

CHAPITRE 9 HISTOIRE DE L'ÂGE DE LA TERRE

INTRODUCTION: CHOIX PÉDAGOGIQUES

Dans le même esprit que le chapitre 3 (« Une structure complexe : la cellule vivante »), ce chapitre est l'occasion de montrer comment le savoir scientifique s'est construit, avec en particulier une période de grande controverse scientifique. La diversité des arguments employés au cours de l'Histoire permet une réflexion sur leur caractère scientifique ou non. Le lien entre les progrès techniques et scientifiques est à nouveau mis en évidence.

POUR COMMENCER

1. → b.

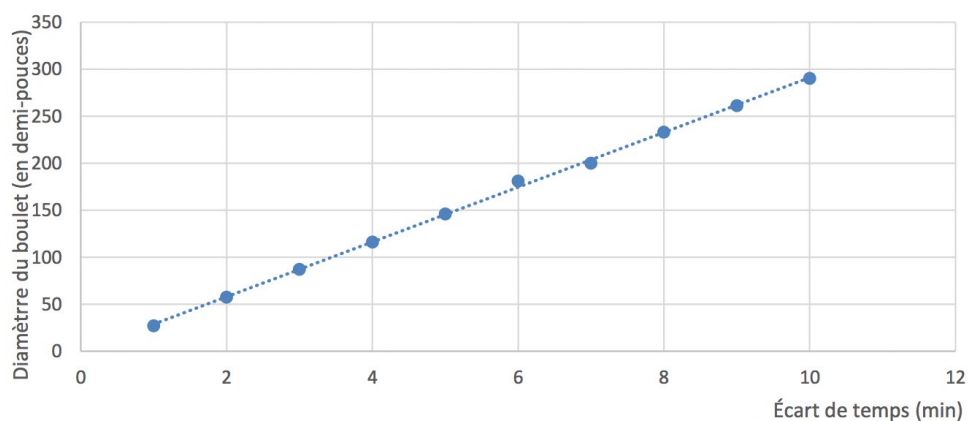
2. → c.

UNITÉ 1

Auteur	Époque ou date	Arguments	Approche scientifique	Âge proposé pour la Terre :
Aristote	Antiquité		non	La Terre a toujours existé
James Ussher	XVI ^e siècle	Bible	non	La Création a eu lieu le 23 octobre de l'an 4004 av. J.-C.
Johannes Kepler			Non	
Isaac Newton	XVII ^e siècle	Bible	non	3998 av. J.-C.
Edmond Halley		Salinité de la mer	oui	Âge de la Terre bien plus vieux qu'on ne le pense à l'époque
Alphonse de Vignoles		Bible	non	3483 à 6984 ans
Georges Louis Leclerc, comte de Buffon	XVIII ^e siècle	Temps de refroidissement de la Terre	oui	74 047 ans

Pour exploiter les données de Buffon (doc 7), il faut faire la différence entre le 1^{er} et le 2^e temps de refroidissement. En effet, Buffon ne connaît pas la température des boulets qu'il a chauffés au rouge, et pour pouvoir comparer la durée de refroidissement entre deux boulets, il faut que les boulets soient à la même température initiale (celle qu'il détermine en pouvant toucher et tenir les boulets dans la main pendant une seconde sans se brûler).

Différence entre les 1er et 2e temps de refroidissement



La lecture de la pente du graphique permet de déterminer que le temps de refroidissement en minutes est d'environ 29 fois le diamètre du boulet exprimé en demi-pouces.

Considérant que le diamètre de la Terre est de 941 461 920 demi-pouces (doc 6), l'âge de la Terre serait donc de :

$$\text{Âge} = \frac{29 \times 941\,461\,920}{60 \times 24 \times 365} \approx 52\,000 \text{ ans.}$$

Ce résultat n'est bien entendu pas en accord avec l'âge aujourd'hui admis. Buffon fait plusieurs hypothèses qui s'avèrent fausses et qui conduisent à ce résultat : il considère la Terre comme un solide homogène, il considère qu'il n'y a aucune source de chaleur interne, il utilise des boulets de fer qui ne sont pas représentatifs de la composition du globe terrestre, il extrapole ses données à partir de faibles diamètres en considérant une relation linéaire (le graphique est une droite) entre le diamètre et la vitesse de refroidissement.

UNITÉ 2

Doc 1 : il est possible de faire réaliser les calculs aux élèves à partir des différentes données. Cela ouvre la discussion sur la fiabilité des données utilisées : estimations de la vitesse de sédimentation et de l'épaisseur cumulée de toutes les formations sédimentaires. Il existe des facteurs de variation pour la vitesse de sédimentation (apports sédimentaires variant avec la productivité biologique et la profondeur pour les sédiments biogènes, avec la charge des fleuves pour les sédiments détritiques, influence du climat dans les deux cas, de la topographie et de la nature géologique de l'arrière-pays dans le second...). En outre, les formations sédimentaires aujourd'hui en domaine continental subissent l'érosion.

Date	Auteur	Épaisseur des sédiments (km)	Taux de sédimentation (en km / Ma)	Durée de sédimentation = âge de la Terre (en Ma)
1860	Phillips	22	0,23	96
1890	De Lapparent	45	0,5	90
1892	Geike	30	0,4	75
1893	Upham	80	0,8	100
1900	Sollas	81	3,1	26
1909	Sollas	102	1,27	80

Doc 2 : le calcul de John Joly peut être reproduit :

$$\text{Âge de la Terre} = \frac{1,42 \cdot 10^{19}}{1,43 \cdot 10^{11}} \approx 10^8 = 100 \text{ millions d'années.}$$

Le repérage des unités des variables utilisées et leur confrontation avec l'unité du résultat recherché peut aider l'élève à vérifier la pertinence de son calcul.

L'âge trouvé avec cette approche est trop faible. Parmi les sources d'erreur qui peuvent expliquer cela, les imprécisions sur l'estimation de la masse de sodium dans les océans, et la masse apportée chaque année par les cours d'eau.

L'hypothèse qu'il n'y a pas de pertes de sodium dans les océans – autrement dit, que tout le sodium apporté au cours des temps géologiques se retrouve en solution dans les eaux océaniques – ne tient pas : il existe des gisements de halite (NaCl) en domaine continental (exemple de la mine souterraine de sel gemme de Varangéville, en Meurthe et Moselle, qui est encore exploitée aujourd'hui) mais aussi en domaine océanique (exemple de la crise messinienne en Méditerranée : couches de halite de plusieurs centaines de m d'épaisseur).

Pour plus d'informations sur la crise messinienne en Méditerranée : <http://geologie.mnhn.fr/messinien.html>

Doc 3 : Kelvin utilise les lois de diffusion de la chaleur dans les corps établies par Joseph Fourier. Les hypothèses qu'il utilise pour pouvoir appliquer ces lois au refroidissement de la Terre apparaissent aujourd'hui fausses : la conduction n'est pas la modalité prédominante de dissipation de la chaleur dans le globe terrestre, la Terre n'est pas globalement rigide, le gradient de température de la croûte ne peut pas être extrapolé à l'ensemble du globe et Kelvin ne prend pas en compte de source de chaleur interne.

Pour plus d'informations sur le géotherme, voir : <https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/geotherme-profond.xml>

Doc 4 : l'approche de Darwin qui utilise la vitesse d'érosion de formations sédimentaires fait l'objet de l'exercice 4.

Doc 5 : les arguments qui opposent physiciens et naturalistes, respectivement représentés ici par Kelvin et Darwin, sont présentés. Les conclusions de Kelvin semblaient plus plausibles que les propositions de Darwin à l'époque car il s'appuyait sur les lois de Fourier qui se trouvaient vérifiées par l'expérience, alors que les arguments de Darwin étaient discutés et qu'il ne disposait pas de données pour calculer précisément un temps absolu.

Critères d'évaluation de la tâche complexe

DÉMARCHE	Synthèse
	<p>Pertinence : le texte répond à la question posée</p> <p>Cohérence : les hypothèses et arguments utilisés pour les différentes approches sont confrontés et discutés à la lumière des connaissances actuelles</p>
CONTENU	Éléments scientifiques attendus tirés des documents du livre
	<ul style="list-style-type: none"> - Les différentes démarches relevant d'une approche naturaliste sont identifiées et reliées à la nature des arguments utilisés - L'approche physicienne de Kelvin est distinguée des approches naturalistes - Les sources d'incertitude des estimations des naturalistes sont identifiées et discutées - Les hypothèses formulées pour les différentes approches sont identifiées et discutées - Les obstacles à l'acceptation des propositions de Darwin sont identifiés
COMMUNICATION	Forme de la représentation (affiche)
	Précision : argument précis extraits des documents (qui sont mentionnés)
	Clarté : sens, lisibilité du texte
	Conformité : syntaxe et orthographe correctes

Indicateurs de réussite :

Niveaux de réussite	DÉMARCHE Synthèse, démarche explicative, exposé, présentation...	CONTENU Éléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	COMMUNICATION Forme de la représentation (texte ici)
1	Ne répond pas à la question posée	Absents	Non conforme
2	Démarche maladroite et partielle à la question posée	Incomplets soit / connaissances soit / extraction d'information des documents	1 critère (parmi les trois: précision, clarté, conformité)
3	Démarche pertinente mais maladroite		2 critères (parmi les trois: précision, clarté, conformité)
4	Démarche à la fois pertinente et cohérente	Complets ou suffisants	3 critères (précision, clarté, conformité)

UNITÉ 3

Doc 1 : la radioactivité constitue un chronomètre absolu, puisque la période d'un couple père/fils est indépendante de la quantité initiale d'élément père (et des conditions thermodynamiques).

Doc 2 : La découverte de Pierre et Marie Curie conduit à l'idée d'une source de chaleur interne au globe terrestre qui remet en cause les conclusions de Kelvin.

Doc 3 : les premières datations réalisées par Arthur Holmes ne permettent pas de dater la Terre en raison des perpétuels remaniements qui affectent sa surface. En revanche, la confrontation de ses résultats avec l'échelle des temps géologiques qui figure en fin de manuel montre que les valeurs qu'il a obtenues étaient cohérentes.

Doc 5 : pour plus de précisions sur le spectromètre de masse, voir : <http://accés.ens-lyon.fr/accés/thematiques/limites/Temps/datation-isotopique/comprendre/le-spectrometre-de-masse> et <https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/spectrometre-de-masse.xml>

Doc 4 et 6 : l'isotope ^{204}Pb étant stable, les rapports isotopiques dépendent de la quantité de ^{206}Pb ou ^{207}Pb qui sont respectivement les éléments fils issus de la désintégration de ^{238}U et ^{235}U . Les rapports isotopiques $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ augmentent donc au cours du temps au fur et à mesure de la désintégration des isotopes instables de l'uranium. Les courbes noire et grise reflètent l'évolution de ces rapports au cours du temps pour deux échantillons différents d'une même roche, les points ayant la même couleur correspondant au même temps.

Le temps initial correspond à la « fermeture du système » (= refroidissement pour une roche magmatique). Les échantillons contiennent alors en mêmes proportions les différents isotopes du plomb (leurs propriétés chimiques étant proches, il n'y a pas de fractionnement isotopique lors de la formation de la roche). En revanche, les teneurs en uranium dépendent des minéraux, donc elles diffèrent d'un échantillon à l'autre, ce qui explique que les courbes soient distinctes pour les deux échantillons.

La mesure des rapports isotopiques à un temps t dans deux échantillons d'une même roche donne deux points qui permettent de tracer une droite dite isochrone (les échantillons ont le même âge). On constate sur le graphique que la pente de cette droite diminue au fur et à mesure que le temps augmente. Il existe donc une relation entre la pente de l'isochrone et l'âge d'une roche : déterminer cette pente permet de connaître l'âge de la roche.

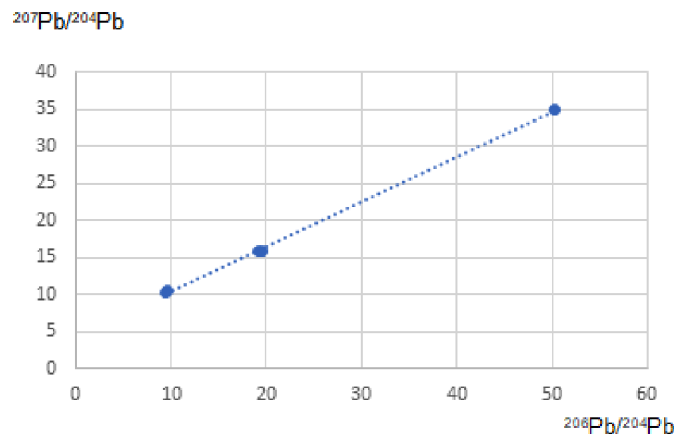
Doc 7 : la méthode utilisée par Patterson repose sur des équations impliquant la fonction exponentielle qui ne fait pas partie

des connaissances attendues. Il est en revanche possible de faire construire le graphique (éventuellement avec un tableur) par les élèves à partir des données de Patterson (ci-dessous et disponibles dans les ressources numériques qui accompagnent le manuel).

Ils peuvent alors déterminer graphiquement la pente de la droite obtenue et la comparer avec les pentes des droites du graphique du **doc 6** pour déterminer que l'âge correspondant est de $4,5 \cdot 10^9$ ans. Si le graphique est tracé à la main, le travail peut être facilité en utilisant les mêmes échelles que pour le **doc 6** : inutile alors de calculer la pente, il suffit de trouver quelle est la droite du graphique du **doc 6** qui est parallèle avec celle du graphique tracé par l'élève.

Échantillon	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ actuel	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ actuel
Météorite de Nuevo Laredo (Nouveau Mexique)	50,28	34,86
Météorite de Cañon Diablo (Arizona)	9,46	10,34
Météorite de Forest City (Iowa)	19,27	15,95
Météorite de Modoc (Kansas)	19,48	15,76
Météorite de Henbury (Australie)	9,55	10,38

Isochrone des météorites étudiées



La pente de la droite est d'environ 0,6, comme celle de la droite verte du doc 6.

Pour plus d'informations sur les météorites, leur formation, leur âge... :

<https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/meteorite-ferroir.xml>

<https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/meteorites-origine-systeme-solaire.xml>

Proposition de frise chronologique à partir des données des **doc 1 à 7** :

Date	1902	1903	1911	1913	1940	1946	1953
Auteur(s)	Rutherford et Soddy	Pierre et Marie Curie	Frederick Soddy	Arthur Holmes	A. O. Nier	Fritz Houtermans	Clair Patterson
Découverte	La période de désintégration des éléments radioactifs est une constante	La désintégration d'éléments radioactifs : source de chaleur	Notions d'isotopie	1 ^{res} datations de roches terrestres grâce à l'uranium	Mise au point du spectromètre de masse	Concept d'isochrone	Datation de météorites : 1 ^{re} datation absolue de l'âge de la Terre

Les différentes découvertes conduisant à la proposition d'un âge absolu pour la Terre par Clair Patterson appartiennent à différents domaines des sciences et techniques : chimie, avec les propriétés d'éléments radioactifs et la notion d'isotopes, physique et techniques avec la mise au point du spectromètre de masse, mathématiques pour traiter les données obtenues grâce au spectromètre de masse, géologie et physique pour le modèle de formation du système solaire et l'identification des météorites comme échantillons utilisables pour dater la formation de la Terre.

Critères d'évaluation de la tâche complexe

DÉMARCHE	Synthèse
	<p>Pertinence : qui répond à la question posée.</p> <p>Cohérence : pas de grosse erreur (particulièrement concernant la chronologie de mise au point des techniques et cohérence entre les découvertes et les domaines scientifiques et techniques concernés)</p>
CONTENU	Éléments scientifiques attendus tirés des documents du livre
	<p>Suffisance : chaque étape clé est présentée dans la frise, qui est accompagnée d'un court texte expliquant la remise en cause des conclusions de Kelvin et montrant que différents domaines scientifiques et techniques ont pris part au cheminement conduisant à établir l'âge de la Terre.</p> <p>Suffisance : pour chaque étape clé, la date ou période de mise au point, le ou les auteurs et la découverte sont indiqués dans la frise. La mise en relation entre les travaux de Pierre et Marie Curie et la remise en cause des conclusions de Kelvin est correctement explicitée dans le texte d'accompagnement. L'idée de la contribution de différents domaines scientifiques et techniques est argumentée.</p>
COMMUNICATION	Forme de la représentation (affiche)
	<p>Précision : dates aussi précises que possible, arguments précis issus des documents proposés.</p> <p>Clarté : vocabulaire scientifique adapté, organisation logique des données dans la frise, enchaînement logique des idées dans le texte d'accompagnement.</p> <p>Conformité : présentation sous forme de frise chronologique.</p>

Indicateurs de réussite :

Niveaux de réussite	DÉMARCHE	CONTENU	COMMUNICATION
	Synthèse, démarche explicative, exposé, présentation...	Éléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Forme de la représentation (texte ici)
1	Ne répond pas à la question posée	Absents	Non conforme
2	Démarche maladroite et partielle à la question posée	Incomplets soit / connaissances soit / extraction d'information des documents	1 critère (parmi les trois : précision, clarté, conformité)
3	Démarche pertinente mais maladroite		2 critères (parmi les trois : précision, clarté, conformité)
4	Démarche à la fois pertinente et cohérente	Complets ou suffisants	3 critères (précision, clarté, conformité)

1 Vrai/faux

- Faux, dans l'Antiquité, Aristote estimait que la Terre avait toujours existé.
- Faux, elles remontent au XVIII^e siècle.
- Vrai.
- Faux, il s'est écoulé une cinquantaine d'années.

2 QCM

- Faux, l'âge de la Terre aujourd'hui admis par la communauté scientifique est de $4,55 \cdot 10^9$ ans.
 - Vrai.
 - Faux.
- Faux.
 - Faux.
 - Vrai.
 - Faux.
- Vrai.
 - Faux, à la Renaissance, les calculs à partir de la Bible proposent une naissance du Monde à -4 000 avant J.-C.
 - Faux.
 - Faux.
- Faux.
 - Faux.
 - Faux.
 - Vrai, les approches fondées sur la désintégration radioactive n'ont été développées qu'à partir du début du XX^e siècle.
- Vrai.
 - Faux, elles ont une origine extraterrestre.
 - Faux, elles proviennent «d'embryons de planètes» formés aux premiers temps du système solaire.
- Faux, le calcul de Buffon ne nécessitait pas d'outils particulièrement sophistiqués.
 - Vrai, Buffon a considéré que la Terre s'est refroidie uniquement par conduction, ce qui n'est pas le cas.
 - Faux, les expériences réalisées par Buffon l'ont été en appliquant les règles de la démarche scientifique.

3 Question de synthèse

Le texte proposé par l'élève doit reprendre les éléments principaux qui sont présentés dans «l'essentiel par l'image». La forme rédigée de la réponse permettra de vérifier la compréhension des étapes qui ont conduit à établir l'âge de la Terre et l'enchaînement de ces étapes.

Objectif BAC

4 Mettre en relation des informations, calculer, raisonner

- Lyell énonce le principe d'actualisme, qui permet à Darwin de proposer que les phénomènes d'érosion qu'il observe se sont produits de la même manière dans le passé. Il peut donc appliquer dans ses calculs un taux d'érosion estimé au moment de ses observations.
- L'épaisseur totale des formations sédimentaires du Weald est de : $200 + 110 + 215 = 525$ m soit 525 000 mm
En appliquant un taux d'érosion de 20 mm/1 000 ans, on peut alors calculer la durée nécessaire pour éroder cet ensemble de formations :

$$t = \frac{525\,000}{20} \times 1\,000 = 26\,250\,000$$

soit un peu plus de 26 Ma.

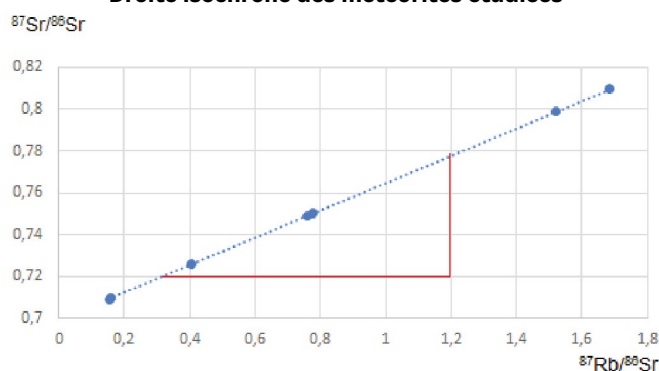
- Darwin avait proposé 300 Ma, soit pratiquement 10 fois plus que notre résultat. Cela pourrait être lié au taux d'érosion qu'il a utilisé. Les variations liées à l'érosion depuis l'époque de Darwin sont trop faibles pour expliquer l'écart de résultat.

NB : les sources bibliographiques mentionnent un taux d'érosion de 1 pouce par an pour les calculs de Darwin. Cela représente un taux d'érosion de 2,54 cm/an, ce qui semble très important au vu des taux d'érosion actuellement retenus pour les plaines (le taux d'érosion dépend notamment de la topographie de la région, mais d'autres facteurs tels que le climat interviennent). En appliquant un tel taux d'érosion, la durée trouvée sera bien plus faible que celle calculée ci-dessus... et ne semble pas cohérente avec la durée de 300 Ma proposée par Darwin.

5 Calculer

- Il est possible de faire utiliser un tableur pour tracer cette droite.

Droite isochrone des météorites étudiées



- Il faut déterminer la pente de la droite, car il existe une relation mathématique entre cette pente et l'âge des échantillons.

La pente α est de : $\alpha = \frac{0,78 - 0,72}{1,2 - 0,3} = \frac{0,06}{0,9} = 0,07$.

(Rappel : les différentes chondrites ont le même âge, qui est celui de la Terre, comme vu dans le doc 7 de l'unité 3).

- Si $\alpha \approx \lambda t$ alors $t = \frac{\alpha}{\lambda}$. D'où :

$$t = \frac{0,07}{1,4 \cdot 10^{-11}} = \frac{0,07}{1,4} \cdot 10^{-11} = 0,05 \cdot 10^{-11} = 5 \cdot 10^9 \text{ ans.}$$

- On trouve 5 milliards d'années, un peu plus que l'âge « officiellement » admis de la Terre, ce qui est lié à l'approximation de la pente de la droite isochrone.

Si on détermine la pente avec un tableur, on trouve $\alpha = 0,0657$ et l'âge correspondant est alors de 4,69 Ga : on se rapproche de la valeur actuellement admise.

6 Raisonner et rédiger

- Le modèle de formation de la Lune actuellement retenu est celui de la collision d'un objet - « protoplanète » de grande taille (comparable à celle de Mars) nommé Théia - avec la Terre, à une vitesse élevée ($40\,000 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) et sous un angle oblique. Dans ces conditions, la collision aurait détruit l'impacteur. Ses débris ainsi qu'une partie du manteau terrestre arraché se seraient retrouvés en orbite autour de la Terre et leur accréation aurait donné naissance à la Lune.

Cette collision se serait produite environ 10 Ma après la naissance du système solaire, soit il y a environ 4,468 Ma.

Quelques ressources utiles :

<http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/origine-Lune.xml>

<http://www.ipgp.fr/fr/formation-de-lune-a-basse-temperature>
(données d'octobre 2018)

https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/lune-terre-PTho_conf.xml

2. Il y a un paradoxe apparent entre le modèle de formation de la Lune retenu aujourd'hui – si la Lune provient d'un impact d'une protoplanète avec la Terre, elle est nécessairement plus jeune que la Terre – et l'âge des roches lunaires, « plus anciennes que les roches terrestres dites les plus vieilles ». L'auteur propose que les remaniements dont fait l'objet la surface terrestre n'ont pas permis d'avoir accès aux roches les plus anciennes, alors que celle de la Lune qui n'est pas soumise à l'érosion et à l'activité orogénique présente des roches qui ont l'âge de la formation de ce satellite de la Terre.

3. Les gneiss d'Acasta (Canada) sont les plus vieilles roches terrestres datées. Leur datation par la méthode U-Pb de zircons qu'ils contiennent a donné un âge de 4,031 Ga +/- 3 Ma ([Bowring et Williams, 1999](#)).

Les minéraux les plus anciens que l'on connaisse sont des zircons de la formation de Jack Hills (Australie) : une datation par la méthode U-Pb a donné un âge de 4,404 Ga +/- 8 Ma ([Wilde et al., 2001](#)).

Quelques ressources utiles :

<http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/roche-archeene.xml>

<http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques/limites/Temps/allee/comprendre/origine-de-la-croite-continentale>

ÇA VOUS CONCERNE

– Construction d'une « horloge évolutive »

Quelques exemples possibles :

- Machine à vapeur : Watt 1765 → révolution industrielle
- Électricité : 1879 lampe à incandescence (Edison)
- 1920 : télégraphie sans fil
- 1952 : premier ordinateur
- 1983 : téléphone mobile
- 1990 : internet
- 2000 : IA, machine learning
- 2010 : objets connectés

– Effet Doppler et mesure de vitesse

Exemple : les radars qui mesurent la vitesse des voitures.