

Thème 3 : La Terre, un astre singulier

Classe : Première ES

Durée envisagée : 5 semaines

Nombre d'activités : 3

En rouge : Bilans à faire noter aux élèves

En bleu : Activités pratiques

En vert : Problématique et hypothèses



Chapitre 1 Histoire de l'âge de la Terre

Intro : Dès l'Antiquité, la question de l'âge de la Terre intéresse les scientifiques et penseurs. Malheureusement, les conceptions sont erronées et de nombreux verrous technologiques et cognitifs (connaissances) sont présents. Ainsi, Aristote (300 av. JC) envisage que la Terre a toujours été là et qu'elle ne disparaîtra jamais. Cet argument d'autorité prévaudra jusqu'à la Renaissance durant laquelle la datation de la Terre est lié à la Bible, donnant un âge estimé de l'ordre de 4000 ans av. JC.

Problématique : Comment déterminer l'âge de la Terre et des roches ?

I- Les premières découvertes et les hypothèses sur l'âge de la Terre

Activité 1 - Les premières découvertes sur l'âge de la Terre

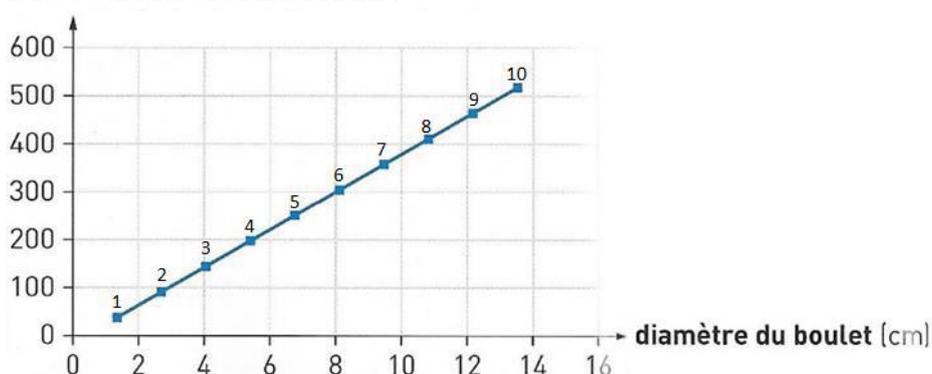
A partir de la Renaissance, les scientifiques se démarquent de plus en plus des écrits religieux et réalisent des observations et des pratiques expérimentales visant à déterminer l'âge de la Terre.

1- Les travaux de Buffon (doc 6 et 7 p145)

Georges Buffon était un naturaliste et mathématicien français. Il émet l'hypothèse que la Terre, lors de sa formation, était une sphère pleine faite de matière en fusion qui se refroidit progressivement par l'extérieur. Il réalise alors une expérience avec des boulets de fer qu'il chauffe et dont il étudie le refroidissement.

« J'ai fait faire 10 boulets de fer forgé [chauffés jusqu'à incandescence] : le 1er d'un demi pouce de diamètre, le 2ème d'un pouce [et il augmenta ainsi de suite la taille d'un demi pouce jusqu'au 10ème boulet de 5 pouces]. J'ai cherché à saisir le moment pour que les boulets incandescents puissent de nouveau être touchés et tenus avec la main pendant 1 seconde sans se brûler. [...] Maintenant, si on voulait chercher [...] combien il faudrait de temps à un globe gros comme la Terre pour se refroidir à la température actuelle, on trouverait **96 670 ans et 132 jours**. »

durée de refroidissement (min)



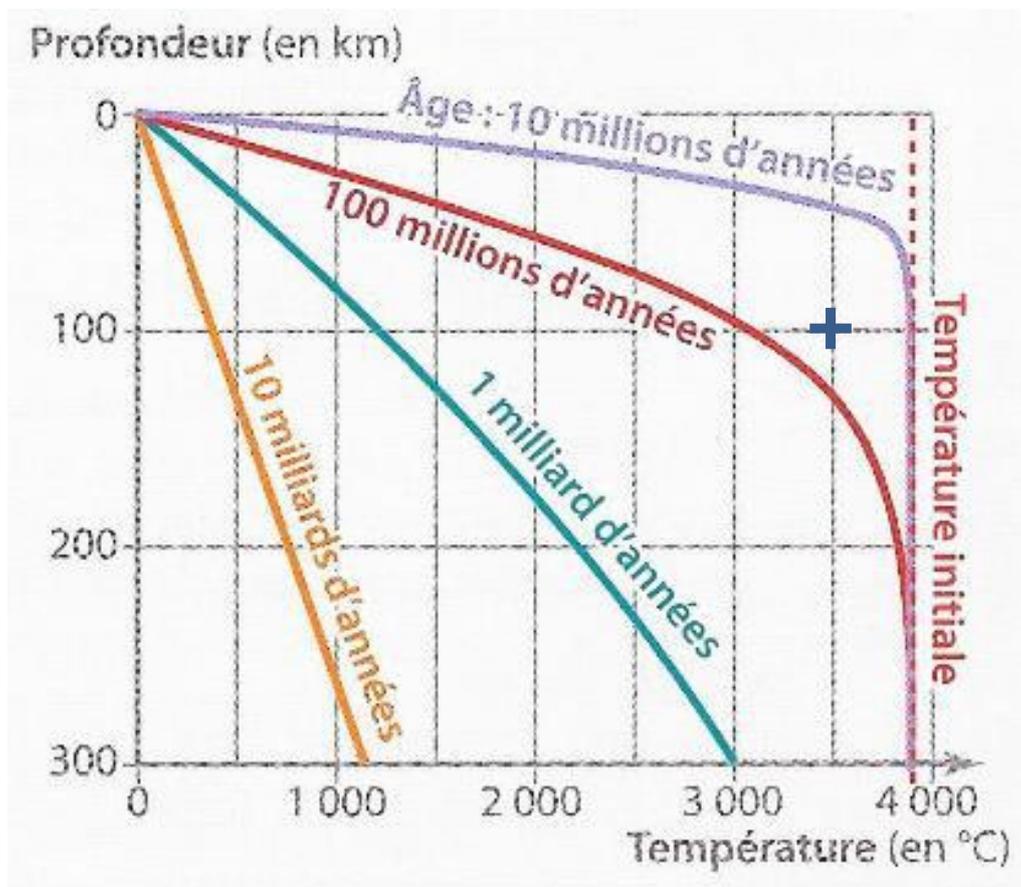
Graphique exposant la durée de refroidissement d'un boulet en fonction de son diamètre

Document 1 : Extrait de l'ouvrage de Buffon : » Histoire naturelle, générale et particulière » et graphique du refroidissement des boulets selon le diamètre

2- Les travaux de Kelvin (p145)

Kelvin était un physicien Britannique qui part du même postulat que Buffon : la Terre était entièrement fondue et s'est refroidie pour se solidifier. Il considère que seule la conduction s'applique pour expliquer le refroidissement.

Il réalise des calculs et se base sur les données issues des mines pour identifier les profils de températures qui seraient obtenus pour différents âges (graphique ci-dessous). Or le gradient géothermique identifié dans les mines est de l'ordre de $3,5^{\circ}\text{C}$ par kilomètre. Le placement d'un point (3500°C à 100 km de profondeur) nous montre que l'âge déterminé par cette méthode est de l'ordre de 80 millions d'années environ.



Document 2 : Graphique montrant les gradients géothermiques obtenus pour différents âges

II- Les débats scientifiques au XIXème siècle

1- Les apports de Joly (p146)

En 1899, John Joly reprend les premières hypothèses d'Edmund Halley (découvreur de la comète) qui implique que le sel des océans pourrait être utilisé pour déterminer l'âge de la Terre. En effet, il envisage que l'eau présente au départ était totalement dépourvue de sel et qu'elle s'est enrichie de façon constante depuis la création de la Terre. De plus, l'évaporation produit des gouttes d'eau douce ce qui fait que le sodium (Na) reste dans les océans.

Ainsi, il détermine qu'il y aurait $1,42 \cdot 10^{19}$ kg de sodium dans les océans. Or il estime que les rivières et les fleuves apporteraient seulement $1,43 \cdot 10^{11}$ kg de sodium par an. En conséquence, il faut 10^8 années soit 100 millions d'années pour obtenir la salinité actuelle des océans. Ce chiffre est assez proche de celui obtenu par Kelvin.

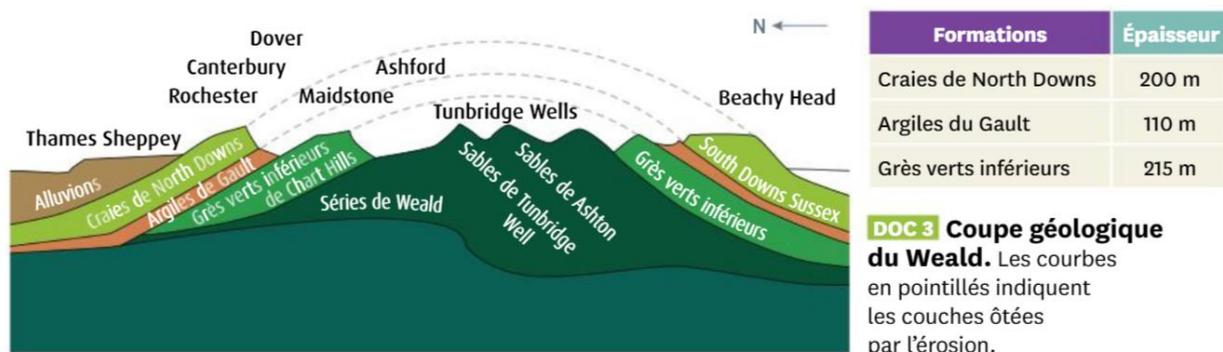
2- Les apports de Darwin (p147)

Charles Darwin est un biologiste qui a élaboré les bases de la théorie de l'évolution des espèces. Ses observations sur l'évolution sont basées en partie sur l'étude des fossiles et des roches sédimentaires. Il envisage alors que les roches sédimentaires, parfois épaisses de plusieurs centaines de mètres ont mis beaucoup de temps à se déposer. Avec d'autres scientifiques (dont le géologue Albert de Lapparent), il détermine le temps nécessaire au dépôt des roches. Pour cela, il utilise la vitesse de sédimentation qu'il estime à 10 cm (0,1m) par millier d'années soit 0,1 km par million d'années.

Ces analyses montrent que les formations géologiques étudiées (525m) ont un âge de l'ordre de 5,25 millions d'années. Par extrapolation de l'épaisseur totale des sédiments, on envisage que l'âge de la Terre serait de l'ordre de 100 à 300 millions d'années.

Auteur	John Phillips	Archibald Geike	Warren Upham	William Sollas
Date	1860	1892	1893	1900 1909
Épaisseur cumulée des formations sédimentaires (en km)	22	30	80	81 102
Vitesse de sédimentation (en km par million d'années)	0,23	0,4	0,8	3,1 1,27

Agés identifiés	95 Ma	75 Ma	100 Ma	26 Ma	80 Ma
-----------------	-------	-------	--------	-------	-------



Document 3 : Tableau montrant les estimations des vitesses de sédimentation et coupe géologique montrant les formations étudiées

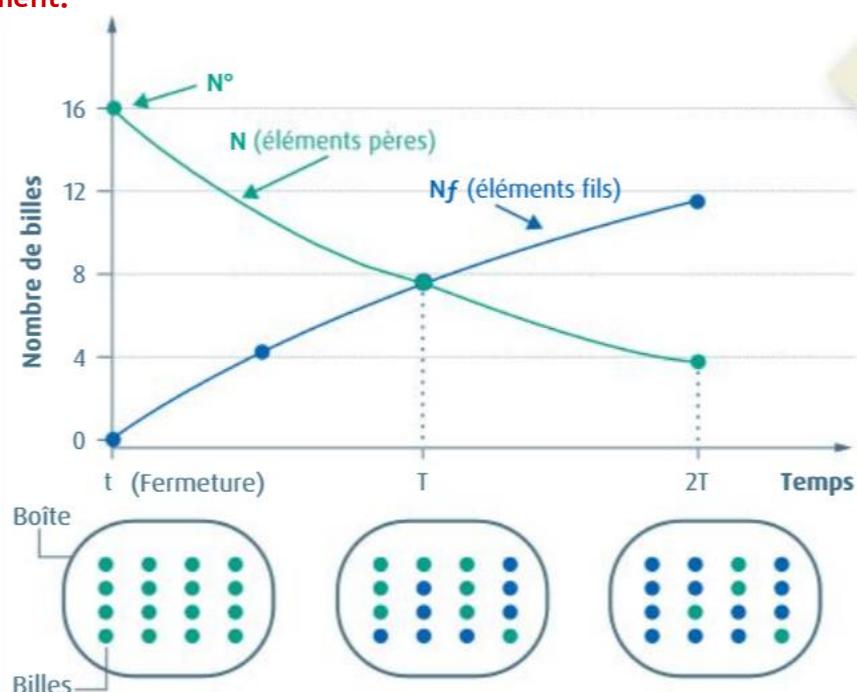
3- La controverse entre les disciplines (doc 4 et 5 p147)

Malgré ces arguments tout à fait recevables, la communauté scientifique se range du côté de Kelvin et de l'approche mathématique et physique qui semble plus robuste et rigoureuse. En effet, Darwin évoque que l'âge de la Terre est de l'ordre de 300 Ma en lien avec les fossiles et la lente évolution des espèces. Mais Kelvin est opposé à la théorie de l'évolution car il juge que le hasard ne peut pas façonner les êtres vivants ainsi.

III- Le XXème siècle et les méthodes de datation absolue

1- La radioactivité et ses apports (p148)

La découverte des éléments radioactifs au début du XXème siècle permet d'accéder à des éléments dont la désintégration est très lente, de l'ordre du million voire du milliard d'années. En effet, un élément père (radioactif) se désintègre en élément fils (radiogénique) à une vitesse spécifique. La mise au point des spectromètres de masses (MS) permettent également de déterminer leur concentration très précisément.



Document 4 : Graphique montrant l'abondance relative d'éléments père et fils au cours de la désintégration radioactive

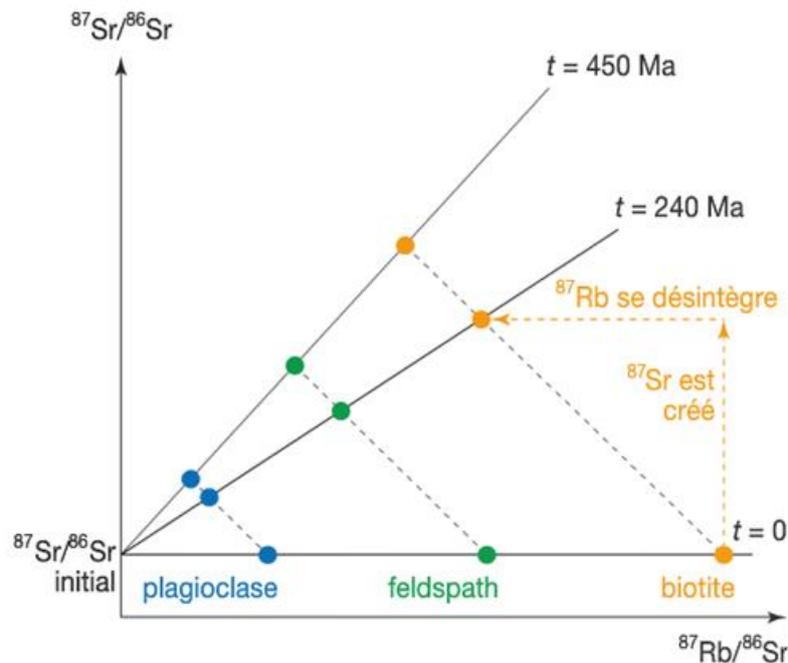
Élément père → Élément fils	Période (années)	Domaine de datation (Ma : millions d'années)	Échantillons datés
$^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$	$4,53 \cdot 10^9$	De 10 à 4 500 Ma	Minéraux riches en uranium (Ex : zircon)
$^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$	$1,31 \cdot 10^9$	De 1 à 4 500 Ma	Feldspaths potassiques Amphiboles Pyroxènes Muscovite Biotite Zircon
$^{39}\text{Ar} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$	$1,25 \cdot 10^9$	De 1 à 4 500 Ma	
$^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr}$	$49,9 \cdot 10^9$	De 10 à 4 500 Ma	
$^{147}\text{Sm} \rightarrow ^{143}\text{Nd}$	$106 \cdot 10^9$	> 200 Ma	
$^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N}$	5 730	< 40 000 ans	Os, bois et autres matières organiques

Document 5 : Tableau montrant les caractéristiques de quelques éléments radioactifs permettant la datation des objets géologiques (période = demi-vie)

2- La méthode des isochrones (p148)

Au moment de la formation d'une roche, les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ sont identiques (rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ du magma). Néanmoins, certains minéraux sont plus riches en ^{87}Rb (cas du mica) et les rapports $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ sont donc différents selon le minéral. Dès que la roche est formée, le ^{87}Rb se désintègre et le $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ rapport commence à diminuer. Comme ^{87}Rb se désintègre en ^{87}Sr , le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ va, au contraire, augmenter.

Les points donnés par les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ restent alignés et forment une droite isochrone. Cette droite présente une pente (coefficient directeur a) d'autant plus importante que le temps est important.

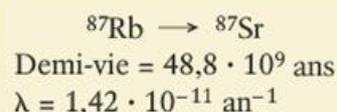


Le coefficient directeur de la droite est donc indicateur du temps écoulé depuis la **crystallisation** de la roche.

On peut démontrer mathématiquement que :

$$t = \ln(a + 1) / \lambda$$

avec λ : constante de désintégration (propre à l'élément)



Document 6 : Graphique permettant de déterminer l'âge du roche par la méthode isochrone.

t = âge de l'échantillon

a = pente de l'isochrone

λ = constante de désintégration radioactive : $1,42 \cdot 10^{-11}$ pour Rb/Sr

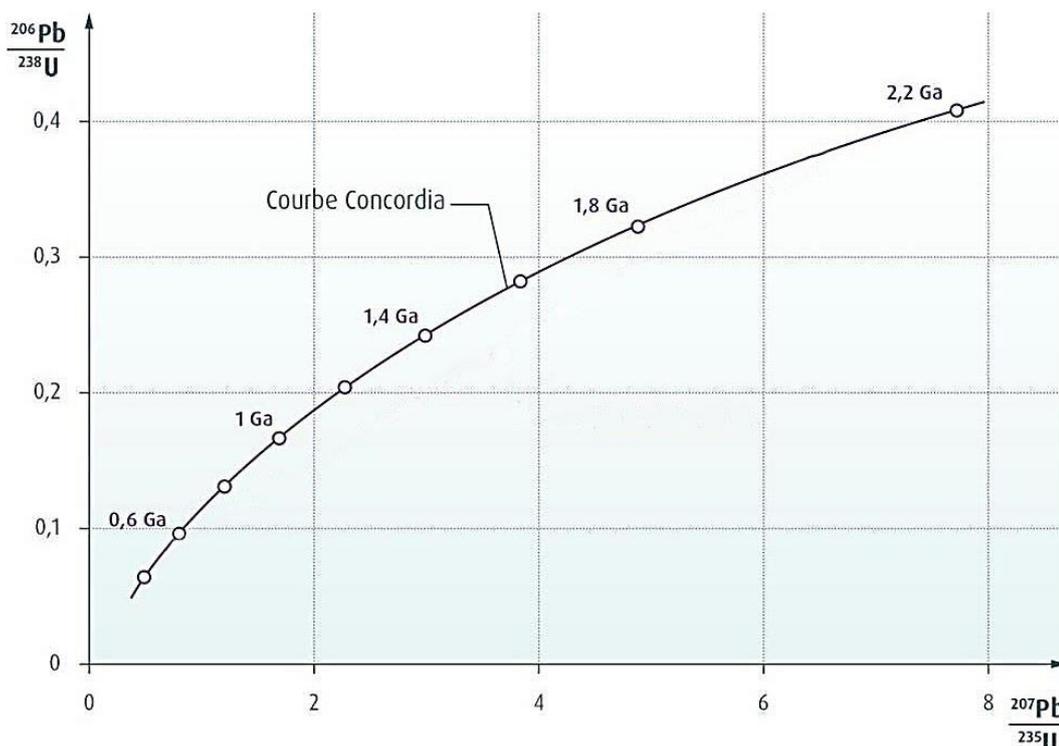
\ln : logarithme népérien

Cette méthode donne un âge avec une précision de l'ordre de 10 Ma. Elle a été utilisée par Jean François Minster et Claude Allègre pour proposer une nouvelle estimation de l'âge de la Terre (voir exercice 5p154).

3- La méthode de la concordia/discordia (p148)

Il est également possible de déterminer l'âge de la Terre avec la méthode Uranium / Plomb (U/Pb). Dans ce cas, l'Uranium ^{238}U se désintègre en ^{206}Pb et ^{235}U se désintègre en ^{207}Pb . Cette méthode est particulièrement adaptée pour des échantillons anciens (entre 0,5 à 5 Ga).

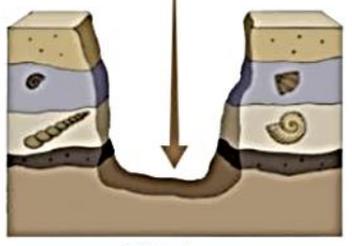
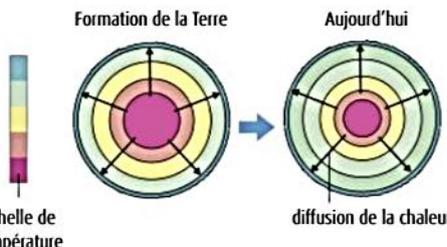
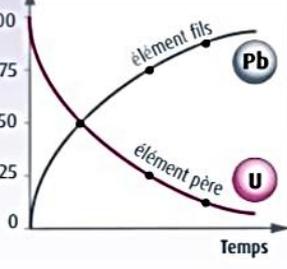
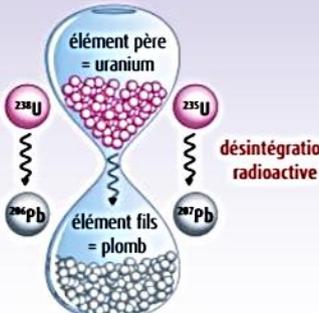
Pour cela, on construit le graphique présentant les variations des rapports $^{206}\text{Pb} / ^{238}\text{U}$ en fonction de $^{207}\text{Pb} / ^{235}\text{U}$, obtenus par le calcul. Cela produit une courbe de référence que l'on appelle concordia (concordance des rapports Pb/U). Sur cette courbe, les âges sont connus (sorte de graduation). Il suffit donc de déterminer les 2 rapports Pb / U d'un échantillon et de placer le point sur la concordia pour lire l'âge de l'échantillon.



Document 7 : Graphique permettant de déterminer l'âge d'une roche par la méthode concordia

Lorsque les points sont en dehors de la concordia, on trace une droite appelée discordia qui recoupe la concordia, ce qui donne l'âge de la roche étudiée.

Dans les années 1950, Clair Patterson a utilisé cette méthode pour étudier des météorites datant de l'âge de la formation de la Terre. L'âge obtenu est de 4,55 milliards d'années (4,55 Ga). C'est l'âge qui est encore admis aujourd'hui.

<p>Antiquité</p>	<p>La Terre a toujours existé</p>	
<p>XVI^e siècle</p>		<p>Le récit de la Genèse</p> <p>➔ Âge de la Terre = quelques milliers d'années</p>
<p>XVIII^e siècle</p>	<p>Les premières démarches scientifiques</p>  <p>➔ Âge de la Terre = quelques dizaines de milliers d'années</p>	
<p>XIX^e siècle</p>	<p>Le temps des polémiques</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="335 1075 869 1489"> <p>Les naturalistes</p> <p>évolution biologique durée d'érosion durée de sédimentation</p>  <p>+ salinité océans</p> <p>➔ Âge de la Terre = plusieurs centaines de millions d'années</p> </div> <div data-bbox="933 1075 1460 1489"> <p>Les physiciens</p> <p>Lois de diffusion de la chaleur appliquées au refroidissement de la Terre</p> <p>Formation de la Terre Aujourd'hui</p>  <p>échelle de température diffusion de la chaleur</p> <p>➔ Âge de la Terre = quelques dizaines de millions d'années</p> </div> </div>	
<p>XX^e siècle</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Découverte de la radioactivité • Mise au point des spectromètres de masse <p>➔ Radiochronomètre</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="758 1624 1061 1937"> <p>% d'éléments</p>  <p>élément fils (Pb)</p> <p>élément père (U)</p> <p>Temps</p> </div> <div data-bbox="1141 1624 1460 1937">  <p>élément père = uranium</p> <p>élément fils = plomb</p> <p>désintégration radioactive</p> </div> </div> <p>➔ Âge de la Terre = 4,55 milliards d'années</p>	