

Datation et Radioéléments

Bernard BERTHIER

DR CNRS

Conseiller Scientifique CEA / LSCE

1976-2013

2013-2015

Directeur de la plateforme Nationale de Mesure du Carbone-14

depuis 2012

Datation et Radioéléments

1896

Becquerel

Découverte de la radioactivité

1902

Rutherford et Soddy

Formalisation de la décroissance radioactive

1905

Rutherford

Utilisation de la radioactivité pour la datation des minéraux

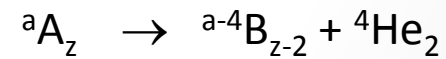
1910

Premières détermination d'âges géologiques absolus

Datation et Radioéléments

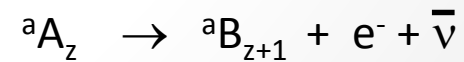
Radioéléments classés en trois types de décroissances radioactives :

α

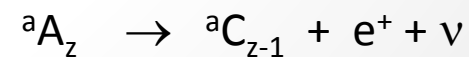


β

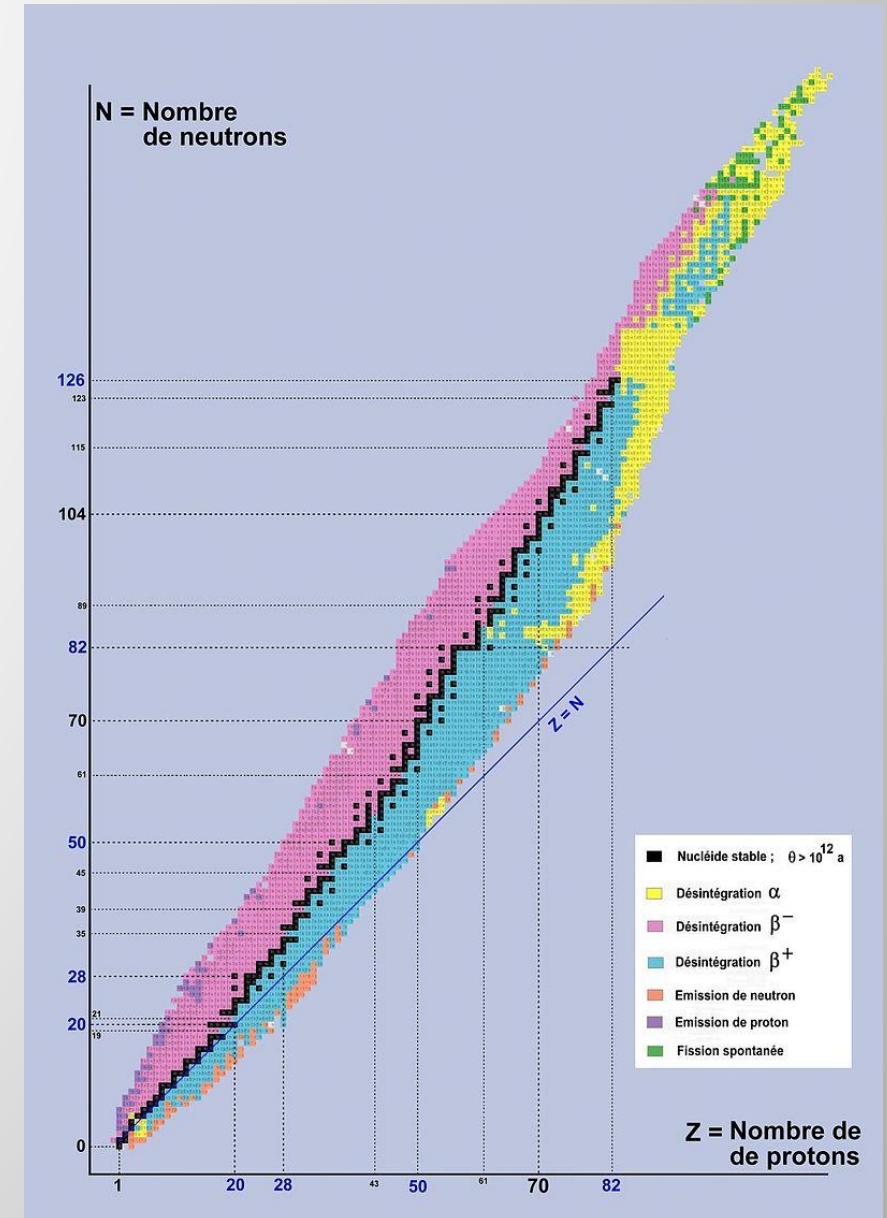
β^-



β^+

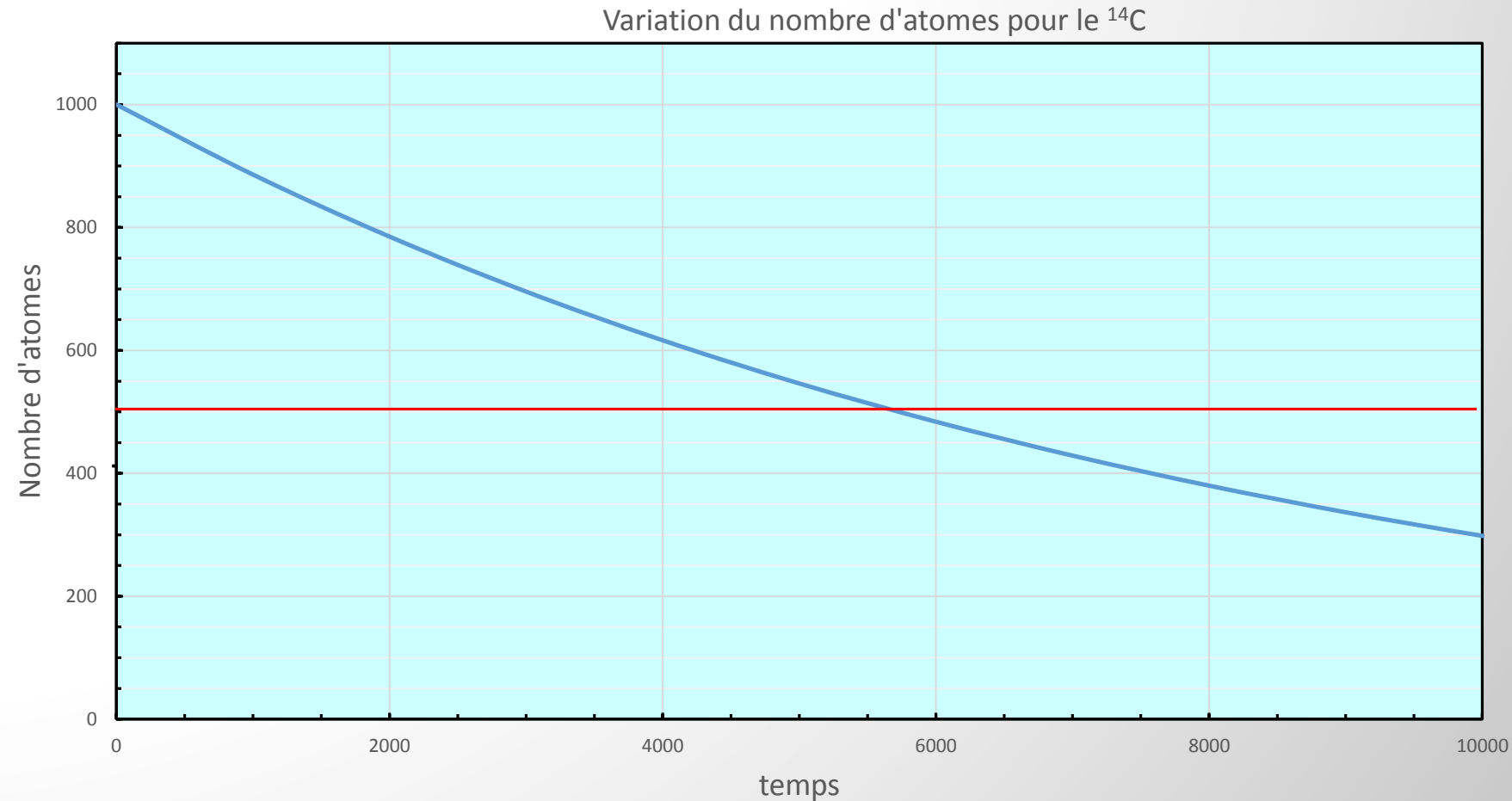


γ



Datation et Radioéléments

Formulation de la décroissance radioactive



Datation et Radioéléments

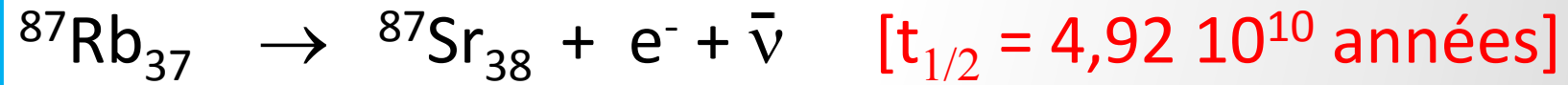
Rubidium Strontium

Éléments chimiques présents à l'état de trace dans les roches

Rb roches riches en sodium et potassium $^{85}, ^{87}\text{Rb}$

Sr roches riches en calcium $^{84}, ^{86}, ^{87}, ^{88}\text{Sr}$

Datation et Radioéléments



Mesure à t

$$({}^{87}\text{Sr}_{38})_t = ({}^{87}\text{Sr}_{38})_0 + [({}^{87}\text{Rb}_{37})_0 - ({}^{87}\text{Rb}_{37})_t]$$

$$({}^{87}\text{Sr}_{38})_t = ({}^{87}\text{Sr}_{38})_0 + ({}^{87}\text{Rb}_{37})_t [e^{\lambda t} - 1]$$

Utilisation du Strontium-86 isotope stable comme référence

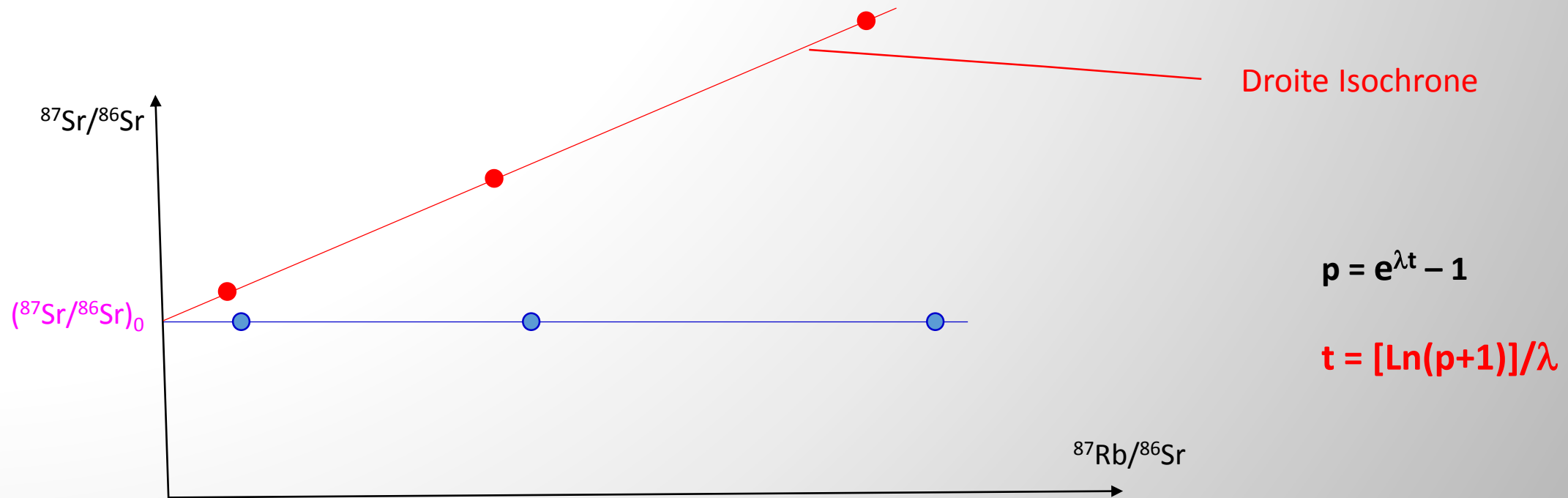
$$({}^{87}\text{Sr}_{38})_t / ({}^{86}\text{Sr}_{38})_t = ({}^{87}\text{Sr}_{38})_0 / ({}^{86}\text{Sr}_{38})_t + ({}^{87}\text{Rb}_{37})_t / ({}^{86}\text{Sr}_{38})_t [e^{\lambda t} - 1]$$

$$({}^{87}\text{Sr}_{38})_t / ({}^{86}\text{Sr}_{38})_t = ({}^{87}\text{Sr}_{38})_0 / ({}^{86}\text{Sr}_{38})_0 + ({}^{87}\text{Rb}_{37})_t / ({}^{86}\text{Sr}_{38})_t [e^{\lambda t} - 1]$$

Datation et Radioéléments

Pour lever l'ambiguïté, mesure sur plusieurs échantillons de différentes roches créées en même temps.

- Même rapport $(^{87}\text{Sr}_{38})/(^{86}\text{Sr}_{38})$ car ces éléments ne sont pas radioactifs
- Rapports différents $(^{87}\text{Rb}_{38})/(^{86}\text{Sr}_{38})$ car roches différentes



$$p = e^{\lambda t} - 1$$

$$t = [\text{Ln}(p+1)]/\lambda$$

Datation et Radioéléments

Rubidium Strontium

Application *datation des roches*

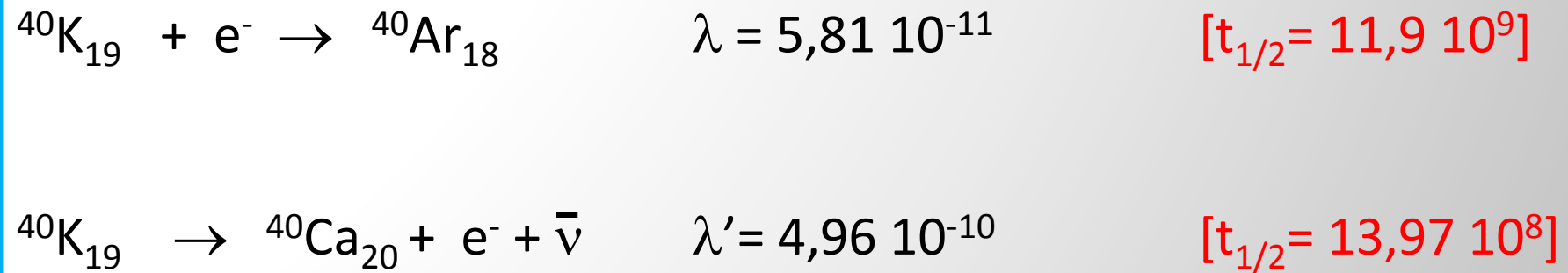
Domaine *quelques centaines de millions d'années (Ma) ; précision 10 Ma*

Méthode *Mesure des isotopes père et fils*
une chaîne de désintégration avec mémoire initiale

Datation et Radioéléments

Potassium Argon

Elément contenant du potassium. Normalement, pas d'argon initial. Il part tant que le système n'est pas fermé ou quand la température est supérieure à 125 °C.



Datation et Radioéléments

Méthode de calcul

Quantités d'argon et de calcium qui apparaissent au cours du temps

$$\frac{d^{40}\text{Ar}}{dt} = \lambda^{40}\text{K} \quad \text{et} \quad \frac{d^{40}\text{Ca}}{dt} = \lambda'^{40}\text{K}$$

Quantité de potassium qui disparaît au cours du temps

$$-\frac{d^{40}\text{K}}{dt} = \frac{d^{40}\text{Ar}}{dt} + \frac{d^{40}\text{Ca}}{dt} = (\lambda + \lambda')^{40}\text{K}$$

$$\frac{d^{40}\text{K}}{^{40}\text{K}} = -(\lambda + \lambda')dt \quad \text{et par intégration}$$

$$^{40}\text{K} = ^{40}\text{K}_0 e^{-(\lambda + \lambda')t} \quad (1)$$

Quantité d'argon créée

$$\frac{d^{40}\text{Ar}}{dt} = \lambda^{40}\text{K} = \lambda^{40}\text{K}_0 e^{-(\lambda + \lambda')t} \quad \text{par intégration}$$

$$^{40}\text{Ar} = ^{40}\text{Ar}_0 + \frac{\lambda}{\lambda + \lambda'} ^{40}\text{K}_0 (1 - e^{-(\lambda + \lambda')t}) \quad (2)$$

la quantité d'argon initiale est nulle

Datation et Radioéléments

La quantité d'argon initiale nulle. En combinant (1) et (2) :

$${}^{40}\text{Ar} = \frac{\lambda}{\lambda + \lambda'} {}^{40}\text{K} (e^{(\lambda + \lambda')t} - 1)$$

On en déduit l'âge en prenant le logarithme :

$$t = \frac{1}{\lambda + \lambda'} \text{Ln} \left[\frac{{}^{40}\text{Ar}}{{}^{40}\text{K}} \frac{\lambda + \lambda'}{\lambda} + 1 \right]$$

Datation et Radioéléments

Potassium Argon

<i>Application</i>	<i>datation des roches magmatiques (la quantité d'argon initiale est nulle)</i>
<i>Domaine</i>	<i>100000 ans à 10 Ma ; précision 20000 ans</i>
<i>Méthode</i>	<i>Mesure des isotopes père et fils, deux modes de désintégration parallèles.</i>

Datation et Radioéléments

Uranium Plomb

Principe

L'uranium n'a pas d'isotope stable. Seuls deux radio-isotopes à durée de vie de quelques milliards d'années sont présents partout sur terre, à l'état de trace, même en milieu marin.

Ces deux isotopes se désintègrent vers deux isotopes stables de plomb

Datation et Radioéléments

Méthode de calcul

On suppose que la roche que l'on veut dater est un milieu fermé. On peut alors écrire

$${}^{206}\text{Pb}_t = {}^{206}\text{Pb}_0 + {}^{206}\text{Pb}_{rad}$$

$${}^{206}\text{Pb}_{rad} = {}^{238}\text{U}_0 - {}^{238}\text{U}_t$$

$${}^{206}\text{Pb}_{rad} = {}^{206}\text{Pb}_t - {}^{206}\text{Pb}_0 = {}^{238}\text{U}_t(e^{\lambda_8 t} - 1)$$

$${}^{207}\text{Pb}_{rad} = {}^{207}\text{Pb}_t - {}^{207}\text{Pb}_0 = {}^{235}\text{U}_t(e^{\lambda_5 t} - 1)$$

$$\frac{{}^{207}\text{Pb}_{rad}}{{}^{206}\text{Pb}_{rad}} = \frac{{}^{235}\text{U}_t(e^{\lambda_5 t} - 1)}{{}^{238}\text{U}_t(e^{\lambda_8 t} - 1)} = \frac{1}{137,88} \frac{(e^{\lambda_5 t} - 1)}{(e^{\lambda_8 t} - 1)}$$

Datation et Radioéléments

$${}^{207}\text{Pb}_{rad} = {}^{207}\text{Pb}_t - {}^{207}\text{Pb}_0$$

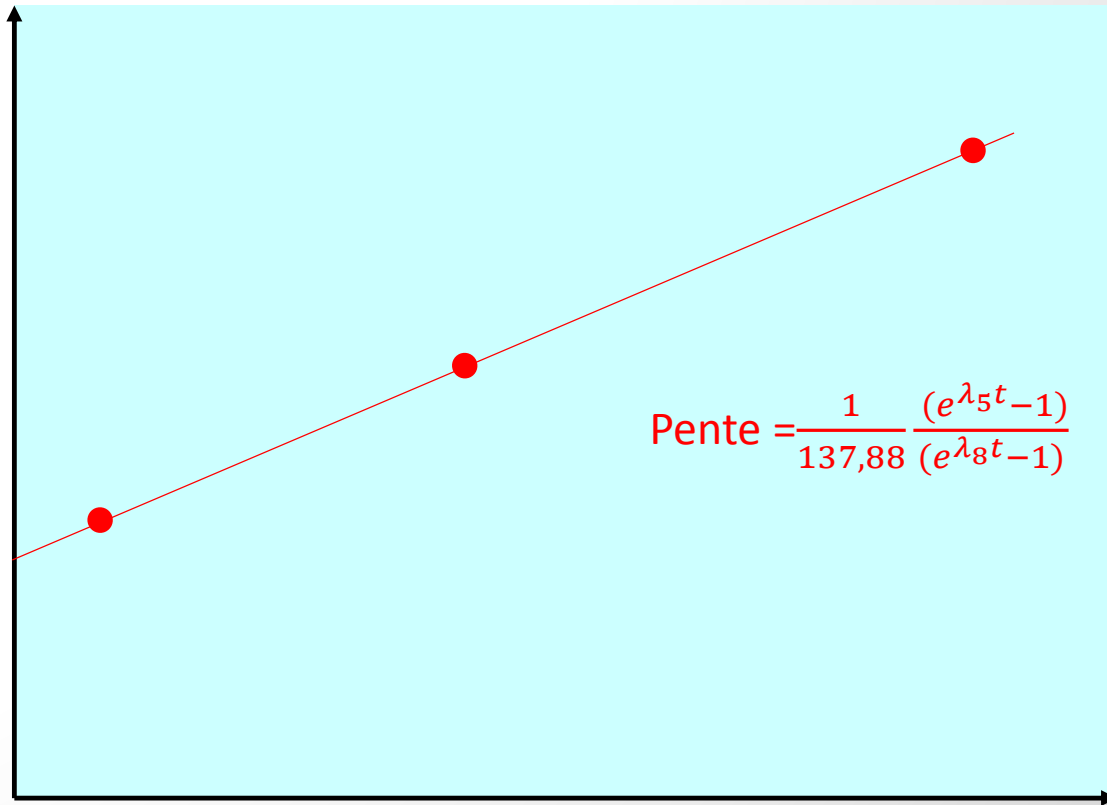
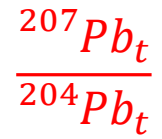
$$= \frac{1}{137,88} \frac{(e^{\lambda_5 t} - 1)}{(e^{\lambda_8 t} - 1)}$$

$${}^{206}\text{Pb}_{rad} = {}^{206}\text{Pb}_t - {}^{206}\text{Pb}_0$$

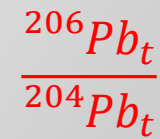
- On ne connaît pas les quantités de plomb 206 et 207 à l'origine. Pour s'en affranchir, on utilisera plusieurs systèmes créés en même temps ayant des concentrations différentes, méthode analogue à celle du Rubidium/Strontium (systèmes Co génétiques).
- Pour déterminer un événement précis, on se normalise avec un isotope stable dont la quantité n'a pas bougé depuis la fermeture du système. Pour cela on prend le ${}^{204}\text{Pb}$.

$$\frac{\frac{{}^{207}\text{Pb}_t}{{}^{204}\text{Pb}_t} - \frac{{}^{207}\text{Pb}_0}{{}^{204}\text{Pb}_0}}{\frac{{}^{206}\text{Pb}_t}{{}^{204}\text{Pb}_t} - \frac{{}^{206}\text{Pb}_0}{{}^{204}\text{Pb}_0}} = \frac{1}{137,88} \frac{(e^{\lambda_5 t} - 1)}{(e^{\lambda_8 t} - 1)}$$

Datation et Radioéléments



$$\text{Pente} = \frac{1}{137,88} \frac{(e^{\lambda_5 t} - 1)}{(e^{\lambda_8 t} - 1)}$$



Datation et Radioéléments

Uranium Plomb

<i>Application</i>	<i>datation des roches, mesure de l'âge de la terre ($4,54 \cdot 10^9 \pm 1 \%$)</i>
<i>domaine</i>	<i>quelques milliards d'années; précision quelques Ma</i>
<i>Méthode</i>	<i>Mesure des rapports isotopiques pères et fils des chaînes de désintégration de deux isotopes.</i>

Datation et Radioéléments

Uranium-234 Thorium-230

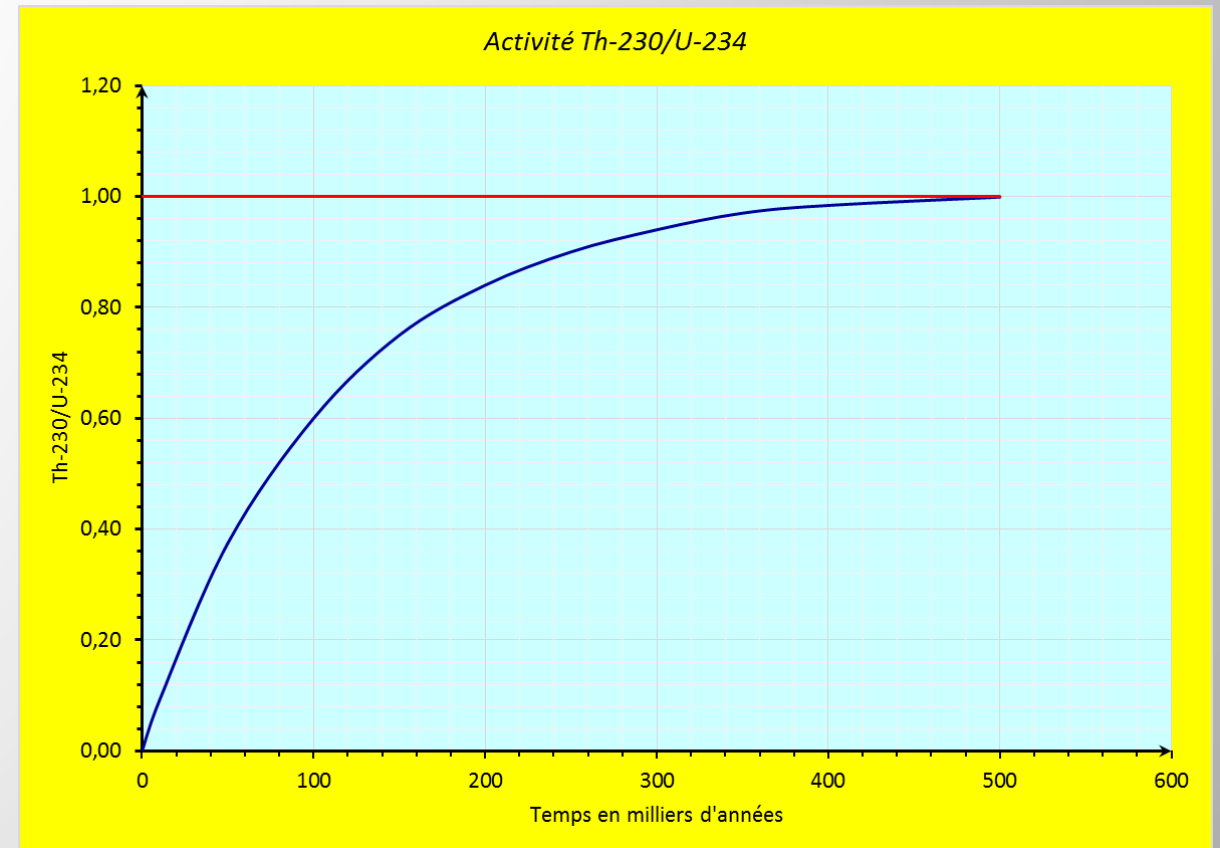
Sédiments marins, stalagmites, carbonates ; domaine 10000 à 350000 ans ; Mesure du rapport isotopique fils/père

Principe

L'uranium contient environ 54 g de ^{234}U par tonne qui se désintègre en ^{230}Th .

- Le thorium n'est pas soluble dans l'eau, il tombe au fond des océans et se retrouve dans les sédiments. Datation des sédiments par la concentration en ^{230}Th .
- En surface, les coraux assimilent l' ^{234}U pendant leur vie. A leur mort, l'uranium décroît en thorium.

Même principe pour la datation d'ossements fossiles et de dents.



Datation et Radioéléments

Mesure par spectrométrie de masse

Application à toutes les méthodes décrites précédemment

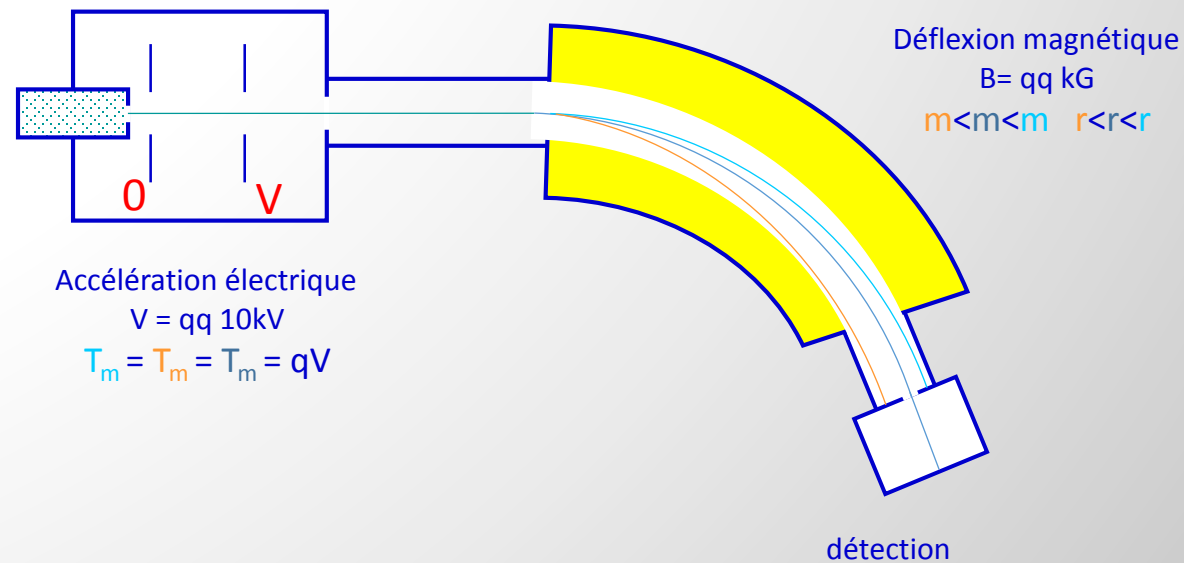
$$\vec{f} = m\vec{\gamma}$$

$\vec{f} = q\vec{E}$ déplacement d'une particule de charge q dans un champ électrique \vec{E}

$$\Rightarrow T = qV$$

$\vec{f} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$ déplacement d'une particule de charge q dans un champ magnétique \vec{B}

$$\Rightarrow B\rho = \sqrt{\frac{2mT}{q^2}}$$



Datation et Radioéléments

Mesure par thermoluminescence

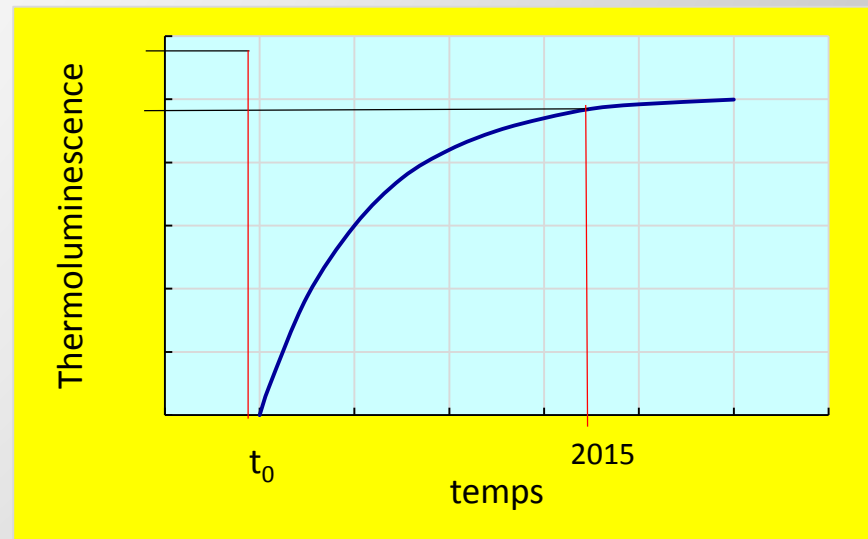
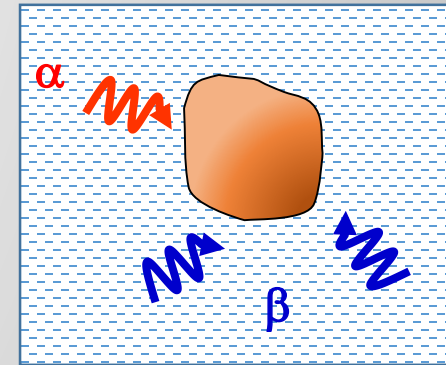
Application aux sédiments, roches, objets d'art, poteries ... objets possédant une structure cristalline.

Le principe est lié aux impuretés dans le réseau cristallin qui piègent les électrons émis lorsque l'objet est soumis à une irradiation. Plus l'objet est soumis à rayonnement, plus il piège d'électrons.

Lorsque l'objet est chauffé, les électrons sont libérés et au cours du réarrangement électronique il y a émission de lumière.

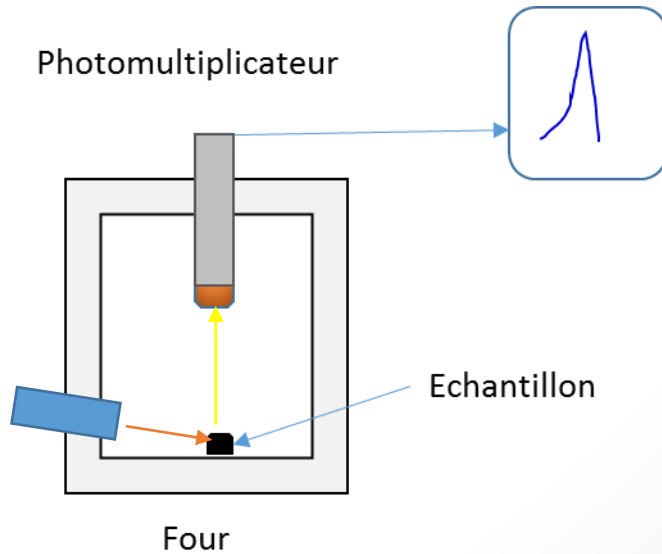
Si l'objet a été chauffé au moment de sa fabrication, le nombre d'électrons piégés dans le cristal est proportionnel à l'âge de l'objet. C'est un autre moyen de mesurer un âge en utilisant un effet secondaire de la présence de radioéléments principalement U, Th et K dans l'environnement de l'objet à étudier.

Objet à structure cristalline

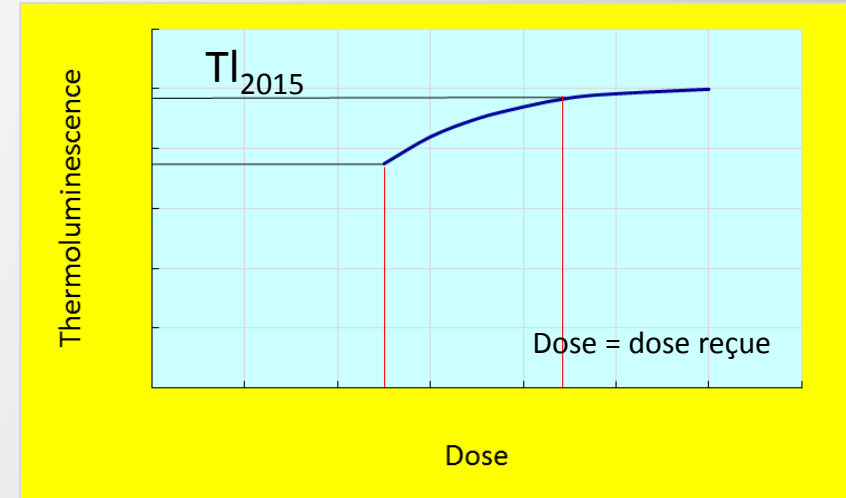


Datation et Radioéléments

1. Mesure de la thermoluminescence par chauffage de l'échantillon. **POSSIBLE UNE SEULE FOIS !!!**



2. Mesure de la thermoluminescence sous irradiation de l'échantillon pour obtenir la dose reçue.

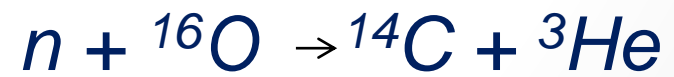
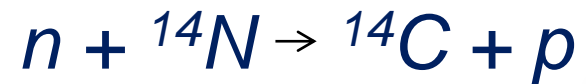


3. Détermination grossière de l'âge par le rapport $\frac{\text{dose reçue}}{\text{dose annuelle (} 5 \cdot 10^{-3} \text{ Gray)}}$
4. Mesure plus précise en mesurant la thermoluminescence de plusieurs échantillons après irradiation avec des doses connues

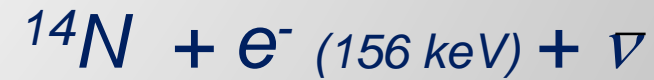
Datation et Radioéléments

Carbone-14

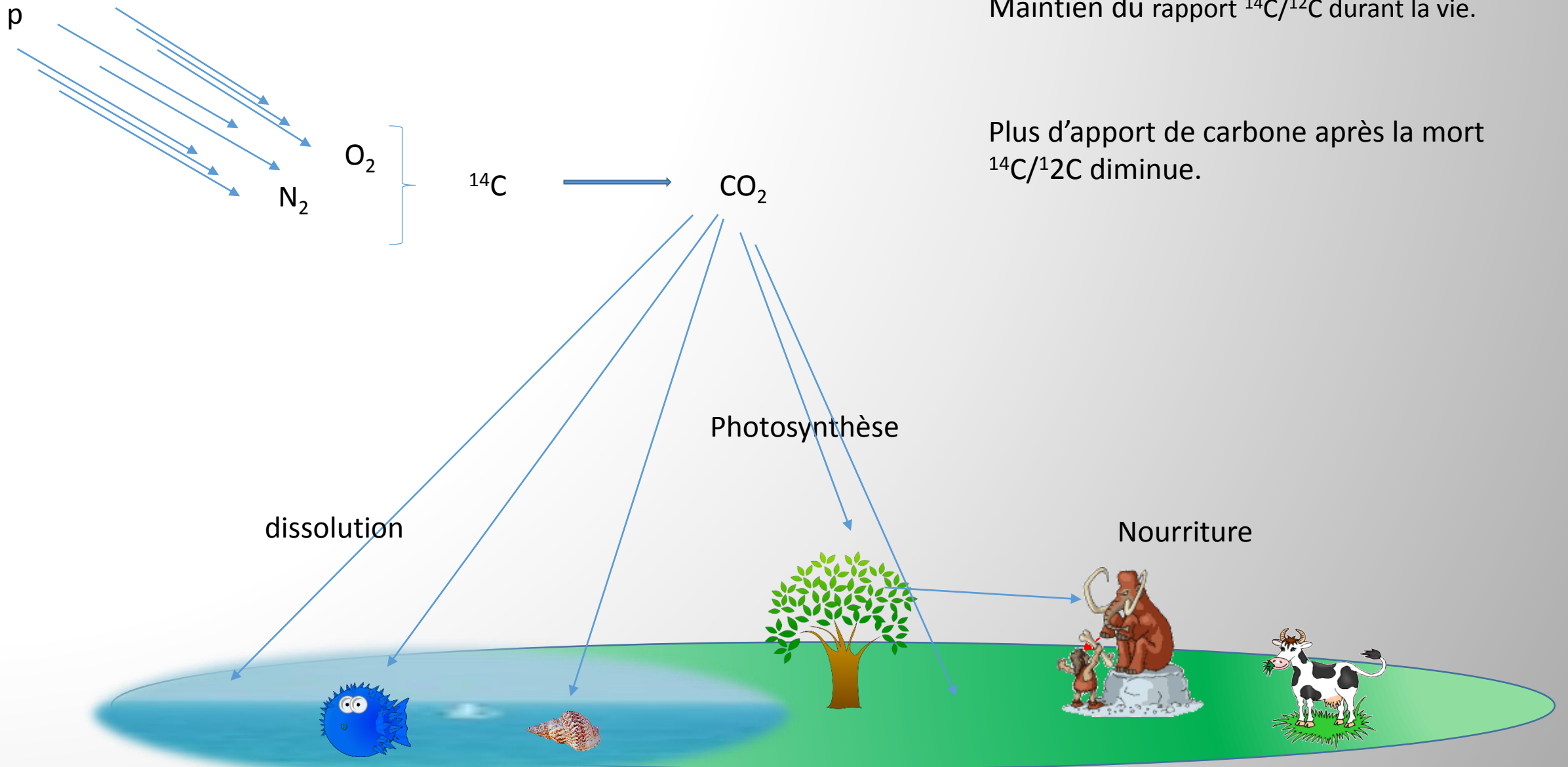
Origine



5730 ans



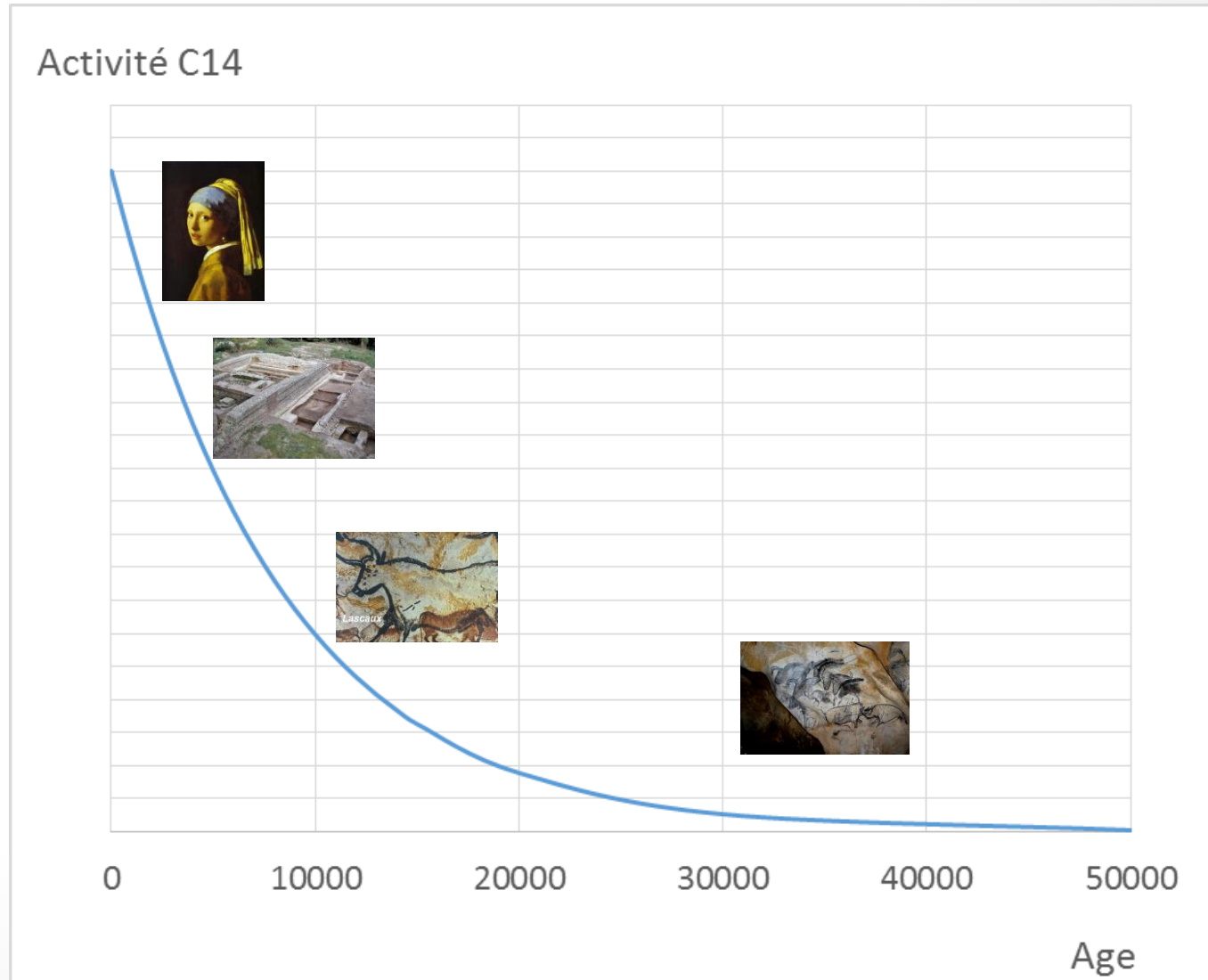
Datation et Radioéléments



Maintien du rapport $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ durant la vie.

Plus d'apport de carbone après la mort
 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ diminue.

Datation et Radioéléments



Mesure du rapport $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ de l'échantillon inconnu qui est proportionnel à son activité I_i .

Mesure du rapport $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ d'un standard connu, de demi vie T , qui est proportionnel à son activité I_0 .

$$t_i = \frac{T}{\ln(2)} \ln\left(\frac{I_0}{I_i}\right)$$

Datation et Radioéléments

Préparation des échantillons

Matières organiques méthode ABA puis combustion

- Suppression de toute pollution inorganique et organique n'appartenant pas à l'objet à dater.
 - Polluants inorganiques éliminés par dissolution dans l'acide chlorhydrique puis rinçage à l'eau déminéralisée.
 - Polluants organiques (acides humiques) solubilisés par trempage dans une solution de soude.
 - Pour éviter un piégeage du CO₂ atmosphérique, on neutralise la soude en plongeant l'échantillon dans un bain d'acide chlorhydrique puis rinçage et étuvage.
- Combustion sous vide du résidu obtenu pour obtenir du CO₂.

Carbonates méthode HCl puis H₃PO₄

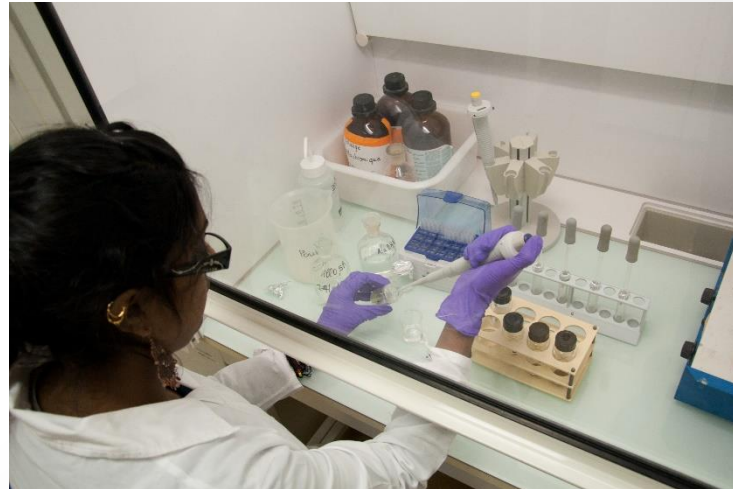
- Suppression de toute pollution organique et inorganique n'appartenant pas à l'objet à dater.
 - Polluants organiques éliminés par dissolution grattage et rinçage.
 - Polluants inorganiques de surface éliminés par trempage dans l'acide chlorhydrique puis rinçage et étuvage.
- Pyrolyse sous vide ($\text{CaCO}_3 + \text{H}_3\text{PO}_4 \rightarrow \text{CO}_2$) pour obtenir du CO₂.

Datation et Radioéléments

Préparation des échantillons



Observation et traitement mécanique



Préparation chimique



Production du CO₂

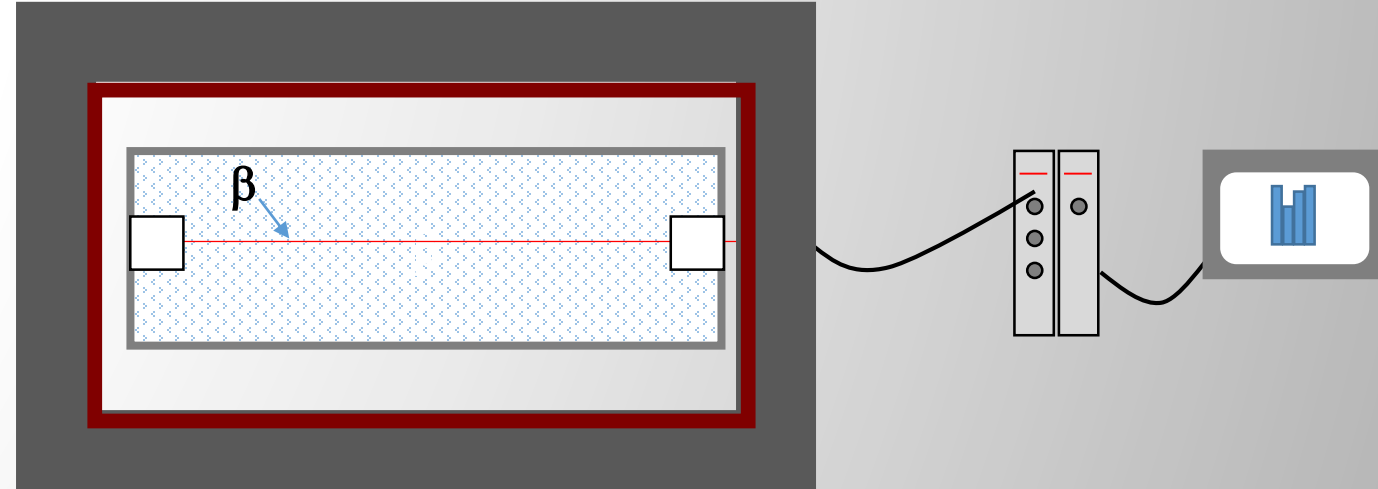
Datation et Radioéléments

Mesure du ^{14}C par décroissance radioactive β^-

Compteurs proportionnels

2l de CO_2 à 5 atm d'où nécessité de quelques grammes de carbone pur.

Protection en béton, plomb et cuivre pour limiter le bruit de fond des rayons cosmiques d'où limite de datation, au mieux 10000 ans.



Compteur à scintillation

- Transformation du CO_2 en benzène C_6H_6
- Ajout de liquide scintillant
- Volume 20 cm^3

- A chaque désintégration il y a émission de lumière mesurée par un photomultiplicateur.



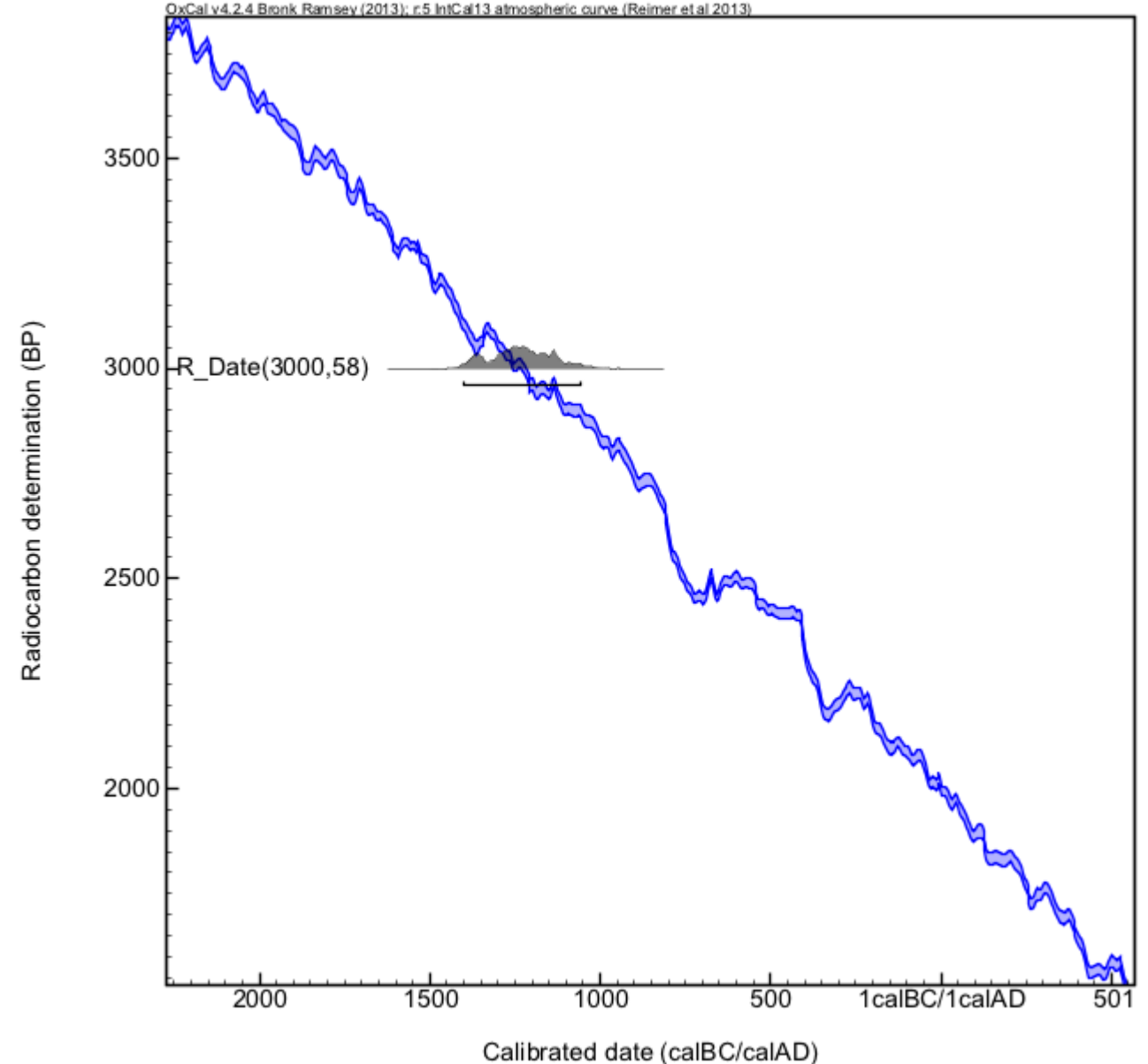
Datation et Radioéléments

Corrections

Le rayonnement cosmique

Variable au cours du temps :

- Variation du champ magnétique terrestre
- Cycles de l'activité solaires à 11 ans et 200 ans
- Explosion de supernovæ



Datation et Radioéléments

Corrections

Fragmentation isotopique dépendante du matériau correction $\delta^{13}\text{C}$

Mécanisme d'incorporation du carbone dépend des organismes. Les isotopes ^{12}C , ^{13}C et ^{14}C sont absorbés avec des taux différents. Ainsi les rapports $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ sont constants pour une nature d'échantillon, mais différents d'une nature à l'autre.

Pour tenir compte de ces différences, il a été pris en référence un rostre de bélemnite du crétacé supérieur (VPDB).

Effet réservoir

Les échanges entre l'atmosphère et la biosphère sont rapides et présentent donc une même activité ^{14}C . Les échanges avec et les océans sont eux beaucoup plus lents. Il y a appauvrissement en ^{14}C dans ces milieux en fonction de la profondeur.

$$\delta^{13}\text{C} = \frac{\left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}}\right)_{\text{écha.}} - \left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}}\right)_{\text{VPDB}}}{\left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}}\right)_{\text{VPDB}}} * 1000$$

Même correction appliquée pour le carbone 14

Une coquille des années 50 a une activité de 12,9 désintégrations par minute et par gramme au lieu de 13,5 à la surface de la terre, ce qui lui donne un âge apparent de 400 ans !!!

Datation et Radioéléments

Ordres de grandeur

Mesure de radioactivité

Carbone moderne 13,5 désintégrations par gramme et par minute
Pour une statistique à 3/1000, 10⁵ désintégrations 5 j

Mesure directe des atomes de carbone

Carbone moderne $\frac{^{14}\text{C}}{^{12}\text{C}} = 10^{-12}$ soit $0,5 \cdot 10^{11}$ atomes de ^{14}C par gramme de carbone.

Dans une source d'ions on peut obtenir des courants de 50 μA de ^{12}C soit $3 \cdot 10^{14}$ ions/s de ^{12}C et $3 \cdot 10^2$ ions/s de ^{14}C
Pour une statistique à 3/1000, il faut 10⁵ atomes 5,5 minutes

Si on fait 10 mesures pour avoir un écart type, on aura utilisé 10^6 atomes à comparer au 10^{11} atomes dans 1 g.

¹⁴N

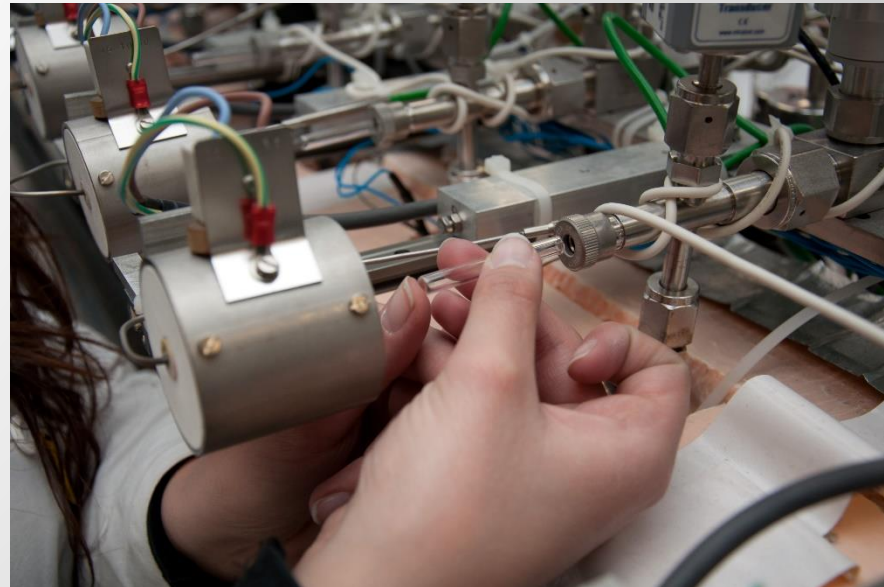
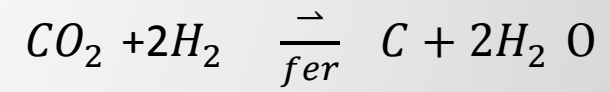
Une mesure directe des atomes de ¹⁴C permet d'utiliser des quantités de l'ordre de 1 mg au lieu d'un gramme de carbone pur et réduit la mesure de 5j à 1h en ayant effectué 10 mesures au lieu d'une.

C'est le but de la SMA

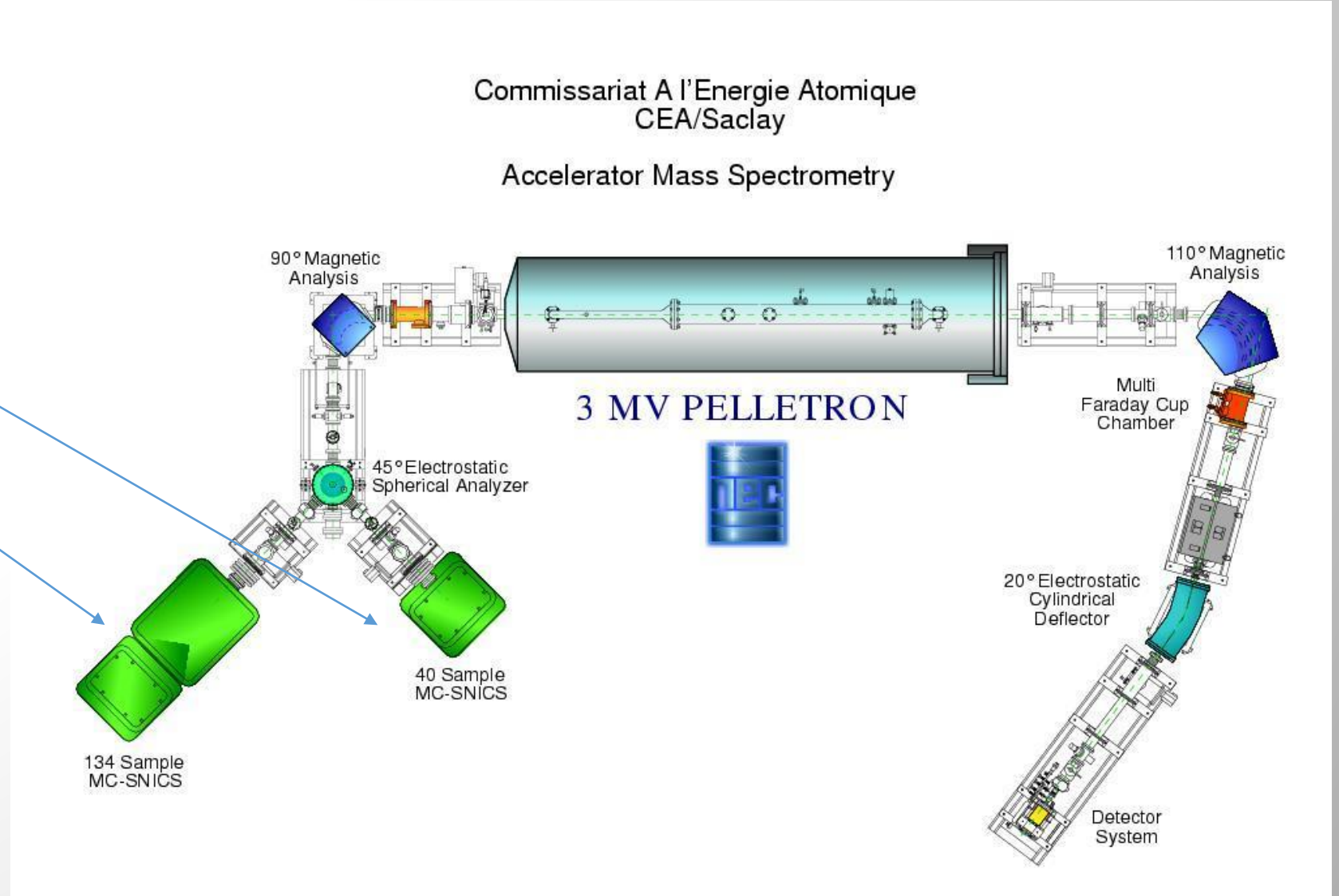
Datation et Radioéléments



Réduction du CO₂ avec comme catalyseur de la poudre de fer



Datation et Radioéléments



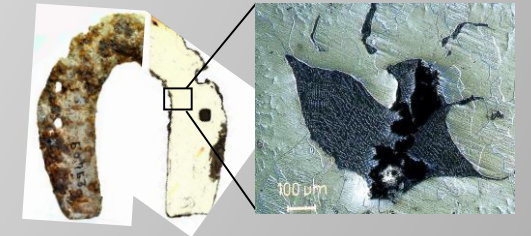
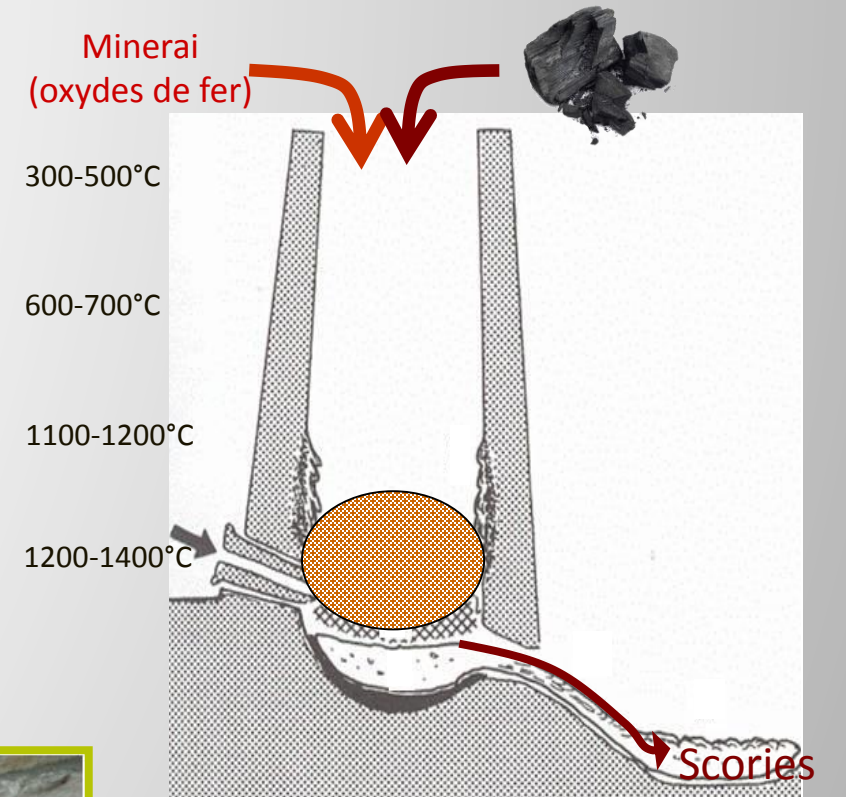
Datation et Radioéléments



Datation et Radioéléments

Du fer dans les monuments !!!

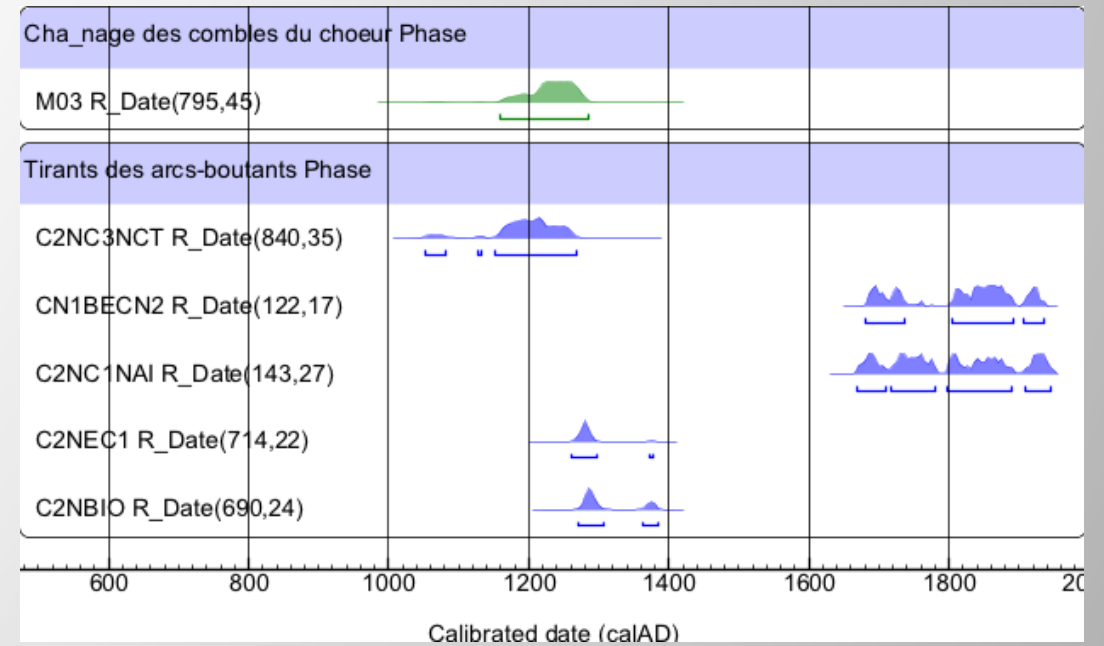
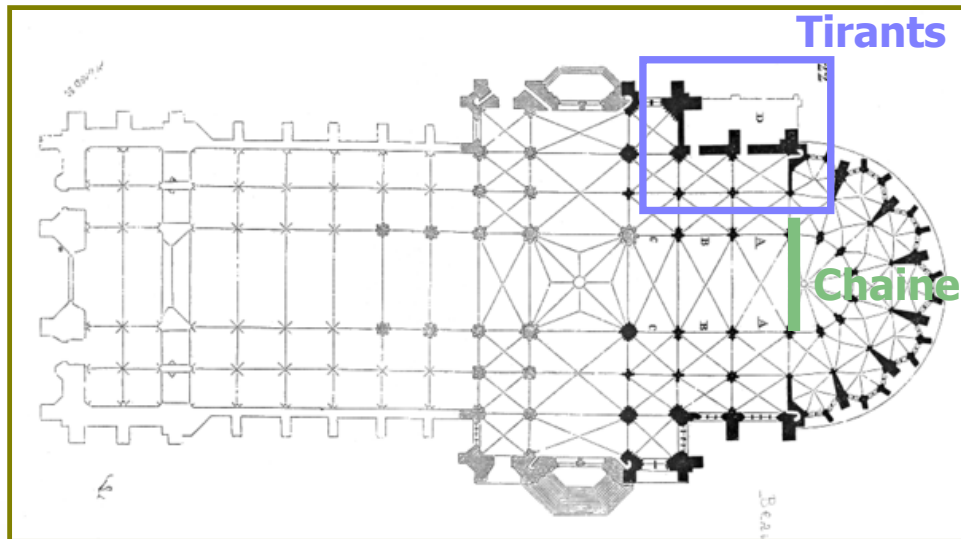
Cathédrale de Beauvais



Datation et Radioéléments

Du fer dans les monuments !!!

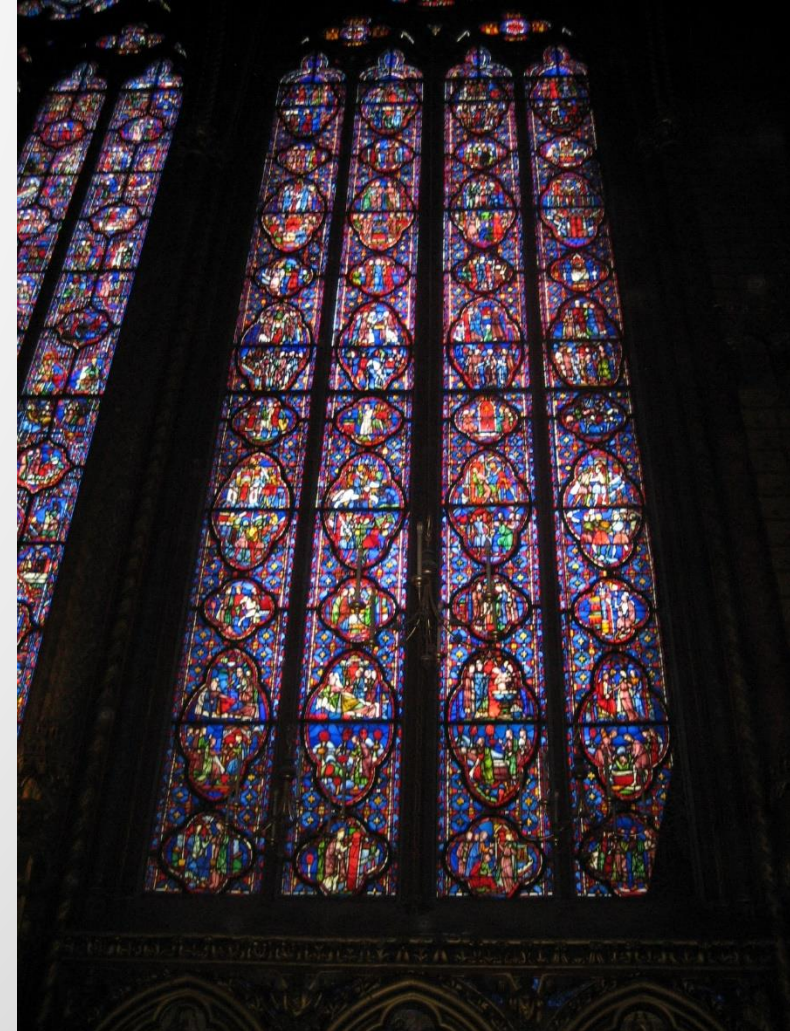
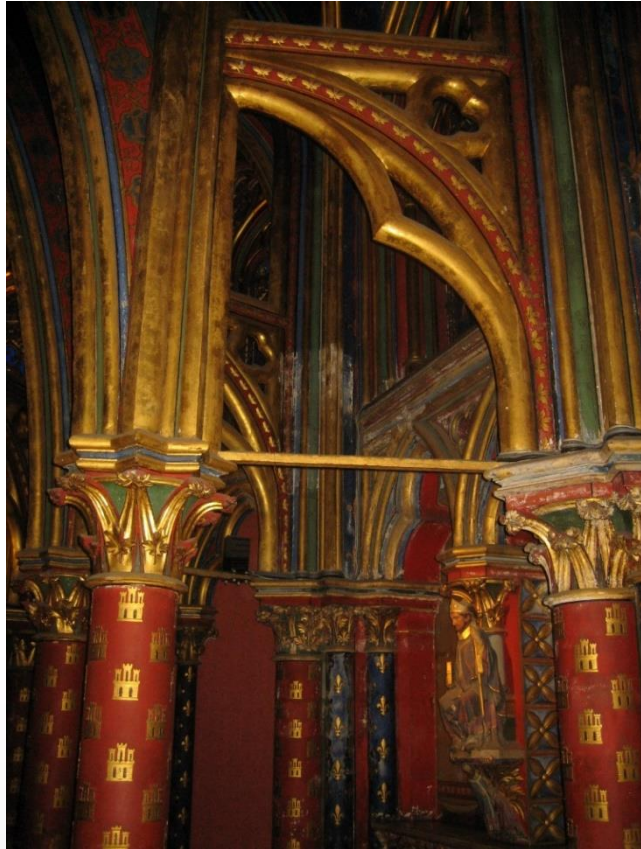
Présence de fer à la construction 13^{ème}
et à la restauration 18^{ème}



Datation et Radioéléments

Du fer dans les monuments !!!

Sainte Chapelle



Datation et Radioéléments

Datation des grottes ornées : Chauvet Pont d'Arc

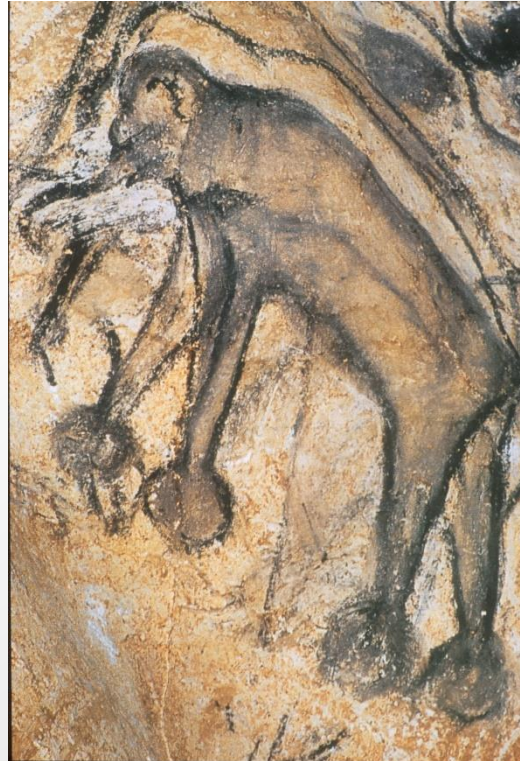


Découverte le 18 décembre 1994 par Jean-Marie Chauvet Éliette Brunel et Christian Hillaire

Datation et Radioéléments



Datation et Radioéléments



Datation et Radioéléments



Datation et Radioéléments



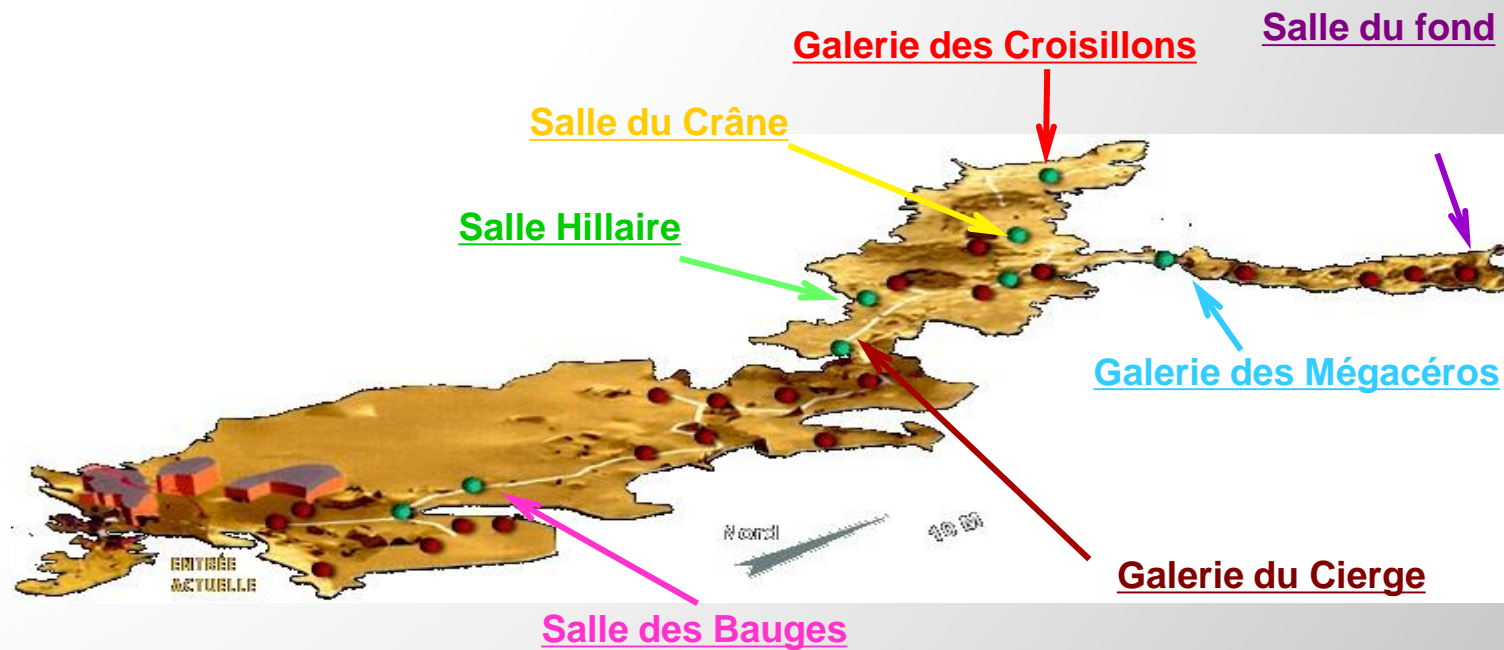
Datation et Radioéléments



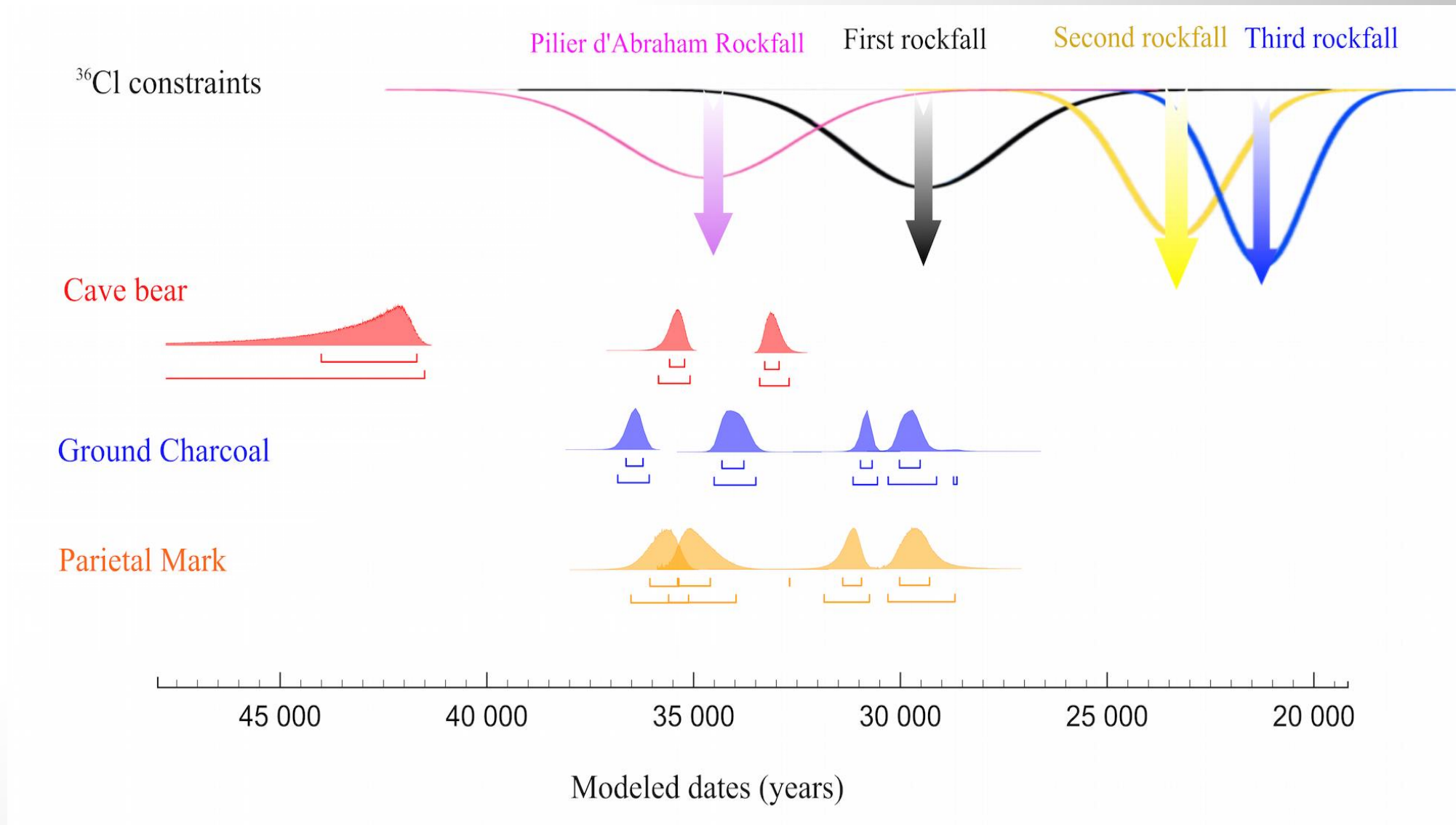
Datation et Radioéléments

Datation de 100 échantillons

- charbons récoltés sur le sol
- 15 peintures
- 14 ponctuations et autres tracés pariétaux



Datation et Radioéléments



Datation et Radioéléments

Carbone-14

Application *Toute matière organique et les carbonates; Archéologie, Climatologie, Géologie, Environnement*

Domaine *aujourd'hui à 50000 ans*

Méthode *Mesure par décroissance radioactive et/ou spectrométrie de masse.*

<http://portail.cea.fr/multimedia/Pages/animations/radioactivite/datation-carbone-14.aspx>