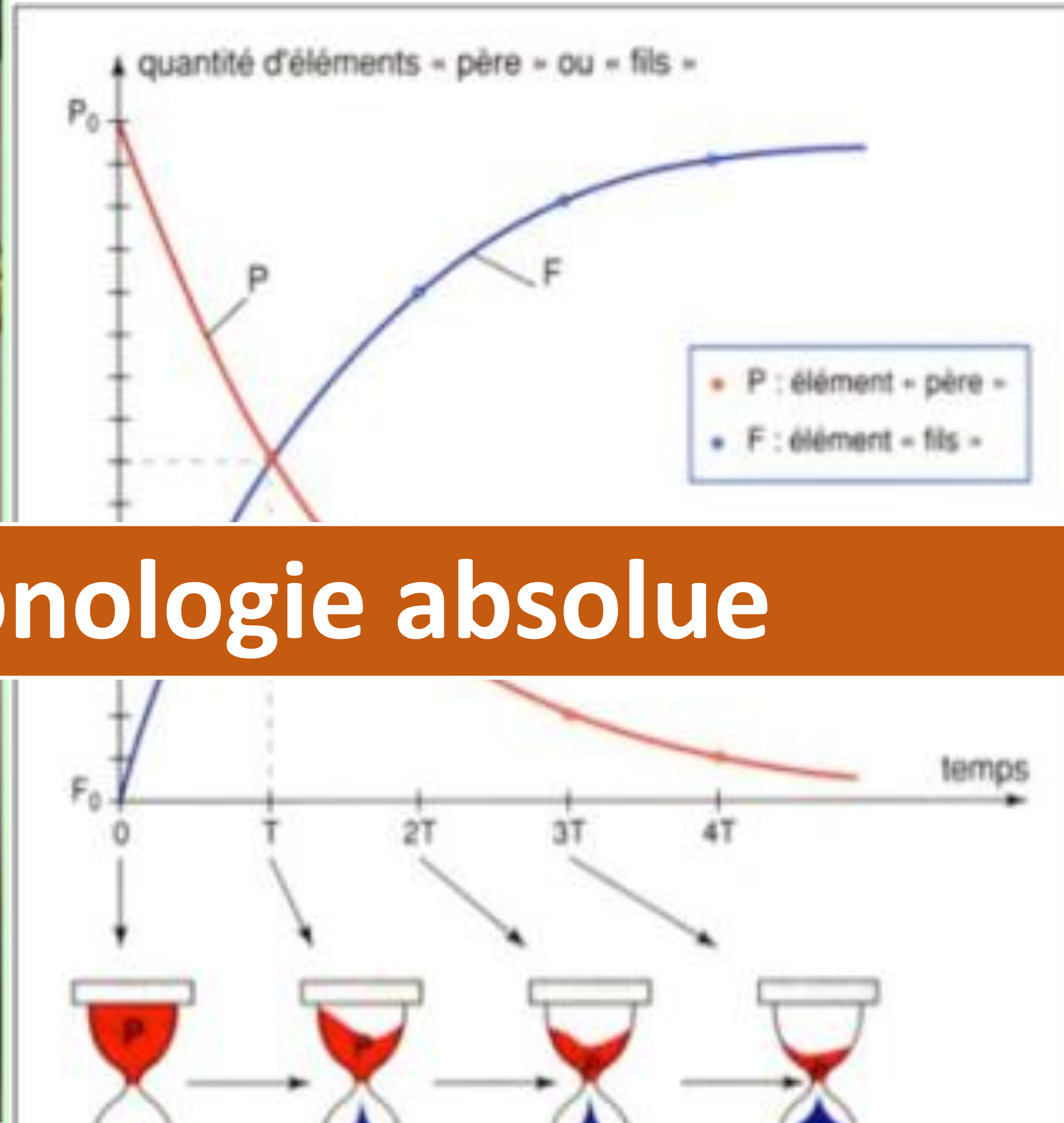
Université Abdelmalek Essaadi
Faculté des Sciences-Tétouan
Département de Géologie

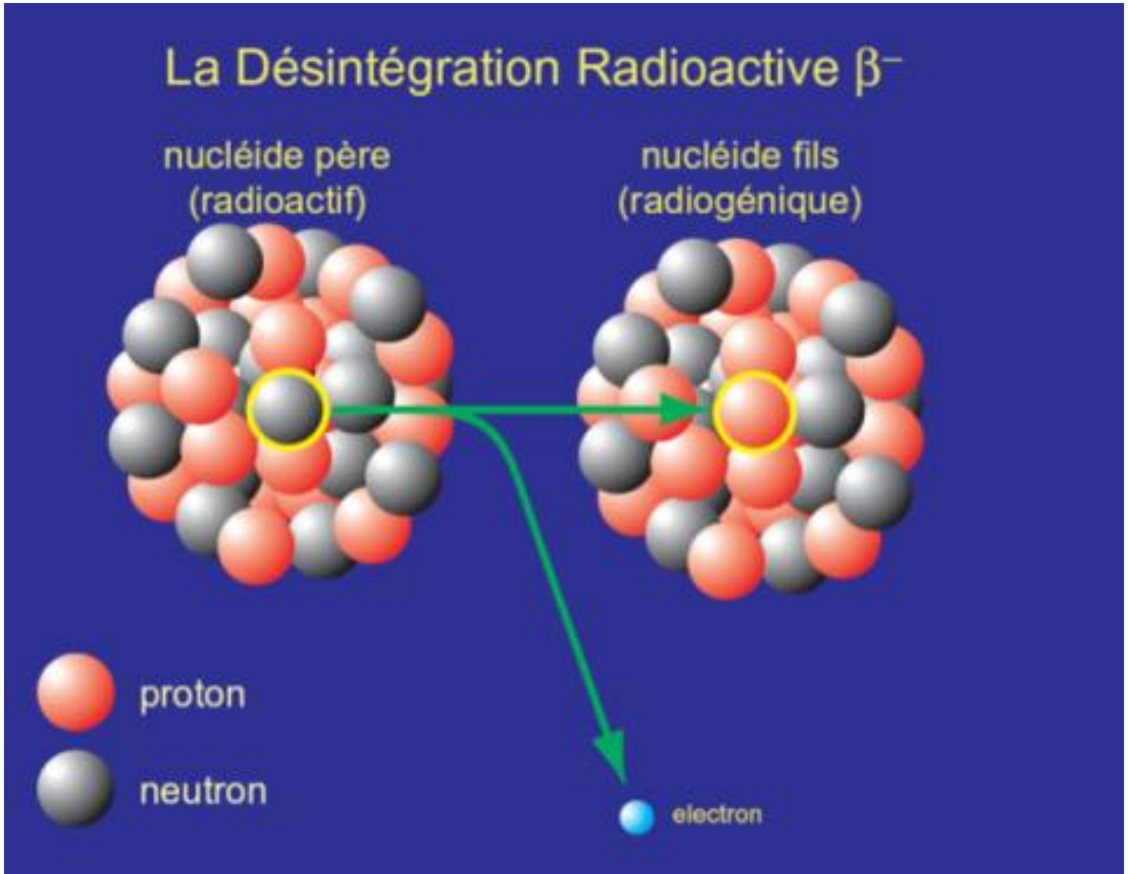


TD3: chronologie absolue

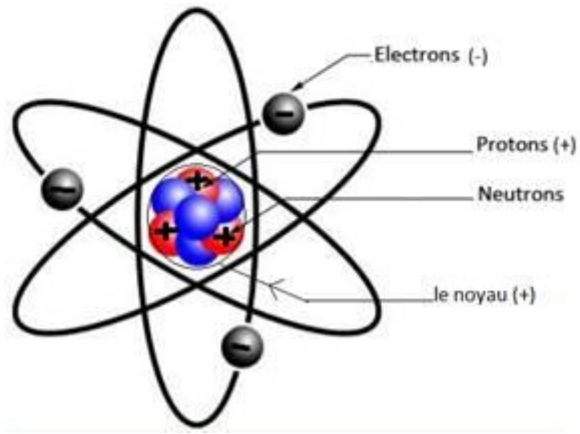
I- Introduction

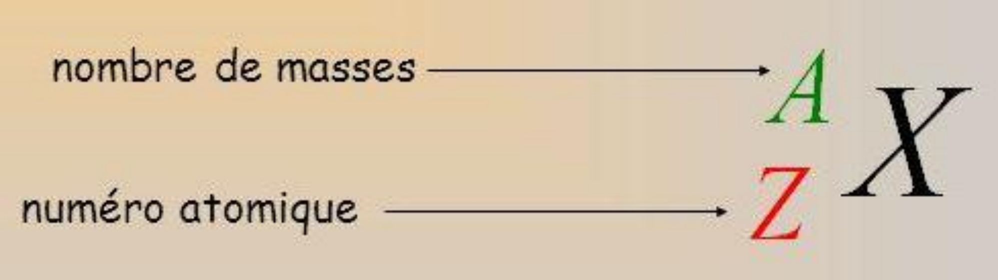
La **radiochronologie** = datation qui aboutit à un résultat chiffré (exprimé en années) qui peut venir en complément ou en opposition d'une datation relative.

Elle se **base sur le principe de la désintégration radioactive** de certains éléments chimiques dits radioactifs en éléments stables.



II- Rappels fondamentaux : structure atomique



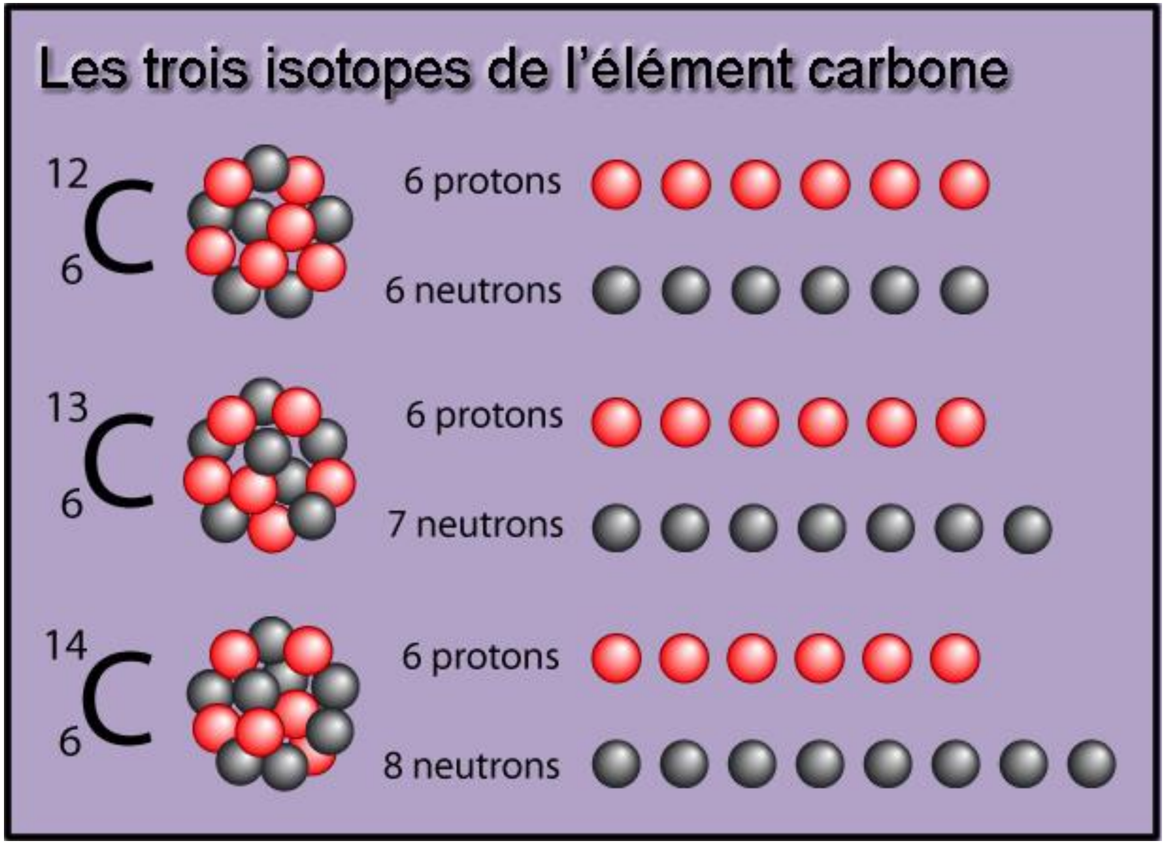


Z c'est le **nombre de protons** présents dans le noyau.
N est donc le **nombre de neutrons** du noyau.
A est le **nombre de nucléons** A=Z+N.

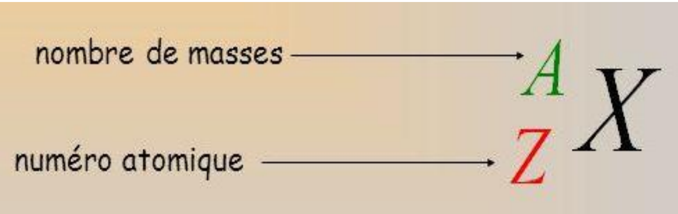
II- Rappels fondamentaux : isotopes

Les isotopes sont des atomes ayant le **même nombre atomique Z**, mais un **nombre différent de neutrons** (**N**), donc des nombres de masse **A différents .**

Exemple :



A=Z+N



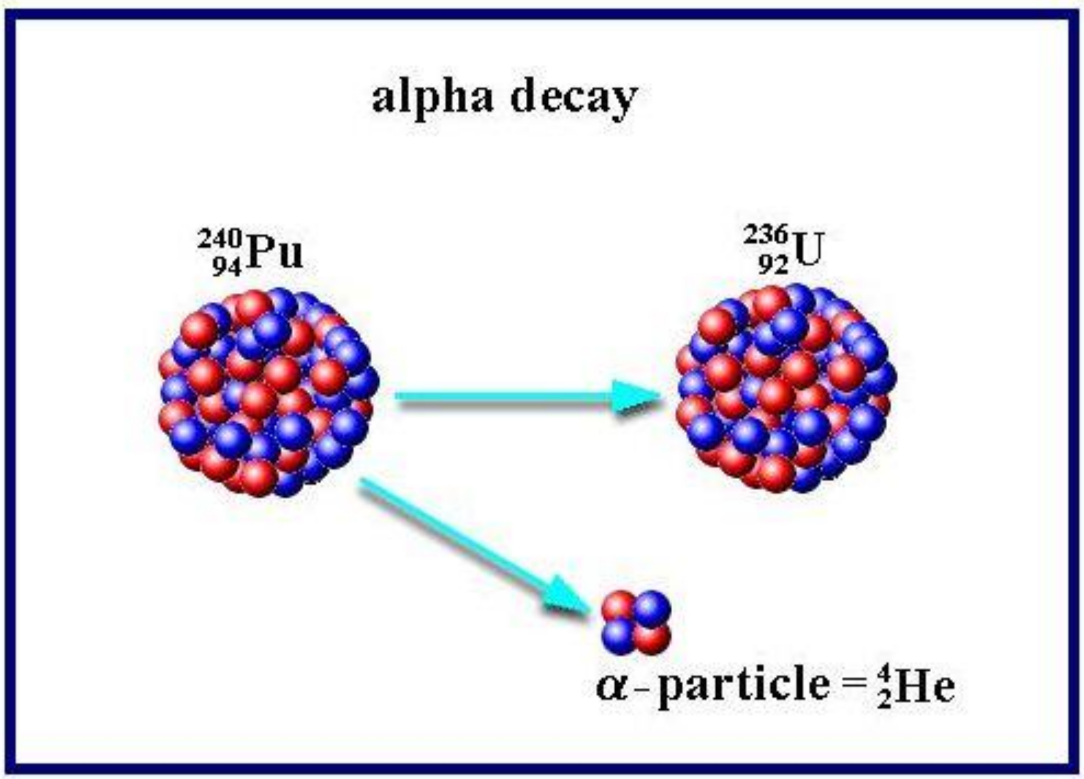
- Isotopes **instables**= les atomes dont le nombre des **neutrons est supérieur à celui des protons** (**N >P**) exemple ^{14}**C**.

III- Comportement des atomes instables :

Les **éléments instables** sont des éléments **radioactifs** qui se **désintègrent spontanément** pour donner des éléments stables ou **radiogéniques**.

La désintégration se fait par émission de :

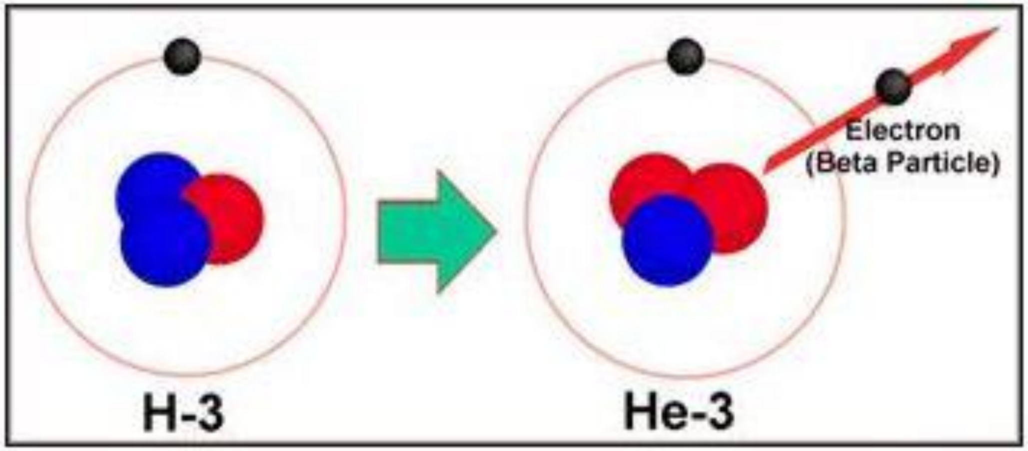
- **Rayonnement α :** éjection d'un noyau d'hélium $^{4}_{2}He^{2+}$



Z diminue de 2 et A diminue de 4.

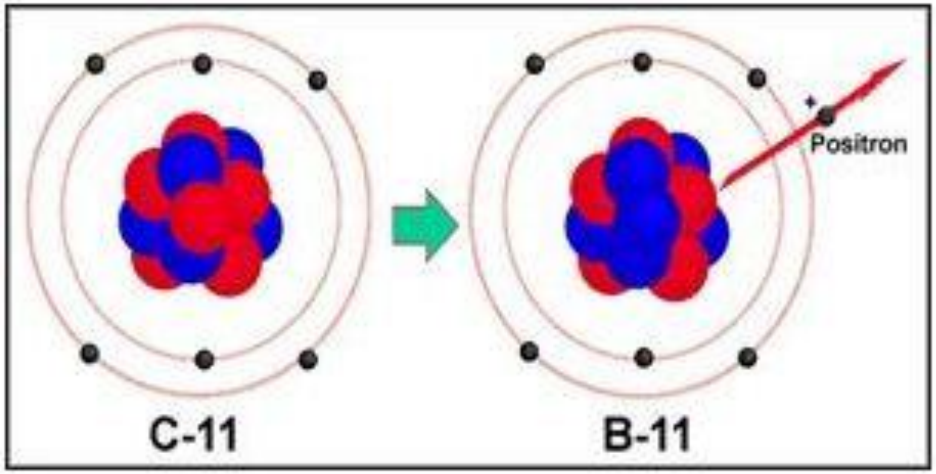
III- Comportement des atomes instables :

- **Rayonnement ß⁻ :** le noyau éjecte un électron chargé négativement.



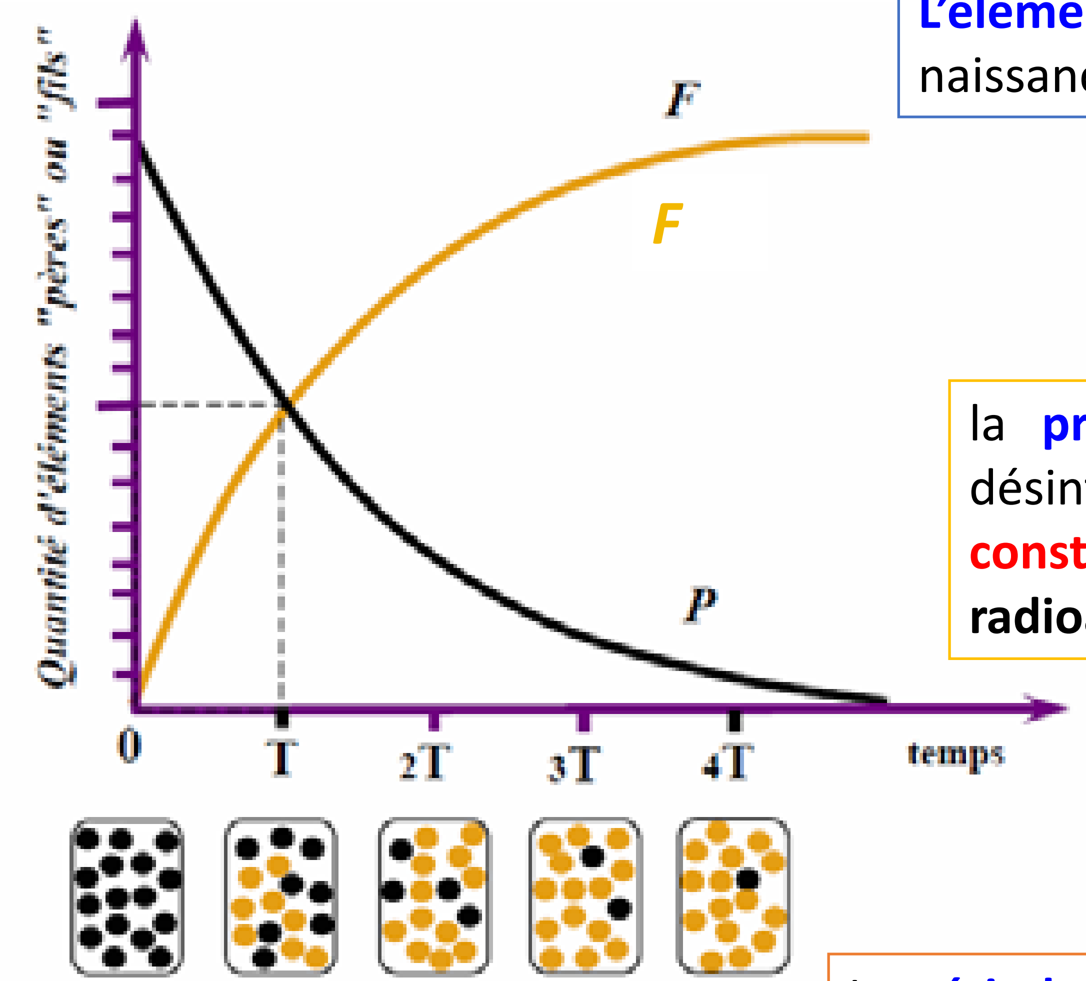
Z augmente de 1 et A est constant

- **La radioactivité β^+ :** le noyau éjecte un positon (même masse que l'électron mais chargé positivement.



Z diminue de 1 et A est constant

II- Comportement des atomes instables :



L’élément père (**P**) se **désintègre** et donne naissance à un **élément fils** (**F**).

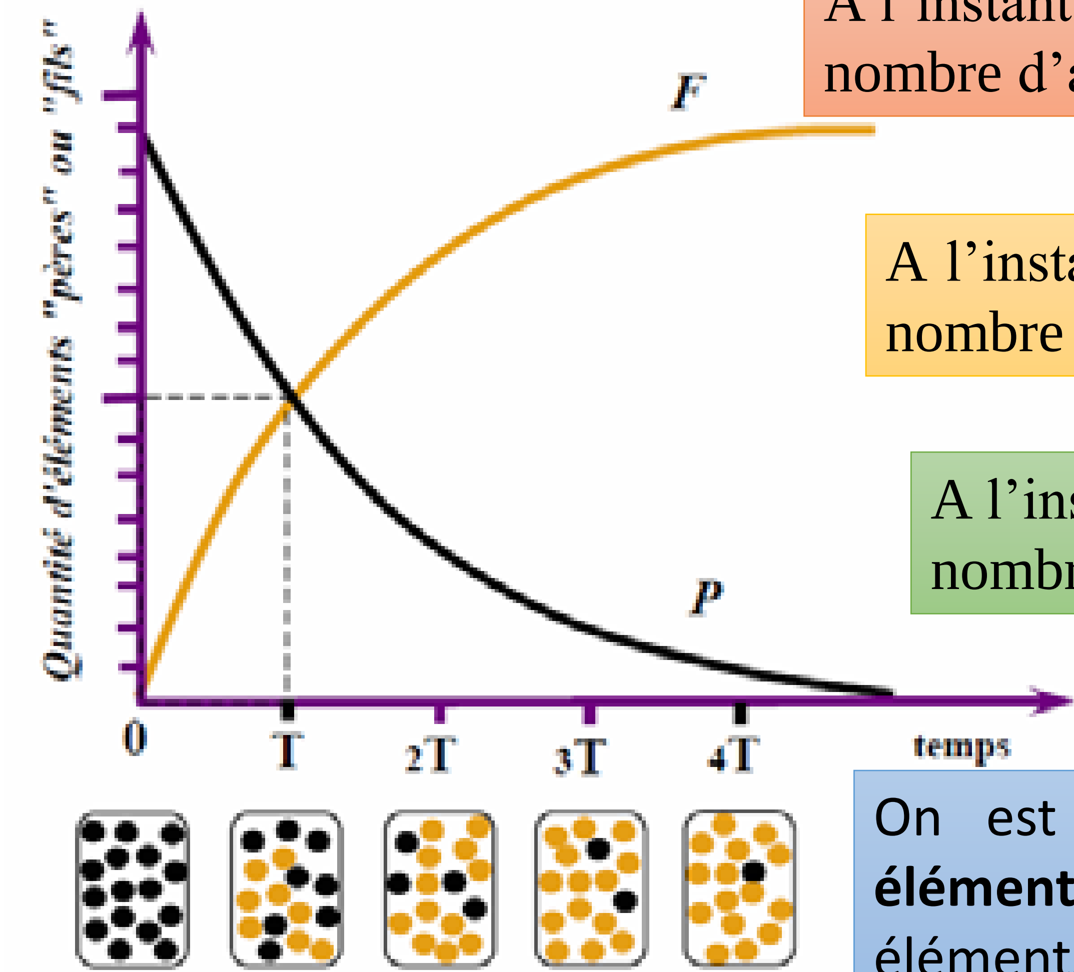
la **proportion** d’atomes pères qui se désintègrent **par unité de temps** est une **constante** appelée, **"la constante radioactive (λ).**

La **période T** correspond au **temps** nécessaire à la **désintégration de la moitié des éléments pères**.

III- Comportement des atomes instables

A l'instant **T=0,** le nombre d'atomes pères **= 16,** nombre d'atomes fils **= 0.**

A l'instant **T,** le nombre d'atomes pères **= 8,** nombre d'atomes fils **= 8.**



A l'instant **2T**, le nombre de **P = 4** et le nombre de **F = 12**.

A l'instant **3T**, le nombre **de P = 2** et le nombre de **F =14**.

On est parti d'un **système avec 16 éléments** isotopiques il reste toujours 16 éléments = **système est fermé (**pas d'apport extérieur ni perte).

IV- loi de désintégration :

La désintégration de l'élément P suit une loi exponentielle exprimée par l'équation suivante :

$$\boxed{P = P_0\, e^{-\lambda t}}$$

Où :
P est le nombre d'atomes pères à l'instant t.
P_0 est le nombre d'atomes pères à l'instant t_0
λ est la constante de désintégration de l'élément radioactif exprimé en (an-1).

$$e^{\lambda t} = \frac{P_0}{P} \rightarrow \lambda t = \ln\left(\frac{P_0}{P}\right) \rightarrow \boxed{t = \frac{1}{\lambda}\ln\left(\frac{P_0}{P}\right)}$$

P peut être mesuré dans l'échantillon par spectromètre de masse .
P_0 inconnu car variable d'une roche à l'autre.

Donc équation à 2 inconnues t et P_0

IV- loi de désintégration :

Mais en réalité dans une roche on mesure le nombre d'éléments Pères **P** et fils radiogénique **F** Avec $\mathbf{P_0 = P + F}$

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{P+F}{P} \right) \longrightarrow t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(1 + \frac{F}{P} \right)$$

Or le nombre d'isotope fils total a un instant t (F_t) est égal a la somme des isotope fils initiaux (Fo) et des isotopes fils radiogéniques (F) :

$$\mathbf{F_t = F_0 + F}$$

L'âge sera :

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(1 + \frac{F_t - F_0}{P} \right)$$

IV- loi de désintégration :

Chaque élément radioactif, est aussi, caractérisé par sa **période** ou **demi-vie T** = temps nécessaire pour que la moitié de l'élément père P soit désintégrée

A l'instant **T :**

$$P_T = P_0/2 = P_0\, e^{-\lambda T}$$

$$1/2 = e^{-\lambda T} \rightarrow 2 = e^{\lambda T} \rightarrow \lambda T = \mathrm{Ln}2$$

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

Plus la demi vie sera grande, (plus l'élément chimique se désintègre lentement), plus l'élément radioactif permettra de dater des événements anciens.

IV- loi de désintégration :

Equations à retenir

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{P_0}{P} \right)$$

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(1 + \frac{F}{P} \right)$$

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(1 + \frac{F_t - F_0}{P} \right)$$

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

V- conditions d'utilisation de la radiochronologie :

1. **Système fermé:** l'échantillon n'a pas fait **d'échange avec l'extérieur càd** ni apport ni perte des élément fils et père.

2. Choix du couple de datation est fonction de la **période de temps** que l'on cherche à explorer (**(1/100).T < t < 10.T**). Pour dater des événements récents on utilise des radiochronomètres à faible T et vice versa.

COUPLES d'ISOTOPES	PERIODES	AGES MESURES
^{236}U / ^{206}Pb	4,47 Ga	> 25 Ma
^{87}Rb / ^{87}Sr	48,8 Ga	>100 Ma
^{40}K / ^{40}Ar	1,31 Ga	1 à 300 Ma
^{14}C / ^{14}N	5730 ans	100 à 50 000 ans

Chronologie absolue: Méthode du ^{14}C

Le carbone existe sous trois **isotopes** : ^{12}C et ^{13}C sont stables ; et radioactif ^{14}C. Le ^{14}C est produit en haute atmosphère par l'action du rayonnement cosmique sur ^{14}N.

$$^{14}_{7}N \xrightarrow{\text{rayonnement}} {}^{14}_{6}C + {}^{0}_{1}e \quad \beta^{+}$$

Par ailleurs, le ^{14}C se désintègre en ^{14}N.

$$^{14}_{6}C \longrightarrow {}^{14}_{7}N + {}^{0}_{-1}e \quad \beta^{-}$$

Il y a **équilibre** entre production et désintégration du ^{14}C, son taux dans l'atmosphère est constant. Le ^{14}C est absorbé par les êtres vivants (photosynthèse et nourriture). Ainsi tout être vivant contient un rapport ^{14}C / ^{12}C qui reste constant durant toute sa vie.

Lorsqu'un être vivant meurt, le ^{14}C n'est plus renouvelé et le système est fermé. Le ^{14}C qu'il contient se désintègre en ^{14}N (volatile et quitte le système) et la quantité de ^{14}C diminue avec le temps. Il en est de même du rapport ^{14}C / ^{12}C.

Chronologie absolue: Méthode du ^{14}C

Pour dater un échantillon organique (os, cheveux, bois, coquille) :
Le rapport initial de ^{14}C / ^{12}C est connu au moment de la fermeture du système, il est à celui de l'atmosphère.
On mesure au spectromètre de masse le rapport ^{14}C / ^{12}C restant dans l'échantillon

$P = P_0 e^{-\lambda t}$ s'écrit ainsi $({}^{14}C/{}^{12}C)_t = ({}^{14}C/{}^{12}C)_0 \, e^{-\lambda t}$

Rapport mesuré dans un échantillon organique

Rapport constant et connu dans l'atmosphère

$$\boxed{t = (1/\lambda) \ln \left(({}^{14}C/{}^{12}C)_0 \, / \, ({}^{14}C/{}^{12}C)_t \right)}$$

T=5730ans

Comme la période ou demi-vie $T = \dfrac{\ln 2}{\lambda} = \dfrac{0.693}{\lambda}$ $\quad \lambda = \dfrac{0.693}{T} = 1.21 * 10^{-4}$ ans

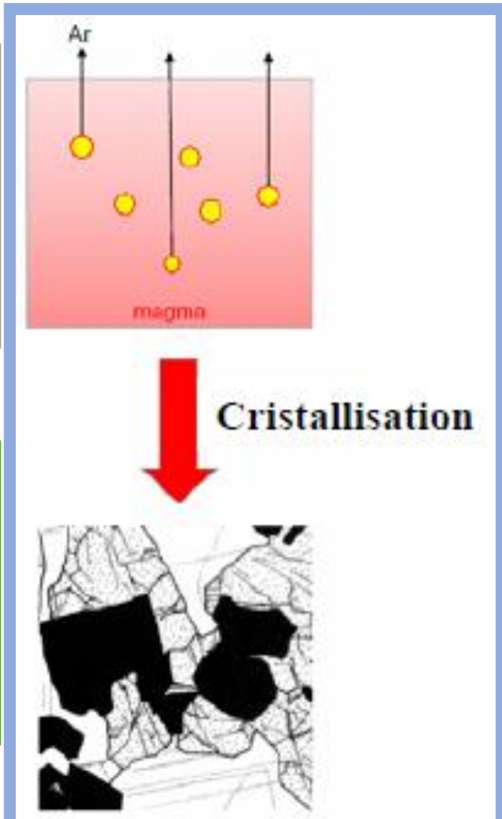
Donc l'âge obtenu par la méthode du ^{14}C, c'est l'âge de la mort de l'organisme.

Chronologie absolue:Méthode Potassium – Argon.

Cette méthode se base sur la désintégration de l'isotope ^{40}K en ^{40}Ar, pour dater les roches magmatiques (minéraux riches **en K).**

Principe :

dans un magma liquide et chaud, ^{40}Ar, gaz produit par désintégration du ^{40}K, remonte vers la surface et s'échappe dans l'atmosphère. Donc dans ce magma la quantité de ^{40}Ar est toujours nulle : Système ouvert.



Quand le magma se refroidit et se transforme en roches, le ^{40}Ar issu de la désintégration du ^{40}K reste emprisonné dans les cristaux. La roche cristallisée constitue un système fermé.

Le rapport ^{40}Ar / ^{40}K augmente donc avec le temps. Ainsi, on peut dater la cristallisation du magma, la formation de la roche.

Chronologie absolue: Méthode (40K/40Ar).

Comme la quantité initiale de l'^{40}Ar (F_0) lors de la fermeture du système est nulle, l'équation de désintégration devient :

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln\left(1 + \frac{F_t - F_0}{P_t}\right) \longrightarrow t = \frac{1}{\lambda} \ln\left(1 + \frac{F_t}{P_t}\right)$$

On mesure par spectromètre de masse la quantité d'atomes fils ^{40}Ar apparus. On calcule donc l'âge t (= âge de cristallisation de la roche) qui est donné par la formule suivante :

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln\left(1 + \frac{^{40}Ar_t}{^{40}K_t}\right)$$

Mesuré dans l'échantillon

La grande période de ^{40}K (1,25 x 10^9 ans) permet de dater des roches très anciennes et vieilles en théorie 12.5 Ga.

Chronologie absolue: Méthode Rubidium/strontium.

Le ^{87}Rb se désintègre en ^{87}Sr.
La loi de décroissance radioactive: $P_t = P_0\, e^{-\lambda t}$

$$^{87}Rb_t = {}^{87}Rb_0 .\, e^{-\lambda t}$$

Loi inapplicable car la quantité initiale $^{87}Rb_0$ est inconnue.
Mais le nombre d'atomes de ^{87}Sr formés est égal au nombre d'atomes de ^{87}Rb désintégrés

$$^{87}Sr = {}^{87}Rb_0 - {}^{87}Rb_t$$

$$^{87}Sr = {}^{87}Rb_t\,(e^{\lambda t} - 1)$$

Or ^{87}Sr peut être présent au moment de la fermeture du système, c'est-à-dire au moment de la cristallisation du minéral à t_0

Donc on applique l'équation : ***F_t mesuré = F_0 initial + F issue de la désintégration***

Chronologie absolue: Méthode 87Rb/87Sr.

Ainsi l'équation devient: $^{87}Sr_t = {}^{87}Sr_0 + {}^{87}Rb_t\,(e^{\lambda t} - 1)$

Dans cette équation, il y'a deux inconnues: t et $^{87}Sr_0$

Les minéraux des roches magmatiques contiennent un autre isotope stable ^{86}Sr, non radioactif et non radiogénique, dont la quantité ne varie pas au cours du temps dans un système fermé et $^{86}Sr_t = {}^{86}Sr_0$. Si on divise toute l'équation par le nombre de l'isotope ^{86}Sr, l'équation devient donc :

$$\left(\frac{^{87}Sr}{^{86}Sr}\right)_t = \left(\frac{^{87}Rb}{^{86}Sr}\right)_t \cdot \left(e^{\lambda t} - 1\right) + \left(\frac{^{87}Sr}{^{86}Sr}\right)_0$$

Cette équation de la forme y = ax+b correspond à une droite appelée isochrone :

Chronologie absolue:Méthode Rubidium/strontium

$$y = ax + b$$

$$\left(\frac{^{87}Sr}{^{86}Sr}\right)_t = \left(\frac{^{87}Rb}{^{86}Sr}\right)_t \cdot \left(e^{\lambda t} - 1\right) + \left(\frac{^{87}Sr}{^{86}Sr}\right)_0$$

mesuré

mesuré

calculé

Déterminé sur graphe

a = ($e^{\lambda t} - 1$) est la pente ou le coefficient directeur de cette droite. Elle peut être calculée graphiquement.

b = $^{87}Sr_0/^{86}Sr_0$ initial est une constante n'ayant pas changé

Chronologie absolue: Méthode Rubidium/strontium

On utilise cette particularité pour réaliser le calcul :

- **il faut réaliser des mesures dans plusieurs minéraux cogénétiques c-à-d issus du même magma.**

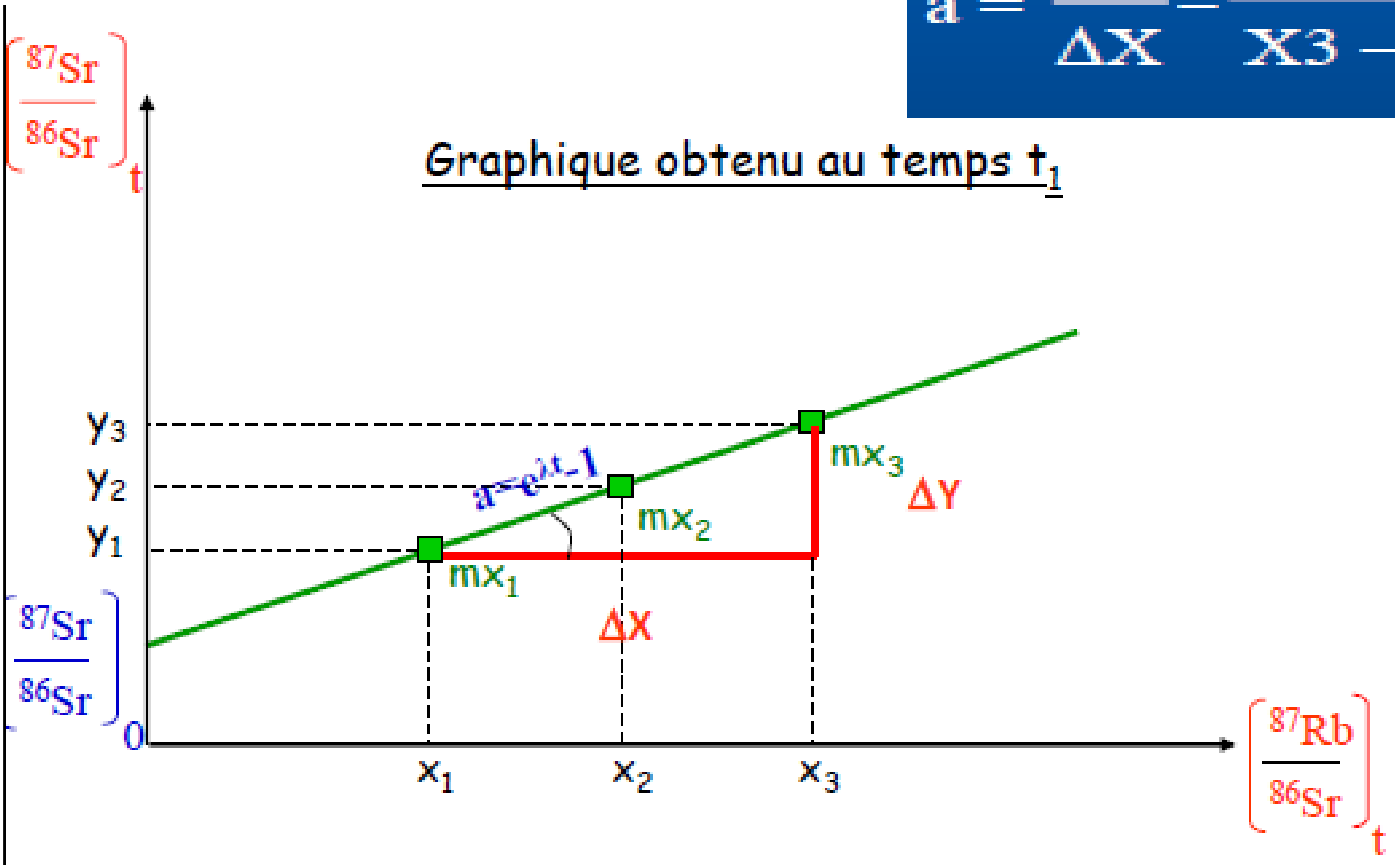
- **il faut ensuite tracer un graphe $(^{87}Sr/^{86}Sr)_t$ en fonction de $(^{87}Rb/^{86}Sr)_t$.**

- **les points qui correspondent aux divers minéraux s'alignent sur une droite de coefficient directeur $a = (e^{\lambda t} - 1)$**

- **On en déduit l'âge des minéraux $t = \ln(a+1)/\lambda$**

Chronologie absolue:Méthode 87Rb/87Sr.

$$a = \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{Y3 - Y1}{X3 - X1}$$



- **t, date de formation de la roche t = ln(a+1)/λ.**

Chronologie absolue: Exercices

Exercice n°1 :

Certains atomes sont naturellement radioactifs. Leur noyau se désintègre pour donner naissance à un autre atome et une particule. On appelle élément père ^{n}P l'atome radioactif et éléments fils ^{m}F l'élément résultant de la désintégration.

1- Ecrivez l'équation de désintégration.

2- La désintégration de l'élément P (Père) en élément Fils (F) suit une loi exponentielle décrite par l'équation $P_0=P\ e^{\lambda t}$ où P_0 est le nombre initial d'atomes pères et t le temps de désintégration, Donner l'équation de t?

Chronologie absolue: Exercices

Exercice n°1 :

1- $^{n}P \longrightarrow {}^{m}F$ + *particule*

2- $P_0 = P\ e^{\lambda t} \longrightarrow P_0/P = e^{\lambda t}$

$\ln(P_0/P) = \lambda t$

$1/\lambda \ \ln(P_0/P) = t$

Comme $P_0 = P+F$ $\quad t = 1/\lambda \ \ln((P+F)/P)$

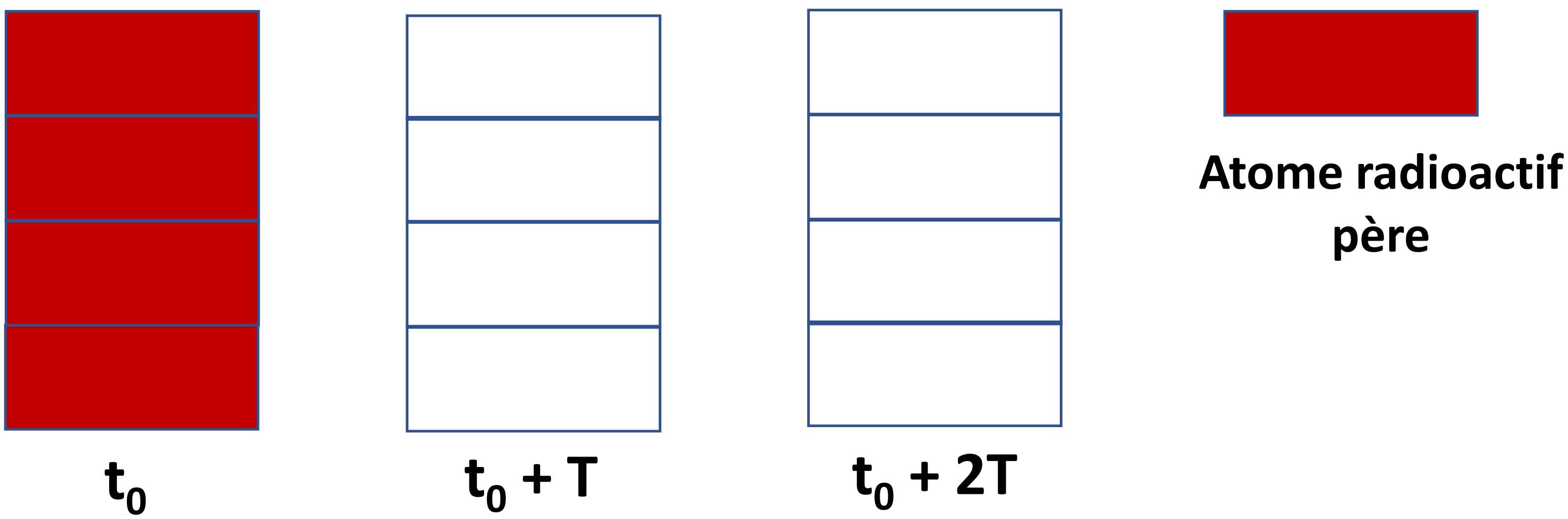
Donc :

$$\boxed{t = 1/\lambda \ \mathrm{Ln}(1+F/P)}$$

Chronologie absolue: Exercices

Exercice n°1 :

3- On a représenté le nombre d'atomes radioactifs (éléments père) dans un échantillon au temps t_0



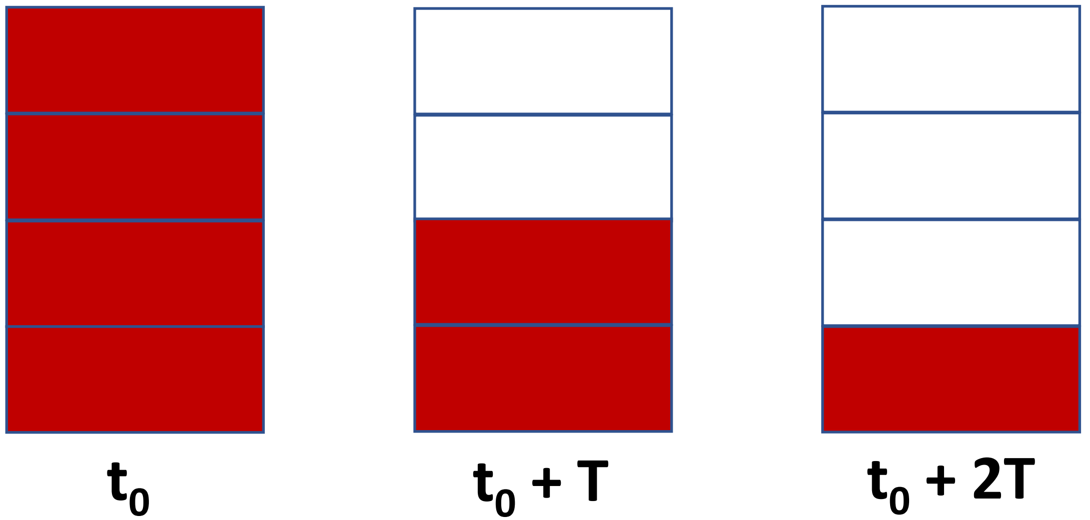
Représentez la quantité d'atomes radioactifs père après un temps T et un temps 2T.

4 - donner la formule de T ?

Chronologie absolue: Exercices

Exercice n°1 :

3- Pour chaque durée T, on fait diminuer la quantité d'atomes radioactifs de moitié :



4 – pour t=T on a : $F=P=P_0/2$

$t = 1/\lambda \ Ln(1+F/P)$ $\quad$ $T=1/\lambda \ Ln(1+1) = Ln(2)/\lambda$

Chronologie absolue: Exercices

Exercice n°1 :

5 - Voici les valeurs de T pour différents isotopes radioactifs.

cas 1 : T = 5 730 ans (cas du **carbone 14**)
cas 2 : T = 1,27.10^9 ans (désintégration du **potassium 40 en argon 40**)
cas 3 : T = 4,7.10^{10} ans (désintégration du **rubidium 87 en strontium 87**).

a) Dans quel cas la décroissance radioactive est la plus rapide ?

b) Dans quel cas est-elle la moins rapide ?

Chronologie absolue: Exercices

Exercice n°1 :

5 - la décroissance radioactive des isotopes est d'autant plus rapide que la période est faible :

cas 1 : **T = 5 730** ans (cas du **carbone 14**)
cas 2 : T = 1,27.10^{9} ans (désintégration du **potassium 40 en argon 40**)
cas 3 : T = 4,7.10^{10} ans (désintégration du **rubidium 87 en strontium 87**).

a) **cas 1** car on a la plus petite valeur de T

b) **cas 3**, cela correspond à la plus grande valeur de T.

Chronologie absolue: Exercices

Exercice n°2 : Datation par le carbone 14.

On admet que la proportion de ^{14}C n'a pas varié depuis 100 000 ans, on sait mesurer P_0 et P, on calcule t de la relation ci-dessus $P = P_0\, e^{-\lambda t}$

$$\boxed{t = 1/\lambda \ \ln P_0/P = \ln(P_0/P).T/\ln 2}$$

Les éruptions du Puy Chopine (volcan de la Chaîne des Puys) ont pu être datées grâce à ^{14}C contenu dans les vestiges du bois carbonisé lors de l'éruption.

Chronologie absolue: Exercices

Exercice n°2 :**Datation par le carbone 14.**

On a mesuré directement la radioactivité de ^{14}C présent dans l'échantillon, le résultat est donné en nombre de désintégrations atomiques par gramme d'échantillon et par minute (dpm). Sur du **bois actuel** la radioactivité moyenne est de **13,56 dpm**. (On admet que cette valeur n'a pas varié durant des millénaires).

Les fragments de **bois calcinés** dans les laves ont une radioactivité correspondant à **4,7 dpm.**

Calculer l'âge de l'éruption (**T= 5 730 ans**)

Chronologie absolue: Exercices

Exercice n°2 : Datation par le carbone 14.

$$t = \ln(P_0/P).T/\ln 2$$

P_0 = 13,56 dpm

P= 4,7 dpm

T=5730 ans

On applique la formule t=ln(13,56/4,7) . 5730/0,693

On obtient t = 8 760 ans.

Chronologie absolue: Exercices

Exercice n°3 : Datation par la méthode Potassium-Argon

Cette méthode repose sur l'apparition de l'argon 40 (^{40}Ar) au sein des roches à partir du potassium 40 (^{40}K).

1- Calculez F

En se basant sur les équations suivantes:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln\left(1 + \frac{F_t - F_0}{P_t}\right) \longrightarrow t = \frac{1}{\lambda} \ln\left(1 + \frac{F_t}{P_t}\right)$$

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Le spectromètre de masse permet de mesurer P et F, ce qui permet de connaître t.

$t = 1/\lambda \ln(F/P + 1) = (T/\ln 2).\ln(F/P + 1)$

Chronologie absolue: Exercices

Exercice n°3 : Datation par la méthode Potassium-Argon

1)- $t = 1/\lambda \ln(F/P + 1)$

$\lambda t = \ln(F/P + 1) \longrightarrow e^{\lambda t} = F/P + 1$

$$e^{\lambda t} - 1 = F/P$$

$$F = P \,.\, (e^{\lambda t} - 1)$$

A cette quantité on devra ajouter en principe F_0

Mais comme l'argon est un gaz qui s'échappe facilement d'une lave en fusion qui arrive en surface, on considère que F_0 est nule.

donc $\boldsymbol{F = P\,(e^{\lambda t} - 1)}$

Chronologie absolue: Exercices

Exercice n°3 : Datation par la méthode Potassium-Argon

2 - On a découvert des restes d'hominidés dans le rift est africain dans une couche sédimentaire située entre deux couches de tufs F et F'. Ces tufs ont été datés par la méthode K/Ar. Les dosages isotopiques ont donné les résultats suivants :

	40Ar en moles/ g d'échantillon	40K en moles/g d'échantillon
Tuf F'	**$2{,}26\ 10^{-11}$**	**$1{,}66\ 10^{-7}$**
Tuf F	**$2{,}242\ 10^{-11}$**	**$1{,}604\ 10^{-7}$**

Proposez un âge pour ces hominidés ($T = 11{,}9.10^{9}$ années).

Chronologie absolue: Exercices

Exercice n°3 : **Datation par la méthode Potassium-Argon**

2 - $t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(1 + \frac{^{40}Ar_t}{^{40}K_t} \right)$ → $t = T/\ln(2) \,.\, \ln((^{40}Ar/^{40}K) +1)$

Age du Tuf F':

$t = 11,9.10^9/0,693.\ \ln((2,26\ .\ 10^{-11}/1,66.10^{-7}) +1)$

$t = 17,17.\ 10^9\ .\ 1,36\ 10^{-4}$

$t=23,35.\ 10^5$ ans.

Age du Tuf F :

$t = 11,9.10^9/0,693.\ \ln((2,242\ .\ 10^{-11}/1,604.10^{-7}) +1)$

$t = 17,17.\ 10^9\ .\ 1,397\ 10^{-4}$

$t=23,986.\ 10^5$ ans.

L'âge de ces hominidés est compris entre 23,35 et 23,98 10^5 ans soit entre 2,3 et 2,4 millions d'années

Chronologie absolue: Exercices

EXERCICE 4 : **Datation par la méthode Rubidium-Strontium**

(*Détermination graphique de l'âge d'une roche)*

L'isotope **^{87}Rb** est radioactif et se désintègre en **^{87}Sr** stable.
Dans le cas de ce couple, on ne connaît pas la quantité initiale de **^{87}Sr** présente dans la roche ni la quantité initiale de **^{87}Rb**.

Pour résoudre ce problème, le géologue effectue plusieurs mesures sur des minéraux différents appartenant à la même roche.

Les quantités initiales de **^{87}Rb** et **^{87}Sr** varient d'un minéral à l'autre car au moment de la fermeture du système, chaque minéral n'emprisonne pas la même quantité de ces éléments.

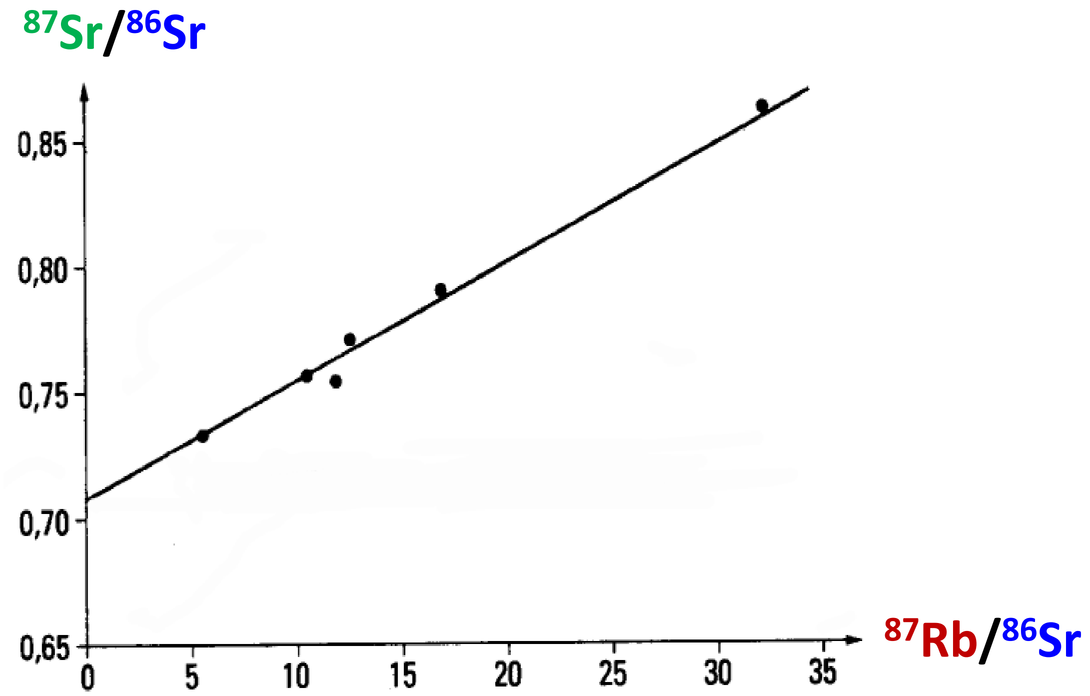
La quantité de chacun de ces isotopes est donc mesurée en proportion par rapport à la quantité de l'isotope stable **^{86}Sr**.

Chronologie absolue: Exercices

EXERCICE 4 : **Datation par la méthode Rb-Sr**

Le graphique suivant présente les différentes mesures réalisées sur des minéraux appartenant à un granite d'une région de l'Europe

Sachant que : **y = ax + b** dans ce graphique, avec **a = $e^{\lambda t} - 1$**, déterminer l'âge du granite?. On donne **$\lambda = 1,42.10^{-11}$**.



Chronologie absolue: Exercices

EXERCICE 4 : **Datation par la méthode Rb-Sr**

L'étude des teneurs en Rb et Sr des échantillons du granite ont permis la construction de l'isochrone traduisant les variations ^{87}Rb / ^{86}Sr.

Sachant que :

Pour le $^{87}\mathbf{Sr}$ / $^{86}\mathbf{Sr}$ = 0.7532, on a $^{87}\mathbf{Rb}$ / $^{86}\mathbf{Sr}$ = 10

Pour le $^{87}\mathbf{Sr}$ / $^{86}\mathbf{Sr}$ = 0.7295, on a $^{87}\mathbf{Rb}$ / $^{86}\mathbf{Sr}$ = 5

Déduisez l'âge de ces échantillons de roches à partir du calcul de la pente.

$$(^{87}Sr / ^{86}Sr) = (e^{\lambda t} - 1)\,(^{87}Rb / ^{86}Sr) + (^{87}Sr_0 / ^{86}Sr)$$

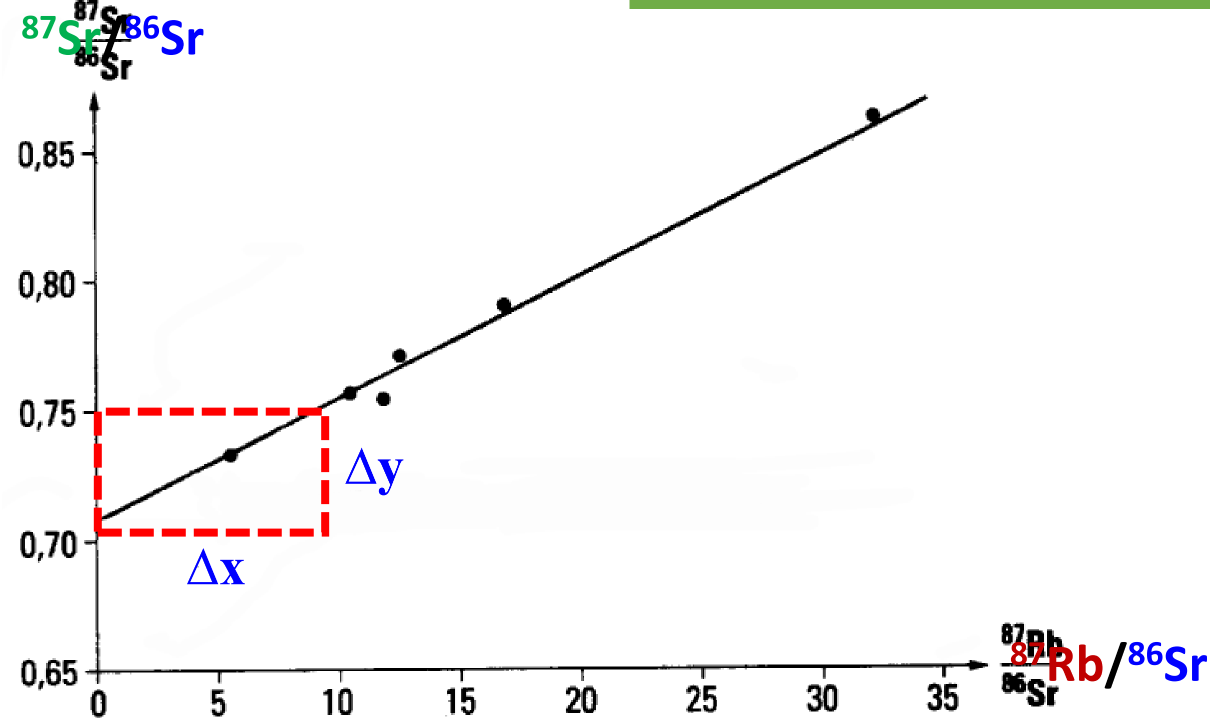
Chronologie absolue: Exercices

EXERCICE 4 : **Datation par la méthode Rb-Sr**

$({}^{87}Sr/{}^{86}Sr) = (e^{\lambda t} - 1)\,({}^{87}Rb/{}^{86}Sr) + ({}^{87}Sr_0/{}^{86}Sr)$

Pour le ${}^{87}Sr/{}^{86}Sr = 0.7532$, on a ${}^{87}Rb/{}^{86}Sr = 10$

Pour le ${}^{87}Sr/{}^{86}Sr = 0.7295$, on a ${}^{87}Rb/{}^{86}Sr = 5$



$a = \Delta y/\Delta x = e^{\lambda t} - 1$

$a = 0.7532 - 0.7295/10-5 = (e^{\lambda t} - 1) = 0{,}00474$;

$t = \ln(a+1)/\lambda = 0{,}0047/1{,}42.\ 10^{-11} = 3{,}33\ 10^{8}$ ans


Merci de votre attention