

# Histoire de l'âge de la Terre



**La Terre a un âge et cet âge a une histoire peu banale. Calculé à 4000 ans avant J.-C. à la Renaissance, il sera estimé à quelques dizaines de millions d'années à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. Il est maintenant fixé à 4,55 milliards d'années. Comment notre planète a-t-elle pu vieillir de plus de 4 milliards d'années en 400 ans ? La réponse à cette question convoque à peu près tous les savoirs depuis les mathématiques, la physique (dans toutes ses branches), la chimie, l'histoire, la théologie et la philosophie.**

Une fois admis que la Terre avait eu une naissance, la détermination de sa date a été une tâche formidable : quelle horloge pouvait la donner ? Y aurait-il une méthode analogue à la dendrochronologie qui permet, en l'absence de témoignage humain, de dater des arbres millénaires en comptant les cernes de leur tronc ?

## L'âge biblique

Pour Aristote, la Terre a toujours existé, tandis que les grandes religions monothéistes (juive, chrétienne et musulmane) introduisirent une *création* du monde. Notons qu'à la différence de la chronologie moderne, il s'agissait de l'apparition quasi-simultanée de l'Univers, de la Terre, des plantes, des animaux, du genre humain. Pour les savants de la Renaissance, le récit biblique, incontestable, était la seule base de calcul possible. La Bible contient une chronologie détaillée des premières générations : Adam a vécu 930 ans, il enfanta Seth à l'âge de 130 ans, qui engendra Énoch à 105 ans, qui engendra Qénân à 90 ans, etc. Il est alors facile de déduire la date de naissance de Noé : 1 056 ans après la création. Comme Noé avait 600 ans quand arriva le Déluge, ce dernier est daté de 1 656 ans après la Création. Abraham naît 292 années plus tard. Jusque-là, la précision est totale<sup>1</sup>. Ensuite la chronologie est beaucoup plus floue. Il faut alors la raccorder à l'histoire profane, supposée véridique, du règne de Nabuchodonosor II au VI<sup>e</sup> siècle av. J.-C.

Donnons quelques dates de naissance établies sur cette base : 3993 av. J.-C., selon Johannes Kepler (1571-1630),

1. La seule ambiguïté provient du choix de la version de la Bible, *Septante* ou *Vulgate*. La première vieillit le monde de plus de dix siècles.

3998 av. J.-C., selon Isaac Newton (1643-1727), 4004 av. J.-C., selon l'archevêque anglican James Ussher<sup>2</sup>, et plus précisément encore le 23 octobre.

Néanmoins des contradictions vont être repérées dans le texte biblique. Pour De la Peyrère (1596-1676), inventeur des « préadamites », Adam n'était pas le premier homme : comment Dieu pouvait-il demander de tuer Caïn s'il n'y avait que ses parents présents ? Pour le jésuite Martino Martini (1614-1661) envoyé en Chine, une civilisation antédiluvienne avait survécu : il considérait véridique la succession officielle des dynasties impériales chinoises ; elle stipulait que Fohius (Fou hi) avait commencé son règne en 2952 av. J.-C., soit 600 années avant le déluge. D'où sa proposition d'adopter la Bible des Septante. Plus tard, Jean-François Champollion (1790-1832) bien que d'abord salué par le pape comme « sauveur de la chronologie biblique » établira l'antériorité des civilisations égyptiennes sur le déluge.

## Le début des temps modernes

L'idée que les lois de la physique sont universelles, applicables non seulement dans le présent, mais aussi dans le passé et le futur, peut sembler une banalité aujourd'hui. Cela n'allait pas de soi au XVII<sup>e</sup> siècle<sup>3</sup>. René Descartes (1596-1650) a été l'un des initiateurs de cette

2. Le révérend Ussher (1581-1656) est probablement le chronométrier biblique le plus cité parce que sa date fut mentionnée dans les éditions de la Bible anglaise autorisée jusqu'au début du XX<sup>e</sup> siècle.

3. Et encore, à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, Kelvin reprochait à bon nombre de géologues d'ignorer cette universalité en considérant comme valables des théories qui violaient ouvertement les principes de la thermodynamique.

Article proposé par :

Hubert Krivine, hubert.krivine@lptms.u-psud.fr

Laboratoire de physique théorique et modèles statistiques, UMR 8626, CNRS / Univ. Paris-Sud, Orsay  
Laboratoire physique nucléaire et hautes énergies, UMR 7585, CNRS / UPMC, Paris



idée. Pour lui, l'intervention de Dieu se borne à la Création ; les lois de la physique gouvernent ensuite le développement des vallées, des rivières et des montagnes. On lit dans les *Pensées* de Blaise Pascal (1623-1662) un bon résumé de cette philosophie :

*Je ne puis pardonner à Descartes ; il aurait bien voulu dans sa philosophie, se pouvoir passer de Dieu ; mais il n'a pu s'empêcher de lui faire donner une chiquenaude, pour mettre le monde en mouvement ; après cela, il n'a plus que faire de Dieu.*

Le XVIII<sup>e</sup> siècle voit s'ébaucher des idées qui vont – presque<sup>4</sup> – toutes se développer par la suite. Citons :

- 1. Les temps de stratification et d'érosion.
- 2. Les temps de refroidissement extrapolés à la Terre.
- 3. La teneur en sel des océans.
- 4. L'évolution de la distance Terre-Lune.

## Les temps de stratification et d'érosion

Depuis la seconde moitié du XVII<sup>e</sup> siècle, la stratigraphie (étude des dépôts successifs de matériaux) est une discipline qui a connu un développement notable. Mais si elle permettait (presque) à coup sûr de conclure à la simultanéité ou à l'antériorité d'événements, elle restait beaucoup plus floue pour livrer des chiffres, et plus encore pour fournir des dates absolues. Voilà pourquoi pendant longtemps les sociétés savantes refusèrent les communications prétendant dater la Terre, comme elles refusaient celles qui traitaient de la langue primitive : ces problèmes semblaient hors d'atteinte de la connaissance rationnelle. La datation par stratigraphie reposait sur les suppositions hasardeuses de la règle de trois : s'il faut cent ans pour déposer un millimètre d'argile et si la couche mesure un mètre, alors le temps de dépôt est de 100 000 ans. Les temps d'érosion, de creusement de vallées ou de canyons ont été étudiés avec cette même méthode. On peut considérer le Danois Niels Stensen (1638-1686), convaincu de la nature biologique des fossiles – ce qui n'était pas évident à l'époque –, comme l'un des pères fondateurs de la stratigraphie. Il faut néanmoins constater qu'il n'en a tiré aucune conclusion sur l'échelle des temps et resta fidèle à l'âge biblique.

Benoist de Maillet (1656-1738) fut un précurseur de Buffon, un peu comme Giordano Bruno (1548-1600) fut celui de Galilée (1564-1642). C'était un excentrique, grand admirateur de Cyrano de Bergerac. Pour lui, toute la terre a émergé de la mer. Il extrapole la vitesse de retrait de la mer, notamment à partir d'anciens ports alors dans les terres, et aboutit à un âge de deux milliards d'années. Craignant les foudres de l'Église, il prend la triple

précaution de n'écrire que sous un pseudonyme (Telliamed, anagramme de de Maillet), de faire en sorte de n'être publié que dix ans après sa mort et, qui plus est, aux Pays-Bas. Avec le même enthousiasme, il accumule les preuves de l'existence contemporaine d'hommes (et de femmes) poissons, enracinant ainsi son hypothèse que tout vient de la mer. Pour fantaisistes qu'ils puissent nous paraître par certains aspects, ces travaux furent utilisés par Buffon et Cuvier.

Georges Louis Leclerc, (comte de) Buffon (1707-1788) s'intéressa aussi 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 quelques millions d'années à près de trois milliards. Prudemment, il ne publia pas ces résultats, préférant « être plat que pendu ».

Au XIX<sup>e</sup> siècle, notamment grâce à Georges Cuvier (1769-1832) et William Smith (1769-1839) qui eurent l'idée de dater les couches géologiques par les fossiles qu'elles contenaient, la stratigraphie constitua la principale source de renseignement sur l'histoire de la Terre. Elle permettait de comparer des âges, mais pour donner un âge absolu<sup>5</sup>, elle resta toujours dépendante de l'estimation des temps d'érosion et de déposition.

## Les temps de refroidissement

Buffon peut être considéré comme le père de la datation scientifique. En effet, il propose à la fois des modèles théoriques et les mesures expérimentales afférentes. On a évoqué son modèle de sédimentation, mais il en utilise aussi un autre : la Terre actuelle serait le résultat du refroidissement d'une planète composée initialement de roches en fusion. Son hypothèse est celle d'une sphère incandescente (ce qui définit le temps 0) qui se refroidit. On peut à partir de là conduire une expérience. Dans ses forges de Montbard, il chauffe au rouge des sphères de rayons différents et composées de matériaux variés, puis en mesure les temps de refroidissement jusqu'à la température ambiante. Il extrapole ses résultats à une sphère aux dimensions terrestres. Mais il ne dispose d'aucune théorie pour le faire et son extrapolation – linéaire – menée à partir de boulets de dimensions comprises entre 1/2 pouce et 5 pouces, jusqu'au rayon terrestre de 6 400 km, est fautive.

Arrive alors le « secours » de la théorie en la personne de William Thomson (1824-1907) qui deviendra Lord Kelvin. En s'appuyant sur l'équation de la chaleur<sup>6</sup>, il donne d'abord une fourchette de 20-400 millions d'années en 1862, puis la réduit à 20-40 millions en 1897.

Kelvin part du même modèle que Buffon : ce qu'il appelle « début de la Terre » (conditions initiales) est une boule à la température uniforme de la roche en fusion,

4. Par exemple, la méthode fondée sur la multiplication de la population humaine depuis l'Arche de Noé resta sans lendemain. Sachant qu'après le Déluge il ne restait qu'un couple d'humains et supposant un taux de croissance donné, un petit calcul donne le temps nécessaire pour obtenir la population actuelle.

5. On voit 17 âges proposés entre 1860 et 1909, qui s'échelonnent entre 3 et 1 526 millions d'années.

6. Due à Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830). Ce dernier avait déjà songé à l'utiliser pour dater la Terre, mais n'avait pas persévéré.



Encadré 1

Équation de la chaleur

L'équation de la chaleur donne l'évolution de la température  $T$  d'un corps en fonction du temps  $t$  :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \Delta T,$$

où  $\kappa$  désigne le rapport de la conductivité thermique à la chaleur spécifique du corps, et  $\Delta$  l'opérateur laplacien. Pour intégrer cette équation différentielle on se donne les conditions initiales de la Terre : une sphère à température uniforme  $T_0$  et on impose les conditions aux limites (température constante, compatible avec la vie à sa surface).

En fait, le gradient de température est tel que la température limite de  $T_0 = 3\,900\text{ °C}$  est pratiquement atteinte en moins de 200 kilomètres. La zone où la température varie sensiblement serait donc, dans ce modèle, petite par rapport au rayon de la Terre, si bien qu'on peut se ramener à un calcul à une dimension, ce qu'a fait Kelvin qui a trouvé :

$$T(z,t) = \frac{2T_0}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{z}{2\sqrt{t\kappa}}} e^{-x^2} dx,$$

puis le gradient :

$$\left. \frac{dT}{dz} \right|_{z=0} = \frac{T_0}{\sqrt{t\kappa\pi}}.$$

Dans son article, il a pris un gradient de  $0,36\text{ °C}$  par 100 mètres ( $1^\circ F$  par 50 pieds)<sup>1</sup>, une température initiale de  $3\,900\text{ °C}$ , un  $\kappa \simeq 1,2 \times 10^{-6} m^2 s^{-1}$ , ce qui donne, compte tenu des incertitudes sur ces données, la fourchette  $20 < t < 400$  millions d'années.

1. Ce taux de progression n'est valable qu'au voisinage de la surface ; il décroît ensuite.

évaluée à  $3\,900\text{ °C}$ . Très rapidement la température de sa surface, en contact avec le vide extérieur (ce qu'on appelle les conditions aux limites), se stabilise à un niveau raisonnable, de l'ordre de  $20\text{ °C}$ . On le sait parce que la vie s'est développée depuis fort longtemps et exige une température stable de ce niveau. Au centre de la Terre par contre, la température, par inertie thermique, conserve *grosso modo* sa valeur initiale. Donc, entre la surface de la Terre et son intérieur, il y aura un continuum de température qui va de  $20\text{ °C}$  à  $3\,900\text{ °C}$ . On constate aujourd'hui que lorsqu'on s'enfonce sous la Terre on gagne en moyenne de l'ordre de  $3\text{ °C}$  tous les 100 mètres<sup>7</sup>. À la naissance de la Terre, ce gradient était beaucoup plus élevé, presque infini : on passait très rapidement – c'est-à-dire sur une très courte distance – de la température (basse) de surface à la température (élevée) du cœur ; puis le froid, petit à petit, gagne les profondeurs et le gradient diminue, pour atteindre sa valeur actuelle. La façon dont ce gradient diminue avec le temps peut être déterminée théoriquement grâce à l'équation de Fourier : si on connaît les conditions initiales et les conditions aux limites, on en déduit le temps nécessaire pour faire baisser le gradient de température jusqu'à sa valeur actuelle. L'utilisation de l'équation de Fourier ne demande que la connaissance de la constante  $\kappa$  définie dans l'encadré 1.

Pour être complet il faut ajouter que cette équation ne fournit l'évolution de la température *que si on suppose la Terre rigide*, c'est-à-dire sans transport possible de matériaux internes. Kelvin pensait avoir démontré la validité de cette hypothèse par des considérations astronomiques.

7. C'est le gradient à la surface de la Terre ; il diminue avec la profondeur.

En tenant compte des incertitudes sur les conditions initiales, sur les conditions aux limites et sur  $\kappa$ , Kelvin aboutit en 1863 à la fourchette 20-400 millions d'années. Il faut comprendre pourquoi cette affirmation a été prise pour parole d'Évangile : la validité de l'équation de Fourier, toujours testée avec succès, semble impossible à mettre en défaut ; elle avait presque la même autorité que la loi de la gravitation.

Pour diminuer sa fourchette et en vérifier la cohérence, Kelvin calcula l'âge du Soleil, nécessairement plus vieux que notre planète. D'abord, il lui fallait comprendre le mécanisme de combustion du Soleil. On savait qu'il ne pouvait s'agir d'une réaction chimique : un soleil brûlant du carbone, par exemple, durerait quelques milliers d'années seulement. Kelvin attribua l'énergie du soleil à la seule source possible connue à cette époque : l'énergie potentielle perdue par l'auto-effondrement du Soleil dû à la gravitation et se transformant en chaleur. Il obtint un âge du Soleil « probablement inférieur à 100 millions d'années ». Notons cependant sa remarque « unless sources now unknown to us are prepared » bien vite oubliée.

Comme la Terre doit être plus jeune que le Soleil, on avait là une limite supérieure de son âge. D'autres études sur la croûte terrestre conduisirent à restreindre encore la fourchette primitive à 20-40 millions d'années, ce que Richet appelle joliment « le garrot de Kelvin ».

Il faut remarquer l'intuition de Thomas Chrowder Chamberlin (1843-1928) qui écrivait, quatre ans avant qu'on eût compris le rôle de la radioactivité :

*Les connaissances actuelles du comportement de la matière dans des conditions aussi extraordinaires que celles qui existent à l'intérieur du soleil sont-elles assez exhaustives pour garantir l'affirmation selon laquelle il n'y aurait pas à cet endroit de sources de chaleur inconnues ?*



## La salinité des océans

Edmund Halley (l'homme de la comète, 1656-1742) explique que la salinité de la mer a été apportée par l'eau douce des rivières. Ce n'est pas un paradoxe. L'eau réputée 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. À l'appui de cette thèse, les lacs qui ont un déversoir ne sont pas salés, mais le deviennent dès qu'ils sont isolés. Ainsi, en estimant la quantité de sels des océans et le débit total des fleuves (en tonnes de sel par année), on peut déduire le temps nécessaire à leur apport.

Halley n'a pas donné d'estimation, mais pensait que son modèle prouverait que la Terre était beaucoup plus vieille qu'on ne le croyait. Plus d'un siècle plus tard, cette idée fut, indépendamment, exploitée par John Joly (1857-1933). Il estime la masse de sodium contenu dans les océans à  $1,41 \times 10^{16}$  tonnes, le taux de déposition annuel par les rivières à  $1,57 \times 10^8$  tonnes/année ; le quotient des deux donne un ordre de grandeur pour estimer l'âge de la formation des océans, soit 90 millions d'années. Celui de la Terre est évidemment supérieur. Ce modèle d'apport de sodium par les seules rivières et sans perte est très simple mais erroné : il y a des processus de perte de sels (vents, dépositions) d'où 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<sup>e</sup> siècle.

## La distance Terre-Lune

La Lune, initialement issue de la Terre, s'en écarte. Disposant d'un modèle de l'évolution de la distance Terre-Lune, en remontant le temps, on peut avoir une idée de la date de la séparation et, partant, une estimation d'un âge minimum de la Terre. L'astronome Georges Darwin (1845-1912), fils de Charles, s'est attelé à cet épineux problème. Il a obtenu un âge de 56 millions d'années, confortant le point de vue de Kelvin.

## La polémique Kelvin-Darwin

Certainement un des plus grands physiciens de son temps, Kelvin jouissait d'une autorité immense ; de plus son évaluation semblait confirmée, comme nous l'avons vu, par d'autres méthodes indépendantes. Aussi les temps – relativement – courts des physiciens vont être finalement acceptés par la communauté scientifique dans la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle : après tout, une Terre chaude pouvait avoir accéléré les processus physico-chimiques. Mais Charles Darwin (1809-1882) n'y croyait pas. Des couches géologiques dont tout le monde s'accorde à dire que leur sédimentation a réclamé à coup sûr plusieurs dizaines de

millions d'années ne contiennent en général pas de variations significatives dans l'évolution des fossiles qu'elles ont emprisonnés. Or ces variations significatives doivent – suivant la théorie de l'évolution des espèces de Darwin – avoir eu lieu. La seule conclusion est alors d'affirmer que cette échelle de plusieurs dizaines de millions d'années est infime devant les temps nécessaires pour rendre compte de l'évolution réelle de la faune et de la flore. Darwin ne donnait pas de chiffres, mais pensait plutôt en milliards d'années. Pour ne pas nier l'universalité des lois de la physique, ce que Kelvin pouvait lui reprocher, il suggéra, sans grande conviction, que le Soleil pourrait transférer de l'énergie magnétique qui chaufferait la Terre.

Cet antagonisme entre Darwin et Kelvin fut abondamment utilisé par tous les adversaires de Darwin. Ce n'était pas tant les datations de Darwin qu'il s'agissait de ruiner (celles de Kelvin, bien que plus courtes, n'étaient pas non plus compatibles avec une lecture littérale de la Bible) que sa théorie de l'évolution considérée comme une abomination : elle faisait, disait-on, descendre l'homme du singe !

## La radioactivité

La découverte de la radioactivité, à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, généra un sous-produit totalement inattendu : une horloge capable de donner un âge absolu à la Terre, âge aujourd'hui fixé à 4,55 milliards d'années. Mieux encore, elle expliquera comment ce phénomène nouveau invalidait les calculs des physiciens du siècle précédent. Le « vast amount of time » de Darwin y gagne sa pleine accréditation scientifique.

## L'horloge absolue

En 1902, Ernest Rutherford (1871-1937) et Frederick Soddy (1877-1956) établissent la notion de période d'un élément radioactif. Pour caractériser la radioactivité d'un élément, ils en mesurent l'activité, c'est-à-dire le nombre de désintégrations qu'il subit par unité de temps. Ils s'aperçoivent que le temps qu'il faut pour que l'activité d'un élément radioactif diminue de moitié est une constante qui ne dépend que du noyau étudié. Ce temps, appelé période  $T$  de l'élément radioactif, est caractéristique parce qu'il ne dépend pas non plus de la quantité initiale de noyaux radioactifs : à chaque intervalle de temps  $T$ , la quantité de noyaux radioactifs restante est divisée par deux. Il en résulte que la radioactivité est exponentiellement décroissante. C'est cette régularité qui fait de la radioactivité une horloge utilisable. On doit à Rutherford d'avoir exploité cette loi de décroissance pour la datation des roches. Il a d'abord utilisé la quantité d'hélium dégagée par la désintégration radioactive de l'uranium et obtenu une estimation de 497 millions d'années, qu'il savait sous-estimée puisqu'une grande quantité d'hélium s'était certainement échappée de la roche.





## Encadré 2

## La radioactivité comme horloge

Si  $N_0$  est le nombre de noyaux radioactifs présents au temps initial et  $N(t)$  leur nombre actuel à l'instant  $t$ , de la loi de décroissance radioactive  $N(t) = N_0 \exp(-\lambda t)$ , on déduit :

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{N_0}{N(t)}.$$

En fait, sauf dans une situation exceptionnelle, on ne connaît pas  $N_0$ . Plusieurs méthodes permettent de s'en affranchir. Dans le cas le plus simple, le nombre de noyaux fils  $N_f(0)$  est nul au moment de la fermeture de la roche, et donc à l'instant  $t$  il est exactement égal au nombre de noyaux désintégrés, soit :

$$N_f(t) = N_0 - N(t) = N(t) (e^{\lambda t} - 1), \quad (1)$$

d'où :

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left( \frac{N_f(t)}{N(t)} + 1 \right).$$

Si  $N_f(0)$  n'est pas nul, il faut employer la méthode des isochrones que nous illustrerons sur l'exemple de la désintégration  $^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr}$ . L'équation (1) s'écrit maintenant :

$$^{87}\text{Sr}(t) = ^{87}\text{Sr}(0) + ^{87}\text{Rb}(t)(e^{\lambda t} - 1). \quad (2)$$

On utilise l'isotope  $^{86}\text{Sr}$  non radiogénique et non radioactif également présent dans l'échantillon comme témoin chimique pour lequel  $^{86}\text{Sr}(t) = ^{86}\text{Sr}(0)$  ; en effet, comme ses propriétés chimiques sont identiques à celles du  $^{87}\text{Sr}$ , tous les échantillons issus d'un même magma auront le même rapport isotopique initial  $^{87}\text{Sr}(0)/^{86}\text{Sr}(0)$ . La conservation de l'isotope 86 ( $^{86}\text{Sr}(t) = ^{86}\text{Sr}(0)$ ) permet alors de déduire l'âge des échantillons à partir de la réécriture de l'équation (2) qui peut prendre la forme :  $y = b + ax$ , avec

$$y = \frac{^{87}\text{Sr}(t)}{^{86}\text{Sr}(t)}, \quad b = \frac{^{87}\text{Sr}(0)}{^{86}\text{Sr}(0)}, \quad x = \frac{^{87}\text{Rb}(t)}{^{86}\text{Sr}(t)}$$

et  $a = e^{\lambda t} - 1$ . On doit alors tout d'abord vérifier que tous les points  $(x, y)$  obtenus à partir d'échantillons supposés provenir du même magma sont bien alignés (cohérence de la méthode) ; la pente de la droite donne alors  $a$  et donc  $t$ . Ajoutons que les mesures de quotient de concentrations d'isotopes sont aussi bien plus précises que les mesures de quantités absolues.

En 1905, Bertram Borden Boltwood (1870-1927) comprit qu'en plus de l'hélium, la désintégration de l'uranium produit du plomb. En effet, en se servant des âges géologiques des roches, il constata que le rapport Pb/U est d'autant plus élevé que la roche est vieille. Aussi proposa-t-il une méthode plus fiable en mesurant le plomb comme élément final (et non volatil) de la désintégration de l'uranium. Avec cette méthode, Boltwood obtint en 1907 une fourchette d'âge comprise entre 410 millions et 2,2 milliards d'années<sup>8</sup>.

Finalement, les travaux de Clair Patterson (1922-1995) vont beaucoup affiner les résultats. Il comprend que les plus vieilles roches accessibles, par définition situées à la surface de la Terre, ne peuvent fournir que l'âge de la croûte terrestre consolidée : en permanence, cette croûte se renouvelle par les mouvements de subduction (enfouissement d'une plaque tectonique sous une autre) et à travers les fractures volcaniques. La croûte dite océanique est effectivement recyclée par les courants de convection du manteau terrestre. La croûte continentale est moins dense que sa cousine océanique et n'est pas vraiment recyclée. Plusieurs grandes structures géologiques appelées cratons existent ainsi à la surface de la Terre, dont l'âge excède les 3 milliards d'années (au Canada, en Afrique du

Sud, en Australie par exemple). L'âge de ces provinces est à comparer aux 180 millions d'années de la plus vieille croûte océanique actuelle, à l'Ouest de la plaque Pacifique, et sur le point de plonger pour être recyclée. On ne connaît pas le calendrier exact de l'extraction de la croûte continentale faisant suite à l'accrétion de la Terre primitive, et la différenciation chimique qu'elle a induite.

Où trouver alors des échantillons réellement primitifs ? Et primitifs par rapport à quoi ? La réponse est que ces échantillons se trouvent dans les météorites. En effet Le Soleil, la Terre et le système planétaire sont nés presque simultanément. Les modèles d'accrétion qui expliqueraient la formation de la Terre sont encore discutés, mais tous donnent des durées de formation de l'ordre de quelques dizaines de millions d'années. De toute façon, la définition de l'acte de naissance de la Terre garde aussi une imprécision de cet ordre.

Actuellement, la datation s'estime généralement en utilisant plusieurs chaînes de désintégration : potassium-argon, thorium-plomb, uranium-plomb, rubidium-strontium. Dans la plupart des cas, on peut tester la cohérence interne du modèle en vérifiant que des résultats de mesure se retrouvent sur une courbe théorique (voir l'encadré 2).

### L'invalidation des hypothèses de Kelvin

La désintégration des minerais radioactifs contenus dans la Terre est une source de chaleur : son existence invalide l'hypothèse de Kelvin d'une Terre se refroidissant

8. Un problème est alors apparu : dans les années 1930, les astronomes dataient, quant à eux, les « débuts » de l'Univers à 2 milliards d'années. C'était l'âge estimé à partir d'une estimation erronée du taux d'expansion de l'Univers par Hubble. Cet âge sera revu pour aboutir aux 13,7 milliards d'années du Big-Bang.



## Encadré 3

## L'objection de Perry

Il faut mentionner l'objection qu'avait finalement osé formuler en 1895 John Perry (1850-1920) disciple de Kelvin. Sans introduire de façon complète la convection, il avait supposé que la conduction n'opérait que sur une épaisseur de surface de 100 km, et qu'à l'intérieur régnait une haute « quasi-conductivité ». La *figureE1* montre comment les deux théories, utilisant les mêmes données expérimentales, c'est-à-dire le même gradient de température, fournissent des âges totalement différents. La fonction  $T(z)$  est schématisée au bout de  $t = 0$ , puis 20 millions et 2 milliards d'années selon la théorie de Kelvin et celle de Perry.  $T_0$  est la température initiale. La zone en grisé représente la croûte terrestre et la flèche à l'origine, le gradient de température moyen mesuré en surface.

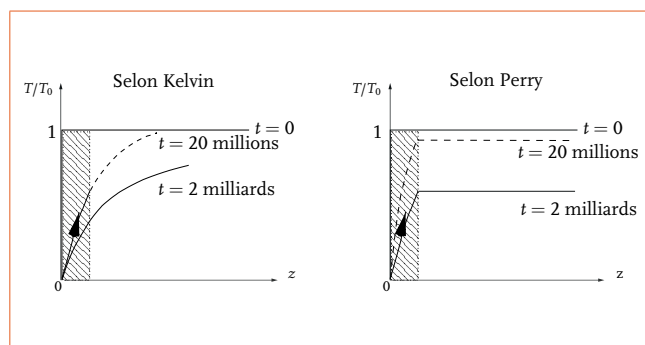


Figure E1 – Courbes schématiques de température de la Terre  $T/T_0$  en fonction de la profondeur  $z$ .

en permanence (encore Joly, en 1903). Historiquement ce sera le premier coup de boutoir porté à la théorie de Kelvin<sup>9</sup>. De même l'effondrement gravitationnel du Soleil est à l'origine de la réaction thermonucléaire qui est responsable de sa production de chaleur. Mais on sait maintenant que l'erreur la plus importante était l'hypothèse de rigidité de la Terre (voir *encadré 3*). En fait, sur des durées géologiques, il y a transport de matériaux dans le manteau terrestre et le refroidissement par convection n'obéit pas à l'équation de la chaleur. Il homogénéise beaucoup plus efficacement la température que le refroidissement par conduction.

## Conclusion

Après tant de variations, peut-on considérer l'âge de la Terre comme stabilisé ? Comme toute vérité scientifique, il pourrait être invalidé par la remise en cause des hypothèses faites, à savoir :

- les périodes des éléments radioactifs n'ont pas varié dans le temps,
- les modèles de formation du système solaire sont fiables en ce qui concerne les durées.

Manifestement, il s'agit d'hypothèses très fortes – qui ne sont pas spécifiques à cette question. Aussi fortes que celles qui fondent la dendrochronologie (datation des arbres par les cernes).

Cette détermination de l'âge de la Terre est exemplaire du tournant opéré dans le monde savant. Pour Ussher ou Newton, la réponse se trouvait dans la Bible, source divine

de vérité. Les données empiriques n'étaient pas extraites du terrain, mais du Livre Saint. Aucune confrontation à des résultats expérimentaux n'était envisagée. Il s'agissait d'une démarche souvent savante et même très savante, mais encore scolastique<sup>10</sup>, c'est-à-dire *fondée sur des textes*, en ce qui concerne la datation. Même s'il a fait mine d'accepter le déluge biblique, Buffon a, l'un des premiers, rompu avec cette logique. Il a proposé des théories, des expériences correspondantes et des mesures.

Cet âge de 4,55 milliards d'années n'est pas un simple nombre de plus dans la série des âges, qui ne concernerait que les astrophysiciens ou les géologues ; seule cette échelle de temps rend intelligibles, sans besoin de « dessin intelligent », l'établissement de l'ordre du système solaire (le passage du tohu-bohu initial à ce merveilleux ordre des planètes) et la complexité fantastique du vivant (à partir des premières cellules il y a plus de trois milliards d'années).

### POUR EN SAVOIR PLUS

- C.J. Allègre, « The age of the earth », *Geochim. Cosmochim. Acta*, **59**, 1445-1456 (1995).
- P.W. Jackson, « The Chronologer's Quest », Cambridge (2006).
- H. Krivine, « La Terre, des mythes au savoir », *Cassini* (2011).
- P. Richet, « L'âge du monde », *Seuil* (1999).
- J. Treiner, « Quel est l'âge de la Terre ? », *Le Pommier* (2011).

Jacques Treiner a contribué aux travaux présentés dans cet article.

9. Sur les 44 térawatts de puissance évacuée actuellement par la Terre vers l'espace, on évalue à sensiblement 24 térawatts ce qui est dû à la radioactivité.

10. On doit pourtant à Newton d'avoir fourni les meilleures armes contre le rabâchage *ad nauseam* d'Aristote.