

L'origine de l'énergie du Soleil

Kamil Fadel, responsable du département de physique au Palais de la Découverte

Qu'est-ce qui fait briller le Soleil ? Voilà une énigme qui a donné du fil à retordre à plusieurs générations de scientifiques et a fait l'objet de violentes controverses issues d'un débat parallèle et très animé relatif à l'âge de la Terre où physiciens, géologues, paléontologues, biologistes... avaient chacun leur mot à dire et leurs arguments à avancer, mais où aucun consensus ne semblait possible. Dans ce premier volet nous effectuons un survol de cette histoire de Newton à la fin du XIX^e siècle.

De Newton à la constante solaire

Isaac Newton (1642-1727) est, semble-t-il, l'un des premiers à se demander comment les étoiles font pour briller « éternellement ». Les étoiles de manière générale et non le Soleil uniquement, puisque Newton partageait l'avis du philosophe italien Giordano Bruno (1548-1600) qui au XVI^e siècle avait émis l'idée que le Soleil n'était sans doute qu'une étoile parmi toutes celles qui peuplent le ciel, à cela près que celles-ci étaient « infiniment » plus éloignées de nous que ne l'était le Soleil.

Pour répondre à la question posée par Newton, il était indispensable de connaître au moins une chose : l'énergie libérée par le Soleil par unité de temps. Newton tente lui-même une première appréciation de cette quantité en comparant les températures affichées par deux thermomètres, l'un placé au soleil, l'autre à l'ombre. Très peu de mesures sont effectuées durant le XVIII^e siècle. Pierre Bouguer (1698-1758) dans les années 1720 et William Hyde Wollaston (1766-1828) en 1799 obtiennent des résultats, trop imprécis cependant, car la méthode mise en œuvre alors est très rudimentaire : elle consiste à comparer visuellement l'éclat d'une flamme de bougie à celui du Soleil au méridien. C'est à Claude Pouillet (1790-1868),

directeur du Conservatoire nationale des arts et métiers en 1831 que revient le mérite d'avoir su mesurer cette énergie avec une méthode fiable. Il emploie un pyrhéliomètre, appareil dont il est l'inventeur. À l'aide de cet instrument, il concentre la lumière solaire pour échauffer une masse



Fig. 1. — Pyrhéliomètre de Pouillet.

d'eau, puis en déduit le flux de chaleur solaire en

notant l'évolution de la température de l'eau au cours du temps. Après plusieurs années de mesures il arrive à la conclusion que ce flux dépend de deux facteurs, l'un variable d'un jour à l'autre, lié à la pureté de l'atmosphère, l'autre constant, qu'il baptise constante solaire. Pour ce travail, Pouillet s'appuie sur la formule suivante donnée par Bouguer :

$$Q = A a^\varepsilon$$

Q est la quantité de chaleur reçue au sol ; a est la « constante » atmosphérique ; A est la constante solaire : elle représente Q à la limite supérieure de l'atmosphère, là où l'épaisseur ε de celle-ci peut être considérée comme nulle.

Pouillet publie ses résultats en 1838 : il indique $A = 1,7633 \text{ cal/min/cm}^2$ soit 1228 W/m^2 , une puissance inférieure de 10 % seulement à la valeur moderne ($1,96 \text{ cal/min/cm}^2$ ou 1367 W/m^2). Il note alors que la quantité de chaleur qui atteint la Terre en un an aux limites de l'atmosphère permettrait de faire fondre une couche de glace d'environ 32 mètres d'épaisseur enveloppant la Terre ! La même année, John Herschel (1792-1871), dont le père William avait découvert Uranus (1781) et le rayonnement infrarouge (1800), aboutit à un résultat très proche de celui de Pouillet en employant un actinomètre de son invention.

La concordance des valeurs trouvées par Herschel et Pouillet est rassurante, mais cela ne dure pas longtemps, car on commence à remarquer que les cas où la formule de Bouguer s'applique sont finalement très rares. En effet, d'une journée à une autre, également belles, le calcul fournissait pour A des valeurs différentes. Cela conduit le physicien Jules Violle (1841-1923) à adopter une formule dans laquelle il remplace ε par une expression plus complexe qui faisait intervenir plusieurs paramètres dont la pression barométrique, le degré d'humidité

de l'air... Les mesures effectuées à l'aide de cette nouvelle formule donnent $A = 2,540 \text{ cal/min/cm}^2$, soit 30% plus élevée que la valeur admise de nos jours. Même si cette valeur était près d'une fois et demie supérieure à celle trouvée par Herschel et Pouillet, cela n'avait pas d'importance, car l'ordre de grandeur était le même. Connaissant le rayon de l'orbite terrestre, cela permettait d'estimer la puissance rayonnée par le Soleil : de l'ordre de 10^{26} cal/s , soit environ 10^{26} W .

Par ailleurs, la détermination de la valeur de la constante solaire - même approximative - allait permettre d'évaluer la température du Soleil. Du moins, c'est ce que l'on espérait. En effet, Pierre Dulong (1785-1838) et Alexis Petit (1791-1820) avaient montré en 1817 que la loi de Newton stipulant que la quantité de chaleur rayonnée par un corps était directement proportionnelle à sa température sous-estimait considérablement cette quantité. En s'appuyant sur de nombreux résultats expérimentaux, ils avaient proposé une nouvelle loi dont la validité n'était toutefois admissible, selon eux, qu'en dessous de $300 \text{ }^\circ\text{C}$ ¹. Malgré tout, par extrapolation de la loi d'émission de Dulong et Petit aux hautes températures, Pouillet et Violle estiment que la température de la surface solaire doit être située aux alentours de $1\,500 \text{ }^\circ\text{C}$. Pouillet note d'ailleurs que cette valeur est très proche de la température de fusion du fer ($1\,535 \text{ }^\circ\text{C}$). Ce point est intéressant, car jusqu'aux années 1920 on pensait généralement - comme le philosophe Anaxagore d'ailleurs - que le Soleil était essentiellement composé de fer en fusion.

La connaissance de la prodigieuse énergie rayonnée par le Soleil était un grand progrès par rapport à l'époque où Newton avait soulevé la question. Cent-cinquante ans s'étaient écoulés et l'on disposait au milieu du XIX^e siècle d'une donnée grâce à laquelle on allait pouvoir rejeter des théories et en bâtir d'autres.

Tentatives pour expliquer l'origine de l'énergie solaire

Compte tenu de l'importance de l'émission de chaleur par le Soleil, il devenait clair que celui-ci ne pouvait plus être assimilé - comme le pensaient certains - à une énorme masse chaude en train de se

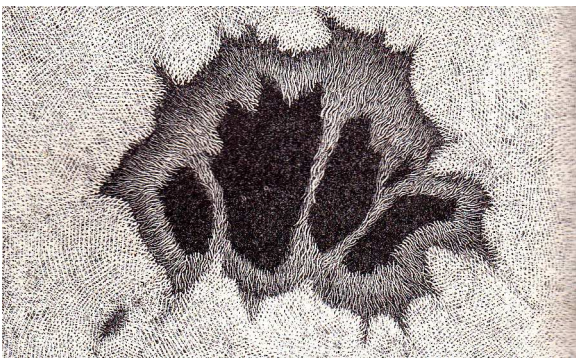
refroidir passivement. En effet, en raison des 10^{26} joules émis chaque seconde, il aurait subi en quelques milliers d'années un important refroidissement qui ne serait pas passé inaperçu. Il fallait donc raisonnablement écarter cette idée. Autre hypothèse que l'on avait avancée et qu'il fallait aussi écarter : ne se pourrait-il pas que la surface du Soleil frotte contre un frein extérieur ? Connaissant la masse et la vitesse de rotation du Soleil sur lui-même (environ 25 jours) on calcule son énergie cinétique et on montre qu'elle correspond à l'énergie que le Soleil rayonnerait en 125 ans seulement. Cette hypothèse ne tenait donc pas non plus la route. Il fallait trouver autre chose...

Robert Mayer et John James Waterstone

Le médecin allemand Julius Robert Mayer (1814-1878), connu pour avoir le premier énoncé que le travail mécanique peut se convertir en chaleur (1842), note que la quantité de chaleur dégagée en une heure par un centimètre carré de la surface solaire est de l'ordre de celle que libère la combustion d'une tonne de charbon ! Il en conclut que même si le Soleil était entièrement constitué de charbon brûlant dans du dioxygène pur, il se consumerait en 5 000 ans environ. Or, non seulement l'histoire ne révélait aucun témoignage relatif à une quelconque baisse de l'activité solaire, mais de plus on estimait que le Soleil était bien plus âgé que cela. Mayer est ainsi en mesure d'affirmer que le Soleil ne tire pas son énergie de réactions chimiques : aucune ne pourrait rendre compte à la fois de la longévité du Soleil et du taux auquel il rayonne de l'énergie. Le médecin allemand est alors amené à penser que le Soleil se renouvelle perpétuellement... mais comment ? Mayer croit trouver la solution de l'énigme en s'inspirant d'une idée avancée par l'auteur de l'Histoire naturelle, Georges-Louis Leclerc Comte de Buffon (1707-1788). Ce dernier croyait que les comètes sont des réservoirs de chaleur qui se vident sur le Soleil. Kepler n'avait-il pas dit « il y a davantage de comètes dans les cieux qu'il n'y a de poissons dans les océans » ? Pour Mayer qui avait déterminé l'équivalent mécanique de l'unité de chaleur et avait énoncé le principe de conservation de l'énergie, l'idée de Buffon était séduisante : traduite en langage moderne, elle signifiait qu'en tombant sur le Soleil l'énergie cinétique des comètes se transformait en chaleur, la chute d'une certaine quantité de matière délivrant au Soleil une énergie des milliers de fois supérieure à celle provenant de la combustion d'une masse équivalente de

¹ La relation donnant l'énergie rayonnée par unité de temps en fonction de la température, connue sous le nom de la loi de Stefan ne sera mise en évidence qu'en 1879. Pour aboutir à cette loi, Joseph Stefan (1835-1893) s'appuie d'ailleurs sur les résultats expérimentaux de Dulong et Petit.

charbon² ! Ce mécanisme, proposé par Mayer en 1846, était donc remarquablement efficace, d'autant qu'outre les comètes, il y avait les astéroïdes, les météorites, et sans doute beaucoup d'autres petits objets et corpuscules. En somme, pour Mayer le moteur solaire était la gravitation, et c'était finalement l'énergie gravitationnelle - potentielle dirions-nous aujourd'hui³ - qui se convertissait en chaleur. Par ailleurs, cette théorie permettait de rendre compte de manière simple de l'existence des taches solaires, lesquelles, pensait Mayer, correspondent aux points d'impact des gros bolides cosmiques. Bien que séduisante, cette théorie n'est que tièdement accueillie et Mayer est ainsi obligé de publier à compte d'auteur une version plus complète de son mémoire paru dans les Comptes rendus de l'Académie des sciences. En 1848 il souffre des troubles politiques et perd deux de ses enfants, puis des querelles de priorités au sujet du premier principe de la thermodynamique l'opposent à James Prescott Joule (1818-1889)... Déprimé, Mayer finit par se défenestrer du troisième étage en 1850 : il reste estropié jusqu'à la fin de sa vie et disparaît de la scène scientifique durant 10 ans, jusqu'à ce que William Thomson (1824-1907) - futur Lord Kelvin (1882) - reconnaisse la pertinence de sa thèse.



Ces taches solaires (Nasmyth XIX^e) étaient pour Mayer des points d'impacts de comètes chutant sur le Soleil.

En réalité, indépendamment de Mayer, l'hydrographe écossais John James Waterstone (1811-1883)⁴ était arrivé en 1845 à la même

² En effet l'énergie cinétique d'un kilogramme de matière tombant de l'infini sur le Soleil est de l'ordre de 10^{11} J et la combustion d'un kilogramme de charbon libre de l'ordre de 10^7 J

³ La notion d'énergie potentielle n'avait pas encore été introduite en physique : elle apparaît en 1853 sous la plume de William Rankine (1820-1872).

⁴ Waterston est connu comme le précurseur de J. C. Maxwell dans l'élaboration de la théorie cinétique des gaz. Malheureusement, ses travaux qui datent de 1845 n'ont pas retenu l'attention de la Royal Society qui les jugea inintéressants.

conclusion que le médecin allemand : l'énergie chimique étant insuffisante pour entretenir l'activité du Soleil, ce dernier doit nécessairement s'alimenter en énergie gravitationnelle. Toutefois, selon Waterstone, l'énergie gravitationnelle peut se transformer en chaleur de deux manières différentes : par la chute de corps étrangers comme le suppose Mayer ou, comme le pense Waterstone, grâce à la chute de la matière solaire elle-même, c'est-à-dire grâce à une contraction, un effondrement. Selon Waterstone, une contraction de 280 mètres par an permettrait de rendre compte du flux de l'énergie solaire. Au contraire, si l'origine de l'énergie rayonnée par le Soleil provient de la chute de météorites, le diamètre solaire devrait augmenter de 10 mètres par an, trop faible pour être observé.

William Thomson et Hermann Helmholtz

Pas plus que Mayer, Waterstone n'est pris au sérieux et son article (1845) est rejeté. Quelques années plus tard, en 1853, il annonce son hypothèse de l'effondrement lors d'une réunion de la British Association à laquelle assistait le fameux Hermann von Helmholtz (1821-1894). Ce dernier devient aussitôt un fervent défenseur et le principal promoteur de cette thèse. À cette époque, Thomson cherchait à déterminer l'âge du Soleil. Dans cet objectif, il avait été amené à s'intéresser lui aussi à l'origine de l'énergie solaire. En 1854, il prend connaissance de l'hypothèse cométaire de Mayer. Aussitôt séduit par cette explication, Thomson en fait la promotion pendant quelques temps... puis l'abandonne progressivement à partir du début des années 1860. En effet, il fallait se rendre à l'évidence, la théorie de Mayer était intenable, et cela pour plusieurs raisons.

Tout d'abord parce que le calcul effectué par Thomson montre que la masse de matière qui devait chuter annuellement sur le Soleil pour rendre compte de l'énergie rayonnée par ce dernier est égale au quinze millionième ($1/15\ 000\ 000$) de sa propre masse. Autrement dit, en 3 000 ans une masse de matière équivalente à $1/5\ 000$ de la masse solaire - soit plus de soixante globes terrestres - aurait dû tomber sur le Soleil. Or, avant sa chute sur le Soleil, cette masse de matière devait nécessairement être située à l'intérieur de l'orbite terrestre, car dans le cas contraire l'augmentation de la masse à l'intérieur de celle-ci depuis l'époque des Grecs aurait inévitablement entraîné des perturbations du mouvement de la Terre visibles et mesurables. En particulier, la durée de l'année

aurait été modifiée, ce qui n'était pas le cas. D'un autre côté, dans la sphère centrée sur le Soleil et de rayon égal à celui de l'orbite terrestre il n'y avait aucune trace de toute cette matière hypothétique nécessaire à l'hypothèse cométaire. Le même raisonnement appliqué aux orbites de Vénus et Mercure indiquait que les supposées comètes devaient toutes provenir de l'intérieur de l'orbite de Mercure, ce qui n'était pas raisonnable, bien que l'étude du mouvement de Mercure ait conduit Urbain Le Verrier (1811-1877) à postuler en 1860 l'existence d'une masse – trop petite cependant pour l'hypothèse cométaire - située entre le Soleil et la planète : l'hypothétique planète Vulcain.

Il y avait au moins une deuxième raison pour laquelle il fallait abandonner l'hypothèse cométaire : on avait montré que l'augmentation de la masse du Soleil combinée à la croissance de son diamètre (laquelle, d'après le calcul, devait s'effectuer à raison de 10 mètres par an environ), devait provoquer un ralentissement de la vitesse de rotation du Soleil sur lui-même, ralentissement que l'on avait évalué à un peu plus de 2 heures par siècle. Or, l'observation du déplacement des taches solaires n'avait révélé aucun ralentissement...

Après l'abandon définitif de l'hypothèse cométaire de Mayer en 1862, Thomson adopte la théorie de la contraction qu'approuvait également Helmholtz depuis 1853. L'idée de la contraction avait tout de suite séduit l'Allemand, car ce dernier défendait l'hypothèse de la « nébuleuse solaire » d'Emmanuel Kant (1724-1804) et de Pierre-Simon de Laplace (1749-1827), hypothèse selon laquelle le système solaire se serait formé par contraction d'une nébuleuse primitive. Il était donc tout à fait raisonnable, et de surcroît économique pour la pensée, d'admettre que ce mouvement se poursuivait encore de nos jours, et que le Soleil s'effondrait lentement sur lui-même.

L'effondrement solaire selon Helmholtz et Thomson

Les calculs effectués par Helmholtz et Thomson montrent qu'au rythme auquel le Soleil rayonne de l'énergie, il devrait voir sa température baisser de 1,4 °C par an, cela en admettant que sa chaleur massique est proche de celle de l'eau... et il y avait de bonnes raisons pour le penser. En effet, les observations spectroscopiques semblaient indiquer que le Soleil est formé d'un mélange fondu de fer, de manganèse, de sodium... Or, les chaleurs massiques de tous ces métaux sont de l'ordre de celle de l'eau. Ce refroidissement devait à son tour

provoquer une contraction du diamètre solaire de 1 % en 860 ans⁵, une diminution qui ne serait pas passée inaperçue si elle s'était vraiment produite. D'un autre côté, une contraction correspondant à une diminution d'énergie potentielle, cela devait augmenter la température solaire et donc entraîner... une dilatation. Helmholtz montre alors que si le diamètre du Soleil diminue d'un millième (soit de 1 400 km), la quantité de chaleur produite assurerait une émission de chaleur (au taux actuel) pendant plus de 20 000 ans. Autrement dit, au taux actuel d'émission, le diamètre solaire devrait diminuer tous les ans d'un vingt-millionième, soit de 700 m par an environ, soit du même ordre de grandeur que ce qu'avait trouvé Waterstone (280 m). Au milieu des années 1860, l'hypothèse de l'effondrement gravitationnel du Soleil comme origine de l'énergie rayonnée tenait parfaitement la route, sous réserve d'être compatible avec l'âge du système solaire, c'est-à-dire à condition que ce dernier ne soit pas trop vieux.

Thomson imagine alors l'immense nébuleuse primitive à l'origine du système solaire et montre que l'énergie gravitationnelle libérée sous forme de chaleur lors de sa contraction a sans doute été 100 à 500 millions de fois supérieure à celle que le Soleil libère en un an. Probablement, dit alors Thomson, le Soleil est vieux de 100 à 500 millions d'années maximum. Cela fait, il estime alors l'âge de la Terre en considérant comme un fait acquis depuis Descartes (1596-1650) et Leibniz (1646-1716) qu'à sa formation la Terre était une boule de matière en fusion à près de 4 000 °C qui n'a cessé de se refroidir depuis. Sachant qu'aujourd'hui la température de la Terre n'est pas uniforme mais augmente avec la profondeur à raison d'environ 1 °C en moyenne tous les 30 mètres, Thomson s'appuie sur la loi de diffusion de la chaleur établie par Joseph Fourier (1768-1830) pour estimer à travers le calcul l'ordre de grandeur du temps écoulé depuis la formation de la Terre : il trouve 200 millions d'années. Ce résultat était parfaitement compatible avec l'âge qu'il avait trouvé pour le Soleil, mais était en désaccord avec l'âge bien plus important que les naturalistes attribuaient à la Terre... d'autant qu'au cours des années 1890 Thomson revoit son estimation à la baisse lorsqu'il apprend de la part des géologues que certains basaltes fondent dès 1 200 °C. Il pose alors cette valeur (au lieu des 4 000 °C) comme température de la Terre primitive en fusion, si bien que cela réduit considérablement

⁵ En admettant que le coefficient d'expansion de la matière solaire est de l'ordre de ceux des matériaux terrestres.

la durée nécessaire à son refroidissement et donc aussi son âge que Thomson évalue désormais à 20 millions d'années.

Les naturalistes entrent en scène

Les géologues, paléontologues et biologistes avaient leurs propres estimations de l'âge de la Terre. Elles s'appuyaient sur des observations effectuées sur le terrain : épaisseurs de couches sédimentaires, hauteurs de montagnes, profondeurs de canyons, salinité de l'eau des océans, érosions de côtes, études de fossiles... Leurs calculs étaient toujours très simples. Par exemple, on évaluait tout d'abord le taux d'accumulation d'un certain sédiment puis, connaissant l'épaisseur de la couche sédimentaire, on en déduisait le temps nécessaire à sa formation par une simple règle de trois. Particulièrement intéressé par la géologie, Charles Darwin (1809-1882) était enclin à penser comme la plupart de ses collègues géologues que la Terre est bien plus vieille que ce que prétend Thomson, son âge frôlant sans doute le milliard d'années. En particulier, en étudiant l'érosion par la mer de la formation calcaire du Weald au sud-est de la Grande Bretagne, un processus que Darwin estime s'effectuer à raison de 2,5 cm par siècle, il arrive à la conclusion que cela fait 300 millions d'années que l'érosion agit sur la formation. Le processus géologique nécessaire à la constitution d'un tel dépôt crayeux étant extrêmement long, cela signifiait que le dépôt lui-même était beaucoup plus âgé que cela, ce qui amenait l'âge de la Terre à au moins un à deux milliards d'années. Signalons qu'un âge aussi important avait déjà été avancé au début du XVIII^e par un personnage excentrique, Benoist de Maillet (1656-1738), diplomate français et naturaliste amateur durant ses temps libres (voir encadré). En outre, pour Darwin, l'évolution des espèces est un processus extrêmement lent : 100 millions d'années lui paraissaient bien peu pour passer des premiers unicellulaires à l'homme. Cependant, tout le monde était conscient que les estimations des naturalistes reposaient généralement en premier lieu sur la délicate évaluation d'un taux d'érosion, de déposition... qu'il fallait ensuite extrapoler, moyennant certaines hypothèses simplificatrices. Or, ces taux sont très difficiles à évaluer d'autant qu'ils varient considérablement d'un lieu géographique à un autre. En raison de ces incertitudes, les estimations étaient peu fiables. Une fois cela admis, face à l'autorité d'un Thomson qui employait un arsenal physico-mathématique rigoureux et irréprochable, les naturalistes cèdent et ajustent leurs calculs afin que leurs estimations de

l'âge de la Terre correspondent aux dires de Thomson : quelques dizaines de millions d'années, voire cent millions, mais pas davantage. Darwin lui-même tente de revoir dans les éditions ultérieures de l'Origine des espèces les mécanismes de sélection afin d'accélérer le processus d'évolution. Cependant, progressivement, des voix s'élèvent contre Thomson, devenu Lord Kelvin depuis 1882. On lui reproche par exemple d'avoir admis que le transport de chaleur dans la Terre ne met en jeu aucun mouvement de convection, et ne s'effectue que par diffusion. Puis, en 1899, Thomas Chamberlin (1843-1928), professeur réputé de géologie à l'université de Chicago, fait remarquer que l'arsenal physico-mathématique du physicien a beau être irréprochable, ses hypothèses de base sont discutables et loin d'être des certitudes. En particulier, dit Chamberlin, il n'existe aucune raison sérieuse de penser que la Terre était une boule en fusion à sa formation. De plus, mettant en avant le fait que la science ne connaît que très peu de chose sur les atomes, Chamberlin annonce qu'il se peut que les atomes situés dans des conditions extrêmes dans les profondeurs de la Terre subissent des réactions libérant de la chaleur. Dans ce cas, dit-il, l'hypothèse de Thomson selon laquelle la Terre ne fait que se refroidir passivement serait invalidée et l'âge de la Terre largement sous-estimée. Intuition prémonitoire de Chamberlin... car la découverte de la radioactivité à la fin du XIX^e siècle allait lui donner raison. L'atome, ou plutôt le noyau atomique, allait bientôt non seulement permettre de déterminer l'âge de la Terre de manière indiscutable, mais il allait aussi apporter la clé de l'énigme relative à l'origine de l'énergie des étoiles.

De Maillet pensait comme René Descartes (1596-1650) que les planètes sont des étoiles éteintes. Selon lui, la Terre finira un jour par s'embraser et redevenir une étoile après l'assèchement complet des océans par évaporation. Le cycle étoile/planète devait selon lui durer 5 milliards d'années réparties également entre les deux phases. De Maillet pensait que jadis le niveau des mers et océans était plus élevé que les plus hautes montagnes. Ces dernières émergent, disait-il, à mesure que le niveau baisse par évaporation. Comme preuve il avance le fait que dans certains anciens ports comme ceux d'Alexandrie et de Carthage, le niveau d'eau a clairement baissé depuis l'époque des Grecs. Il estime ainsi la vitesse de retrait de la mer à environ 1 mètre tous les mille ans. Sachant qu'il existe à 2 000 mètres d'altitude des hameaux qui étaient autrefois, pense-t-il, en bord de mer, cela prouve que l'homme existe depuis au moins 2 millions d'années. La Terre devant être facilement mille fois plus âgée que l'homme, elle est vieille d'au moins 2 milliards d'années.