la capture, ou encore celui de la création simultanée.

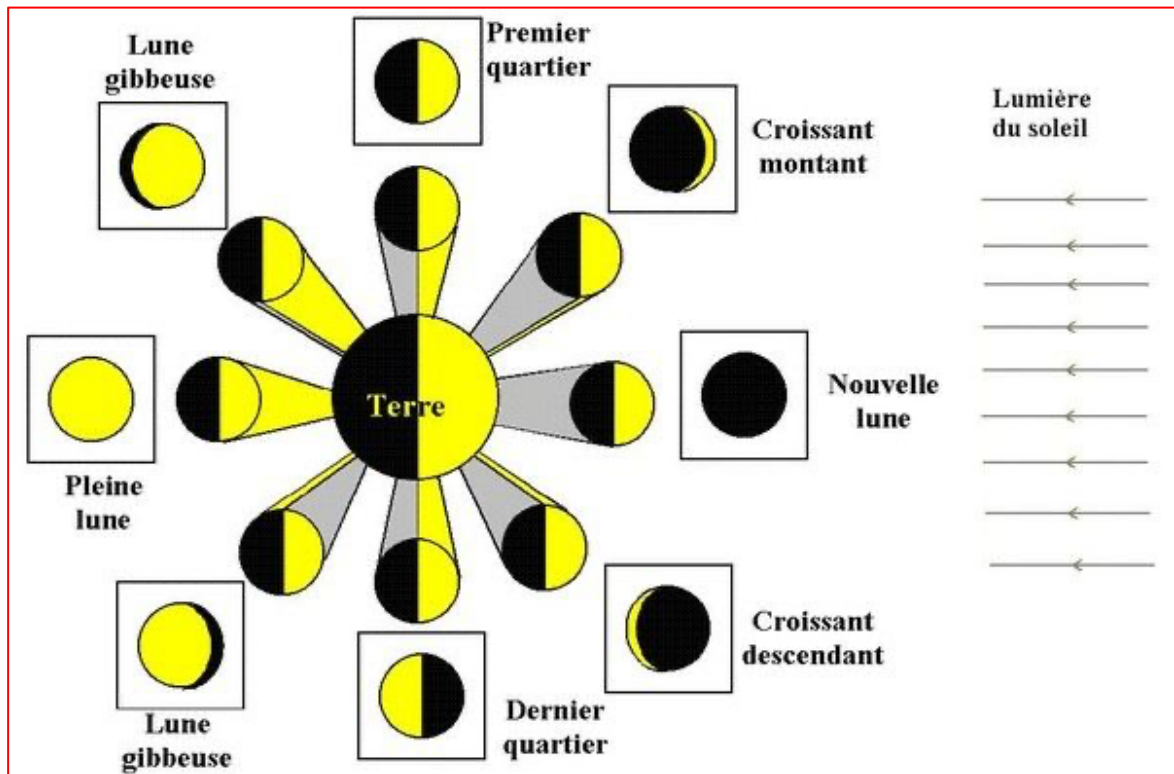
Le synchronisme entre les périodes de rotation et de révolution de la Lune fait qu'elle nous montre

toujours la même face. Ce synchronisme est la résultante des forces de marée.

1.1.2. Expliquez la topographie de la Lune. A quoi correspondent les zones sombres et les zones claires observables à la surface de la Lune ?

On observe une multitude de cratères d'impact de toutes tailles. Les zones sombres, les mers lunaires, sont remplies de laves basaltiques. Les zones claires sont constituées de régolithe.

1.1.3. Pourquoi la Lune a-t-elle différentes phases ? Vous illustrerez vos réponses à l'aide de schémas.



1.2. Age de la Lune

La datation d'un échantillon de 1.8 kg (échantillon 60025), ramené sur Terre par la mission Apollo 16 en 1969 (la seule mission ayant échantillonné la croûte anorthositique lunaire) a permis de discuter de l'âge de la Lune. Cet échantillon est principalement constitué de plagioclases et de pyroxènes.



	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$
Pyroxenes	$0,3052 \pm 3.10^{-4}$	$0,5158 \pm 5.10^{-4}$
Plagioclases	$0,1505 \pm 2.10^{-4}$	$0,5113 \pm 5.10^{-4}$
	$^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$
Pyroxenes	$0,0012 \pm 2.10^{-4}$	$0,5569 \pm 2.10^{-4}$
Pyroxenes	$0,0163 \pm 2.10^{-4}$	$0,6423 \pm 2.10^{-4}$
Pyroxenes	$0,0394 \pm 2.10^{-4}$	$0,7935 \pm 2.10^{-4}$

*Photographie d'un fragment de l'échantillon 60025 montrant des pyroxènes (vert clair) dans une matrice de plagioclases (blanc).
Rapports isotopiques des plagioclases et des pyroxènes de l'échantillon 60025
(Source : Borg et al., 2011)*

1.2.1. Radio-chronologie

La radio-chronologie est basée sur la décroissance radioactive de certains radionucléides. Cette désintégration en éléments radiogéniques suit une loi de décroissance exponentielle qui n'est dépendante que de la nature du radionucléide considéré. Le nombre de désintégrations de l'isotope père (dP) au cours d'une période dt est donc proportionnel à la teneur en ce radionucléide P, d'où $\frac{dP}{dt} = -\lambda P$, avec λ la constante de désintégration.

1.2.1.1. Exprimez la quantité d'isotope père au temps t (Pt) en fonction de sa quantité initiale (P₀) et de sa constante de désintégration λ , puis la quantité d'isotope fils F en fonction de sa quantité initiale (F₀) et de la quantité de l'isotope père au temps t (Pt).

$$\begin{aligned} P_t &= P_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \\ F_t &= F_0 + (P_0 - P_t) \\ F_t &= F_0 + P_t \cdot (e^{\lambda \cdot t} - 1) \end{aligned}$$

1.2.1.2. Exprimez en fonction de λ le temps de demi-vie T correspondant au temps nécessaire à la désintégration de la moitié des radionucléides pères.

$$T = \ln 2 / \lambda$$

1.2.1.3. En négligeant la quantité initiale d'isotope fils, exprimez t en fonction de F_t/P_t.

$$t = \ln (F_t/P_t + 1) / \lambda$$

1.2.2. La méthode Sm-Nd

Le ¹⁴⁷Sm est radioactif et se désintègre en ¹⁴³Nd stable en produisant un ⁴He, avec une constante de désintégration $\lambda_{Sm} = 6,54 \cdot 10^{-12} \text{ a}^{-1}$.

1.2.2.1. La quantité de ¹⁴⁴Nd étant *a priori* constante, montrez que le rapport $(\frac{^{143}Nd}{^{144}Nd})_t$ peut s'exprimer en fonction de λ_{Sm} , de $(\frac{^{143}Nd}{^{144}Nd})_0$ et de $(\frac{^{147}Sm}{^{144}Nd})_t$.

$$F_t = F_0 + P_t \cdot (e^{\lambda_{Sm} \cdot t} - 1), \text{ d'où } (\frac{^{143}Nd}{^{144}Nd})_t = (\frac{^{143}Nd}{^{144}Nd})_0 + (\frac{^{147}Sm}{^{144}Nd})_t (e^{\lambda_{Sm} \cdot t} - 1).$$

1.2.2.2. A quoi correspond le coefficient directeur de la droite définie par la relation trouvée en 1.2.2.1 ? Comment appelle-t-on cette droite ? Est-il possible de remonter à l'âge d'un échantillon si un seul minéral a été mesuré ?

La pente de cette droite est $(e^{\lambda_{Sm} \cdot t} - 1)$.

Cette droite est une isochrone.

On ne peut remonter à l'âge de l'échantillon que si on a au moins deux points.

1.2.2.3. Quel âge obtenez-vous pour l'échantillon 60025 avec la méthode Sm-Nd ?

La pente de l'isochrone est 0,0291. Cela donne un âge $t \approx 4,385 \cdot 10^9$ ans

1.2.3. La méthode Pb-Pb

L'uranium possède deux isotopes radioactifs, ^{235}U et ^{238}U . Par des suites complexes de désintégration, ^{235}U se transforme en ^{207}Pb , ^{238}U en ^{206}Pb . On définit λ_{235} et λ_{238} les constantes de désintégration de ^{235}U et ^{238}U ($\lambda_{235} = 3,12 \cdot 10^{-17} \text{ s}^{-1}$ et $\lambda_{238} = 4,92 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1}$).

1.2.3.1. Quels sont les temps de demi-vies de ^{235}U et de ^{238}U ?

$T = \ln 2 / \lambda$, d'où $T = 4.47 \text{ Ga}$ pour ^{238}U et 0.7 Ga pour ^{235}U

1.2.3.2. Considérant $^{206}\text{Pb}_t$ et $^{206}\text{Pb}_0$ les quantités de ^{206}Pb à l'instant t et à l'instant initial, et $^{207}\text{Pb}_t$ et $^{207}\text{Pb}_0$ les quantités de ^{207}Pb à l'instant t et à l'instant initial, montrez que $^{206}\text{Pb}_t = ^{206}\text{Pb}_0 + ^{238}\text{U}_t(e^{\lambda_{238}t} - 1)$ et que $^{207}\text{Pb}_t = ^{207}\text{Pb}_0 + ^{235}\text{U}_t(e^{\lambda_{235}t} - 1)$.

La réponse est dans la question.

On a $^{207}\text{Pb}_t = ^{207}\text{Pb}_0 + ^{207}\text{Pb}_{\text{radiogénique}}$ et $^{207}\text{Pb}_{\text{radiogénique}} = ^{235}\text{U}_0 - ^{235}\text{U}_t$

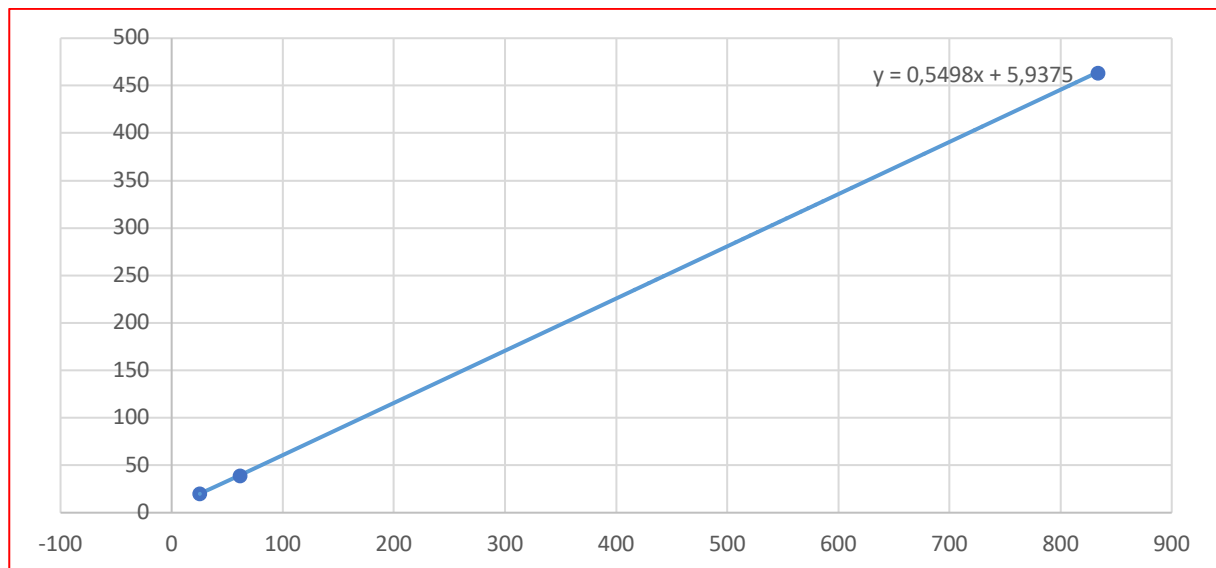
D'où $^{206}\text{Pb}_t = ^{206}\text{Pb}_0 + ^{238}\text{U}_t(e^{\lambda_{238}t} - 1)$ et que $^{207}\text{Pb}_t = ^{207}\text{Pb}_0 + ^{235}\text{U}_t(e^{\lambda_{235}t} - 1)$.

1.2.3.3. En négligeant les quantités initiales de ^{206}Pb et ^{207}Pb , exprimez le rapport $(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} / \frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}})_t$ en fonction de t , de $(\frac{^{235}\text{U}}{^{238}\text{U}})_t$ et des constantes de désintégration λ_{235} et λ_{238} .

$$\left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} / \frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_t = \left(\frac{^{235}\text{U}}{^{238}\text{U}}\right)_t \cdot \frac{(e^{\lambda_{235}t} - 1)}{(e^{\lambda_{238}t} - 1)}$$

1.2.3.4. Les rapports $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ et $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ de pyroxènes de l'échantillon 60025 ne contenant initialement ni ^{206}Pb et ^{207}Pb sont donnés dans le tableau. Reportez ces points de mesures dans un diagramme $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ en fonction de $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. Ces points s'alignent sur une droite. Que cela signifie-t-il ? Quel est le coefficient directeur de cette droite ? Peut-on directement déterminer l'âge de l'échantillon ?

Il faut calculer les ratios $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. On obtient une droite (isochrone):



Cela signifie que ces pyroxènes ont le même âge. La pente de cette droite est $\left(\frac{^{235}\text{U}}{^{238}\text{U}}\right)_t \cdot \frac{(e^{\lambda_{235}t} - 1)}{(e^{\lambda_{238}t} - 1)}$

1.2.3.5. Déterminez les valeurs des coefficients directeurs des droites qui correspondraient à des âges compris entre 4.25 et 4.5 Ga (faites le calcul pour des pas de temps de 0.025 Ga, sachant que le rapport actuel $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ vaut **1/137,88** [et non pas 137,88 comme initialement indiqué]).

t (en Ga)	4,25	4,275	4,3	4,325	4,35	4,375	4,4	4,425	4,45	4,475	4,5
Pente	0,50299	0,51161	0,52038	0,52932	0,53842	0,54769	0,55714	0,56676	0,57656	0,58654	0,59671

1.2.3.6. Estimez l'âge de l'échantillon 60025 à l'aide des résultats obtenus à la question précédente. Comparez ce résultat à l'âge obtenu par la méthode Sm-Nd.

La pente est 0,55. Ce qui donne un âge entre 4,375 et 4,4 Ga. Bon accord avec la méthode Sm-Nd

1.2.3.7. L'âge déterminé pour l'échantillon 60025 permet-il de privilégier un scénario plutôt qu'un autre concernant l'origine de la Lune ?

Le système Solaire a 4,56 Ga. L'échantillon 60025 a un âge proche de 4.38 Ga. Soit la Lune s'est formée tardivement, soit elle s'est accrétée lentement, soit elle s'est solidifiée lentement.

1.2.4. Comptage de cratères

1.2.4.1. Sur quels principes repose la datation par comptage de cratères ? Il est bien entendu question ici de cratères d'impacts.

La datation par comptage de cratères s'appuie sur deux règles simples: plus une surface est cratérisée, plus elle est ancienne, et plus les cratères sont grands, plus ils sont vieux. La seconde règle repose sur l'idée que la population des impacteurs a évolué au cours du temps ; la taille des projectiles était nettement plus importante dans la jeunesse du Système Solaire.

Qui plus est, si le bombardement météoritique a affecté de façon uniforme la surface d'une planète donnée, les régions les plus vieilles et peu érodées en ont gardé toutes les cicatrices, quand seuls des petits cratères seront visibles sur les terrains récents. Sur les terrains anciens érodés seront encore visibles les gros cratères et les cratères plus petits formés depuis l'érosion.

1.2.4.2. Les échantillons lunaires collectés lors des missions Apollo ont permis de 'calibrer' la datation par comptage de cratères. Discutez des limites d'une telle calibration.

La datation d'échantillons lunaires collectés lors des missions Apollo a permis de dresser des courbes d'évolution dans le temps de la densité et de la taille des impacteurs. Pour utiliser ces lois sur d'autres surfaces planétaires, il faut tenir compte du fait que le flux des impacteurs a probablement varié avec la distance au Soleil et de l'effet de la présence éventuelle d'une atmosphère, tout en sachant que la position des planètes et la densité des atmosphères ont pu varier au cours de l'histoire du système solaire. De plus, certaines surfaces planétaires ont pu atteindre un niveau de saturation. Leurs âges seront de ce fait sous-estimés avec cette méthode.