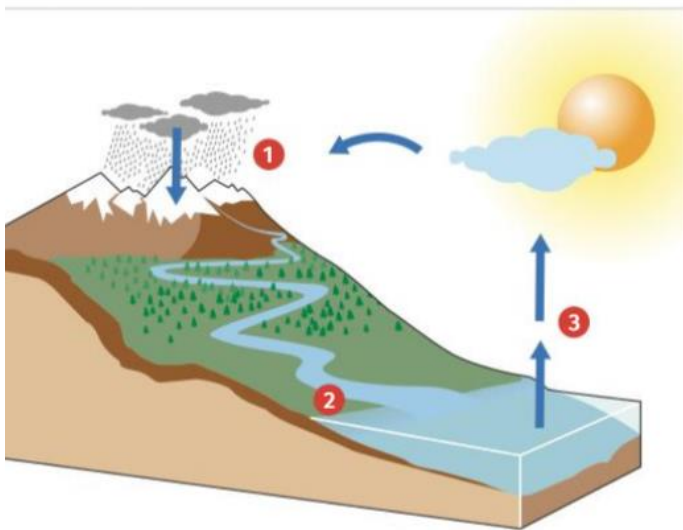


Atelier 1 : Datation par l'évolution de la salinité des océans.

Doc. 1 L'apport de sel par les rivières



- 1 Ruissellement de l'eau de pluie sur la montagne
- 2 Arrivée du fleuve à l'océan
- 3 Évaporation de l'eau

► L'eau de ruissellement se charge en sels minéraux (1), les apporte à l'océan (2), d'où elle s'évapore (3).

Doc. 2 La méthode de Halley et ses applications



Edmond Halley (1656-1742) explique que la salinité de la mer a été apportée par l'eau des rivières. L'eau « douce » des rivières contient en réalité quelques sels provenant des roches qu'elle érode. Elle fournit continuellement ces sels à l'océan qui,

en permanence, évapore de l'eau douce ; le bilan est donc simple : l'eau de l'océan se charge petit à petit en sels des rivières. Ainsi, en estimant la quantité de sels des océans et le débit total de l'apport des fleuves, on peut déduire la durée nécessaire à leur apport.

Cette idée fut exploitée par John Joly (1857-1933). Il estime l'âge de la formation des océans à 90 millions d'années. Ce modèle est simple mais erroné : il y a des processus de perte de sels (vents, dépôts, etc.) d'où il résulte que la salinité des océans n'a, en fait, que peu varié depuis un ou deux milliards d'années. Mais cette estimation a joué un rôle encore au début du XX^e siècle.

Hubert Krivine, « Histoire de l'âge de la Terre », *Images de la physique*, n° 44, CNRS, 2011.

Atelier 2 : Datation par l'étude des strates sédimentaires.

Doc. 3 Les débuts de la stratigraphie comme méthode de datation de l'âge de la Terre



Georges-Louis Leclerc, comte de Buffon (1707-1788), s'intéressa aux temps de sédimentation. Impressionné par l'épaisseur des couches sédimentaires des Alpes et la lenteur des dépôts formés par les océans, il aboutit à un âge de la Terre allant de quelques millions d'années à près de trois milliards. Prudemment, il ne publia pas ces résultats, préférant « être plat que pendu ».

Hubert Krivine, « Histoire de l'âge de la Terre », *Images de la physique*, n° 44, CNRS, 2011.

Doc. 4 La méthode stratigraphique

À partir de la fin du XVII^e siècle, l'étude des dépôts sédimentaires, appelée stratigraphie, prend son essor. L'âge de la Terre va être estimé par mesure de l'épaisseur des strates de sédiments, en utilisant la proportionnalité : s'il faut 100 ans pour qu'un millimètre de sédiments se dépose, alors il faut 100 000 ans pour former une couche d'un mètre. Cette méthode est discutable, car les sédiments ne se déposent pas de manière homogène dans le temps ni dans l'espace. Dans ce contexte, les premières datations vont de quelques millions à quelques milliards d'années, et opposent les partisans d'un temps court (les catastrophistes) et les partisans d'un temps long (les uniformistes).

Doc. 5 Des strates sédimentaires à l'affleurement en Argentine



La succession des dépôts sédimentaires permet une estimation de l'âge de la Terre. Les dépôts sont ici constitués de calcaire. Les parties plus rouges contiennent du fer en plus grande quantité.

Doc. 6 Évolution de l'estimation de l'âge minimal de la Terre par mesure de l'épaisseur des dépôts de sédiments

Date	Scientifique	Estimation de l'épaisseur totale des sédiments (km)	Taux de sédimentation estimé (mm·an ⁻¹)	Durée totale de sédimentation (Ma)
1860	Philips	22	0,229	96
1890	De Lapparent	46	0,33	90
1892	Geikie	30	0,45 à 0,044	73 à 680
1893	McGee	80	0,05	1 584
1893	Upham	80	0,8	100
1900	Sollas	81	3,1	26
1909	Sollas	102	1,28	80

Différents scientifiques proposent à partir du XIX^e siècle d'utiliser les taux de sédimentation (supposés constants) pour en déduire l'âge minimal de la Terre. Des facteurs correctifs sont utilisés pour tenir compte de la compaction des couches lors de leur enfouissement.

Atelier 3 : Datation par l'étude des fossiles

Doc. 7 L'émergence de la notion d'évolution des espèces

La découverte de nombreux fossiles de dinosaures (le mot apparaît en 1841) va obliger les scientifiques à s'interroger sur la disparition des espèces et à contredire les interprétations littérales de la Bible et les croyances en un Univers éternel et fixe.

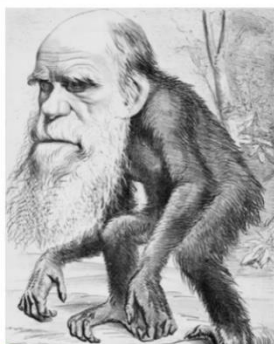
En France, Georges Cuvier (1769-1832) est partisan de la fixité des espèces. Pour lui, les espèces animales sont créées telles quelles ; certaines disparaissent, à la faveur de catastrophes (déluges, séismes, etc.), et d'autres espèces les remplacent par migration. Au contraire, Jean-Baptiste de Lamarck (1744-1829) défend la théorie transformiste :

il voit, dans les fossiles de mollusques qu'il étudie, les traces d'une lente transformation expliquant l'extinction et l'émergence des espèces. Charles Darwin (1809-1882) théorise l'évolution des espèces sur les bases posées par Lamarck : les espèces actuelles sont le fruit d'une lente évolution d'espèces ancestrales, dont le mécanisme est la sélection naturelle. Pour que des variations minimales à l'échelle d'une génération puissent peu à peu donner naissance à une nouvelle espèce, il est nécessaire que les temps géologiques soient extrêmement grands (plusieurs centaines de millions d'années).

Fossiles d'ammonites dans une couche géologique

Les fossiles observés dans les couches géologiques sont relativement homogènes : ces espèces n'ont donc pas évolué durant les millions d'années nécessaires à la sédimentation de la couche. Or, puisqu'une évolution a eu lieu, c'est que ces millions d'années sont petits à l'échelle des temps géologiques. C'est la preuve pour Darwin que la Terre est plus âgée qu'on ne le pense.

Darwin caricaturé en singe



► Parce que sa théorie de l'évolution des espèces venait bousculer tout le système de pensée européen, Charles Darwin fut féroce critiqué.



La polémique opposant physiciens et biologistes au XIX^e siècle

Discipline (et chef de file)	Méthode employée	Âge estimé de la Terre	Arguments	Incertitudes
Biologie (Darwin)	L'étude de fossiles	Au moins plusieurs centaines de millions d'années	L'évolution des espèces se fait très lentement.	L'estimation des durées de sédimentation pourrait être fautive. L'évolution pourrait se faire par « sauts » rapides.
Physique (Kelvin)	Mesure des temps de refroidissement de roches en fusion (voir groupe 4)	Au maximum cent millions d'années	Le calcul mathématique utilisé semble solide et incontestable.	Des sources inconnues de chaleur pourraient être à l'œuvre au cœur de la Terre.

► Les débats entre partisans de Darwin et partisans de Kelvin sont très virulents. Faute de preuves irréfutables, aucun des deux camps ne sort vainqueur – mais la renommée de Kelvin contribue au succès de la datation qu'il propose.

Atelier 4 : Datation par l'étude du temps de refroidissement

La méthode expérimentale de Buffon

Buffon est le premier à expérimenter afin de proposer un âge pour la Terre. Vers 1770, il part du constat que la température augmente en profondeur (d'après l'observation de mines) pour émettre l'hypothèse que la Terre était à l'origine une boule de roches en fusion, qui refroidit sans cesse depuis sa formation. Il élabore alors un protocole rigoureux à partir d'une publication de Newton sur la propagation de la chaleur : en chauffant à blanc dans ses forges de Bourgogne, des boulets de différentes tailles et en mesurant la durée de leur refroidissement, il parvient à établir un modèle qu'il extrapole à une sphère de la taille de la Terre.



Buffon face à la pression des théologiens

Dans une première publication, *Les Époques de la nature*, en 1779, Buffon annonce ainsi que la Terre doit avoir 25 000 ans, un âge bien plus important que celui admis alors par l'Église. La hardiesse de la pensée de Buffon, pour l'époque, confine à la témérité. D'ailleurs, à la sortie de son ouvrage, Buffon écrit de Paris à un ami : « Je mets donc pour le moment présent mon salut dans la fuite et je pars dimanche pour arriver à Montbard » (son fief de Bourgogne). Après quelque temps et quelques lettres d'excuses aux instances ecclésiastiques, il put revenir sur Paris. Mais il continue ses travaux et publie successivement 50 000 puis 75 000 ans. Mêmes motifs, mêmes punitions, exils en Bourgogne !

Les carnets de Buffon révèlent quant à eux que ses expériences donnent à la Terre plus de 10 millions d'années. Buffon n'a jamais publié ce chiffre, est-ce encore la pression sociale et morale qui l'a contraint à cette « discrétion » ? [...] S'il s'en tient finalement à une chronologie officielle plus courte, il ne peut s'empêcher d'en expliquer la cause en ces termes : « néanmoins il faut raccourcir autant qu'il est possible pour se conformer à la puissance limitée de notre intelligence. »

Patrick De Wever, « Buffon et la première approche expérimentale de la mesure du temps », Futura-sciences.com, septembre 2015.

Améliorations apportées par Kelvin à partir de l'hypothèse de Buffon



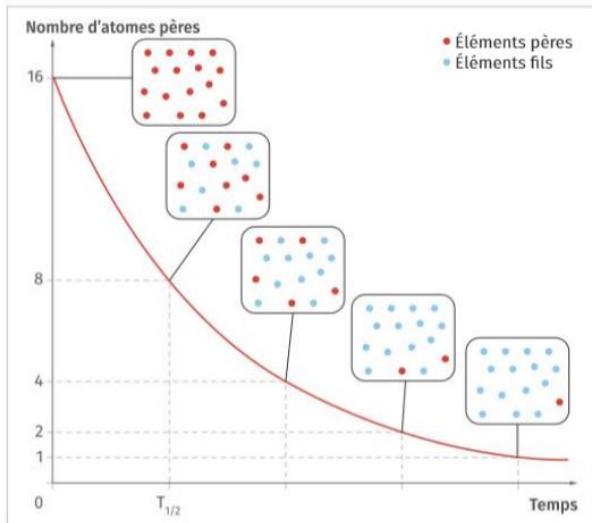
Un siècle après Buffon, Lord Kelvin (1824-1907) pense comme lui que la Terre se refroidit depuis son origine. Il reprend la même méthode, mais dispose d'un outil mathématique plus perfectionné : l'équation de la chaleur de Fourier, qui permet de prendre en compte l'évolution

du gradient de température (le refroidissement étant de plus en plus lent avec la profondeur). La méthode de calcul de Kelvin ne peut s'appliquer qu'à une Terre rigide, sans mouvement de convection interne. Kelvin affinera progressivement sa datation, pour aboutir en 1863 à une fourchette de 20 à 40 millions d'années. Cet âge considérable est cependant bien accueilli par les physiciens : depuis un siècle, les progrès des géologues ont contribué à installer l'idée d'une Terre bien plus âgée qu'on ne le pensait autrefois. D'autant que Kelvin est le physicien le plus renommé de son temps, et qu'il utilise l'équation de Fourier qui fait autorité dans le milieu scientifique.

Seuls les géologues et les biologistes, dont les théories établissent un âge de la Terre bien plus important, s'opposent à Kelvin (voir document 10). On sait aujourd'hui que la chaleur interne de la Terre est également la conséquence de la désintégration d'éléments radioactifs internes qui s'accompagne d'un dégagement de chaleur (voir activité 2).

Atelier 5 : Datation par la radioactivité

Évolution du nombre d'atomes au cours du temps, une horloge moléculaire



Au cours du temps, les éléments pères se désintègrent : ils sont dits radioactifs. Les éléments fils formés par désintégration des éléments pères sont dits radiogéniques.

Le temps de demi-vie (ou période radioactive $T_{1/2}$) correspond à la durée écoulée lorsque la moitié de la quantité d'éléments pères est désintégrée. Le nombre d'atomes pères diminue selon une loi exponentielle :

$P = P_0 e^{-\lambda t}$ où P est le nombre d'atomes pères à l'instant t , P_0 le nombre d'atomes pères à l'instant initial, et λ une constante positive.

Les systèmes uranium-plomb (U-Pb) utilisés par Patterson pour une datation de la Terre



Clair Patterson (1922-1995).

L'élément uranium possède deux isotopes radioactifs : l'uranium 235 et l'uranium 238. Chaque isotope se désintègre par étapes successives et est à l'origine de familles radioactives dont le dernier isotope stable est un isotope du plomb. Ainsi, ^{235}U donne ^{207}Pb et ^{238}U donne ^{206}Pb . Les périodes radioactives $T_{1/2}$ sont respectivement de 0,704 Ga et 4,468 Ga. Ces périodes longues en font des systèmes particulièrement bien adaptés à la datation d'objets géologiques très anciens.

En partant des équations de désintégration radioactive (doc. 1) pour chacun de ces deux systèmes, on peut montrer que la valeur du rapport isotopique ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$) radiogénique donne une estimation directe du temps écoulé depuis la fermeture du système (moment où la roche datée n'échange plus de matière avec l'extérieur).

Pour dater un événement précis (comme la formation de la Terre), il faut comparer entre eux différents systèmes (roches). On va alors utiliser l'isotope 204 du plomb, stable, pour normaliser les quantités de ^{207}Pb et ^{206}Pb . Puisqu'il s'agit d'un isotope non radiogénique, sa quantité n'a pas varié depuis la fermeture du système, il peut donc servir de référence.

Météorite de fer

La Terre et les météorites ayant été formées par l'agglomération des particules de la même nébuleuse (nébuleuse solaire), elles ont des compositions et des âges similaires. Deux types de météorites sont utilisés : des météorites ferreuses et des météorites pierreuses.



Courbe isochrone et détermination de l'âge de la Terre par Patterson en 1950

L'isochrone (d'iso : identique et chronos : temps) est une droite reliant les rapports isotopiques de roches d'âge identique. Le coefficient directeur de cette droite donne, après calcul, l'âge de l'ensemble des échantillons (ici, une météorite ferreuse et quatre météorites pierreuses). Patterson estime grâce à cette méthode un âge de formation de la Terre égal à 4,55 Ga.

