

**Rappel : élément chimique, isotope, composition d'un noyau**

Tous les atomes possédant le même numéro atomique Z font partie du même \_\_\_\_\_

La représentation du noyau d'un atome est la suivante :



X : \_\_\_\_\_ de l'élément chimique correspondant;

A : nombre de \_\_\_\_\_ ;

Z : nombre de \_\_\_\_\_.

N = A - Z : nombre de \_\_\_\_\_

Lorsque deux atomes (ou noyau) sont \_\_\_\_\_, ils ont même numéro atomique Z, mais un nombre de neutrons (et donc de nucléons) différent : ils font partie du même élément chimique.

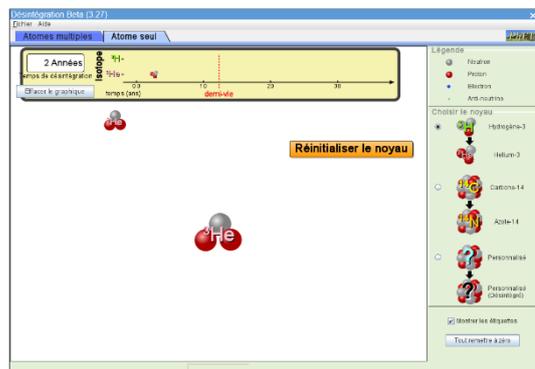
**Exercice** : remplir le tableau suivant, y a-t-il des isotopes ? Si oui lesquels ?

Symbole du noyau	$^{24}_{12}Mg$	$^{23}_{11}Na$	$^7_3Li$	$^{26}_{12}X$
nom de l'élément chimique				
Nombre de protons				
Nombre de neutrons				
Nombre de nucléon				

**I) Instabilité des noyaux**

**I-1 La radioactivité**

Lorsqu'un noyau est instable il se désintègre en émettant d'autres particules plus petites et un rayon  $\gamma$  (Un rayon  $\gamma$  est une onde électromagnétique, comme la lumière, mais d'énergie beaucoup plus importante). Ce phénomène est appelé la **radioactivité**. Il s'agit d'une transformation nucléaire spontanée.



**I-2 Loi de conservation au cours d'une transformation nucléaire**

Activité : Clique sur l'animation [radioactivité](#) puis choisi l'hydrogène 3 (le tritium). Clique sur atome seul.

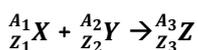
- 1) Écrit l'équation de désintégration radioactive sous la forme  $^{A_1}_{Z_1}X \rightarrow ^{A_2}_{Z_2}Y + ^{A_3}_{Z_3}Z$
- 2) En déduire ce qui se conserve au cours d'une transformation nucléaire.

**Lois de Soddy** : au cours d'une transformation nucléaire :

1) La somme des charges électriques des réactifs est égale à la \_\_\_\_\_ des charges électriques des \_\_\_\_\_ : le nombre de \_\_\_\_\_ se conserve.

2) La somme des \_\_\_\_\_ des réactifs est égale à la somme des nucléons des \_\_\_\_\_. Le nombre de nucléons se \_\_\_\_\_

Equation de désintégration nucléaire :



Conservation du nombre de charge : \_\_\_\_\_

Conservation du nombre de nucléon : \_\_\_\_\_

**Attention : le nombre de protons ne se conserve pas forcément !**

**Exercice :** En TEP, on détecte les molécules d'eau [présentes en grande quantité dans le cerveau] en utilisant de l'eau radioactive que l'on injecte au sujet par voie intraveineuse. [...]. Dans ces molécules d'eau radioactives, le noyau d'oxygène qui comprend normalement huit protons et huit neutrons est remplacé par un noyau d'oxygène qui ne comporte que huit protons et sept neutrons : c'est l'oxygène 15. L'oxygène 15 est un émetteur  $\beta^+$  : un de ses protons se transforme rapidement en neutron, en émettant un positon<sup>(1)</sup> et un neutrino<sup>(2)</sup>. » L'azote N possède  $Z = 7$  protons

<sup>(1)</sup> Le positon est une particule de symbole  ${}^0_1e$

<sup>(2)</sup> Le neutrino est une particule de symbole  ${}^0_0\nu$  (elle ne possède pas de charge électrique et sa masse est quasi nulle)/

1.1 Donner, en la justifiant, le symbole du noyau d'oxygène 15.

1.2 Écrire l'équation de la réaction de désintégration du noyau d'oxygène 15.

### I-3 les différents types de radioactivité

#### Radioactivité $\alpha$ (alpha)

La radioactivité  $\alpha$  correspond à l'émission d'un noyau d'hélium.

Le noyau d'hélium  ${}^4_2\text{He}$  est appelé particule  $\alpha$ .

Équation de désintégration correspondant à la radioactivité  $\alpha$  :  ${}^A_Z\text{X} \rightarrow \dots$

La radioactivité  $\alpha$  intervient lorsque les noyaux contiennent trop de nucléons.

**Remarque :** le plus souvent le noyau père nommé X, donne naissance à un noyau fils excité, noté  $Y^*$

#### Radioactivité $\gamma$

Lorsqu'un noyau excité  $Y^*$  se désexcite, il émet un rayon  $\gamma$ . Ce phénomène est appelé \_\_\_\_\_.

Equation correspondante à la radioactivité  $\gamma$

:

Le rayon  $\gamma$  n'a ni masse ni charge (c'est une onde électromagnétique à forte énergie).

#### La radioactivité $\beta^-$

La radioactivité  $\beta^-$  intervient lors d'une désintégration nucléaire provoquant l'émission d'un électron.

Le noyau père donne un noyau fils, généralement excité, et une particule  $\beta^-$  (autre nom de l'électron).

L'électron possède un nombre de masse nul, et une charge égale à  $-1$  ( $-1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ).

Equation correspondant à la radioactivité  $\beta^-$  :

**Remarque :** ce type de radioactivité correspond au noyau possédant trop de neutron.

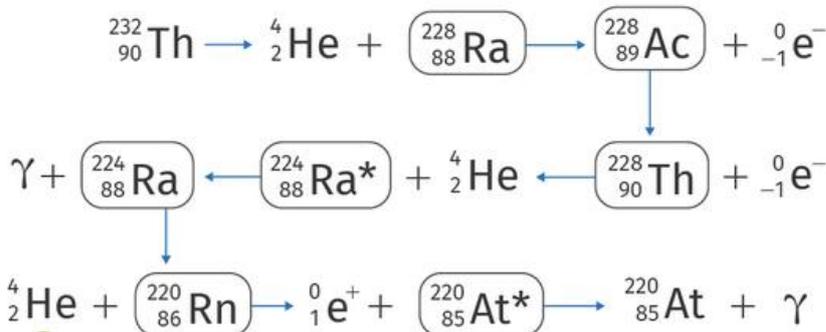
#### La radioactivité $\beta^+$

La radioactivité  $\beta^+$  intervient lors d'une désintégration nucléaire provoquant l'émission d'un positon  $e$ .

Le positon possède un nombre de masse nul et une charge égale à  $+1$  ( $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ). Il correspond à un "électron positif".

## Équation de la radioactivité $\beta^+$

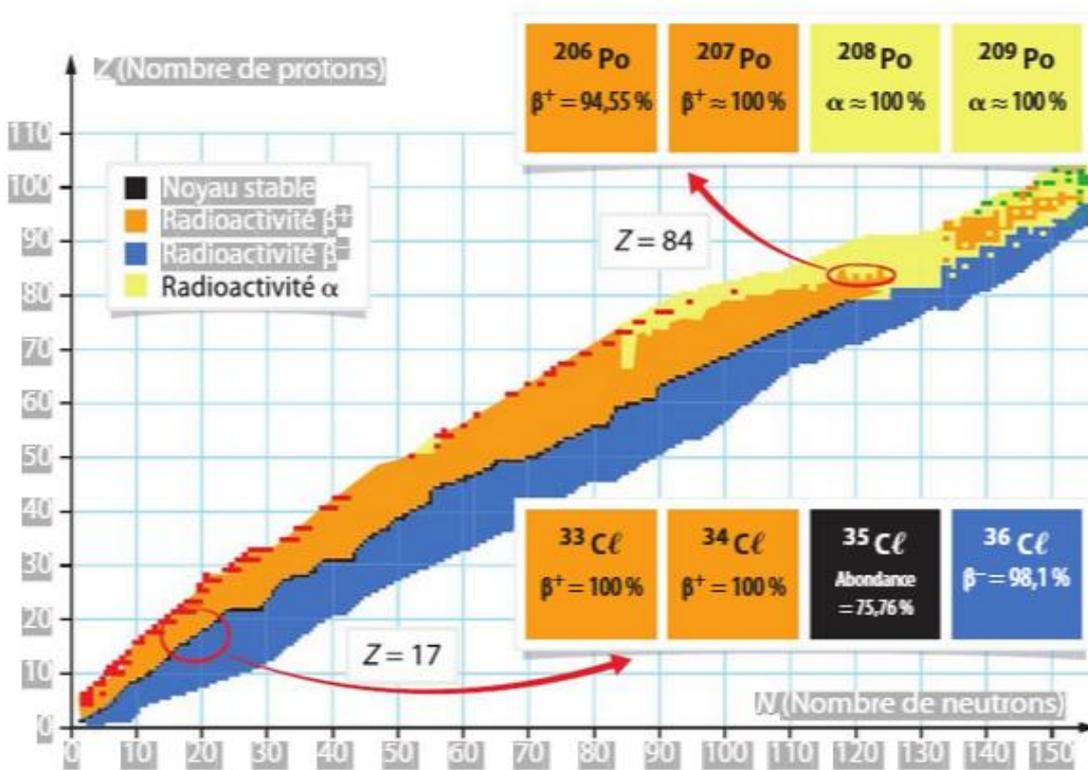
**Remarque :** ce type de radioactivité correspond au noyau possédant trop de protons.



**Exercice :**

Voici une chaîne de désintégration à partir du thorium 232. Indiquer le type de désintégration pour chacune des étapes de la chaîne.

## I-4 Le diagramme de Segré (N,Z)



Le diagramme de Segré (N,Z) représente en abscisse le nombre de neutrons, et en ordonnée le nombre de protons d'un nucléide. Il indique en noir les noyaux stables, en orange les noyaux qui se désintègrent avec une radioactivité  $\beta^+$ , en jaune les noyaux qui se désintègrent avec une radioactivité  $\alpha$  et en violet ceux qui se désintègrent avec une radioactivité  $\beta^-$ .

A l'aide de l'[animation](#), déterminer le symbole du nucléide de l'hydrogène produisant une émission  $\beta^-$ . Ecrire l'équation de désintégration correspondante.

## II) Loi de décroissance radioactive

### II-1 Evolution temporelle d'une population de noyaux radioactifs

La désintégration d'un noyau radioactif isolé est un phénomène aléatoire.

La probabilité  $p(t)$  pour qu'un noyau isolé se désintègre entre les dates  $t$  et  $t + \Delta t$  est égale au quotient du nombre de noyaux se désintégrant pendant la durée  $\Delta t$ , par le nombre total de noyaux  $N(t)$  :

$$p(t) =$$

Avec :

$-\Delta N = N(t) - N(t + \Delta t)$  : nombre de noyaux radioactifs se désintégrant pendant la durée  $\Delta t$

$N(t)$  nombre de noyaux radioactifs à l'instant  $t$ .

la constante radioactive  $\lambda$ , est égale à la probabilité de désintégration  $p(t)$ , divisée par la durée de désintégration

$\Delta t$  :

$$\lambda = \underline{\hspace{2cm}}$$

Unité légale:  $1/s = s^{-1}$

**Exemple** : si  $\lambda = 0,10 s^{-1}$ , cela signifie qu'à n'importe quel instant de la désintégration 10% des noyaux radioactifs se désintègrent par seconde.

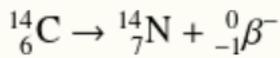
**Exercice** : la constante radioactive lambda du carbone 14 est :  $\lambda = 1,21 \times 10^{-4} \text{ an}^{-1}$ .

Que signifie cette valeur ?

2) Le corps humain contient environ  $10^{12}$  noyaux radioactifs de carbone 14. **Les isotopes stables du carbone sont le carbone 12 et le carbone 13** (avec une abondance naturelle de 98,9 % de carbone 12). Le carbone 14 présente un excès de neutrons par rapport à ces isotopes stables. Il se désintègre donc par radioactivité  $\beta^-$ . Ecrire la réaction de désintégration du carbone 14.

Réponse : En une année,  $1,21 \times 10^{-4} \times 10^2 = 1,21 \times 10^{-2} \%$  de la population de noyaux radioactifs se désintègre.

2)



Le noyau fils formé possède 7 protons, il s'agit donc d'un isotope de l'azote. De plus il possède 14 nucléons, on obtient donc de l'azote 14. L'azote 14 est un isotope stable.

### Rappels mathématiques

1) Une équation différentielle linéaire du premier ordre est de la forme :

$$y' = a.y + b \text{ avec :}$$

a et b, constante.

$y'$  dérivée première de y par rapport à une variable (généralement la variable est le temps t en sciences physiques et la variable x en mathématique).

La solution de l'équation différentielle est de la forme :  $y = C.e^{a.t} - b/a$

La constante C est déterminée avec la valeur de y à t = 0 :  $C = y(0) = Y_0 = C.e^{-a.0} - b/a$

$Y_0 = C - b/a$  donc  $C = Y_0 + b/a$

2) Effectuer les calculs suivants

$$\exp(\ln(3)) =$$

$$\ln(\exp(10)) =$$

La fonction réciproque de la fonction exponentielle (exp) est la fonction logarithme népérien (ln) :

$$\ln(\exp(x)) = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$\exp(\ln(x)) = \underline{\hspace{2cm}}$$

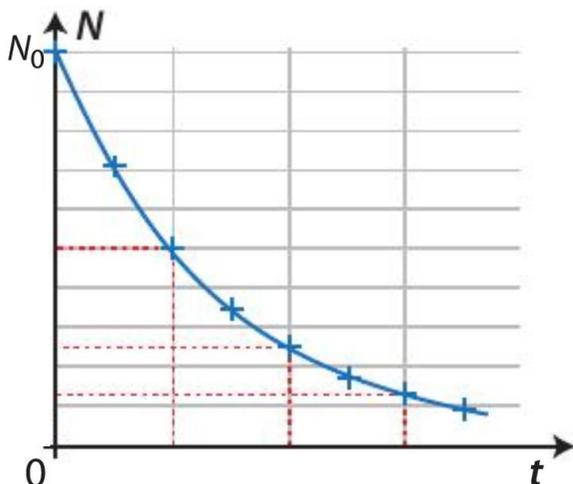
ou

$$\ln(e^x) = \underline{\hspace{2cm}} ; e^{\ln(x)} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$\text{Rappel : } \ln(a.b) = \underline{\hspace{2cm}} ; \ln(a/b) = \underline{\hspace{2cm}}$$

### II-2 loi de décroissance radioactive

A démontrer



La fonction  $N(t)$  vérifie l'équation différentielle du premier ordre :  $\frac{dN(t)}{dt} = -N(t) \cdot \lambda$

La solution de cette équation différentielle est :

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda.t}$$

Cette relation est appelée **loi de décroissance radioactive**.

$N_0$  : nombre de noyaux radioactifs à l'instant t = 0

$N(t)$  : nombre de noyaux radioactifs restant à l'instant t

$\lambda (s^{-1})$  : constante de désintégration radioactive du noyau considéré

Allure de la courbe  $N = f(t)$

### Exercice :

La constante radioactive lambda du carbone 14 est  $\lambda = 1,21 \times 10^{-4} \text{ an}^{-1}$ . le corps d'un humain vivant contient environ  $10^{12}$  noyaux radioactifs de carbone 14. Combien en possède-t-il au bout de 20000 ans ?

### II-2 Temps de demi-vie, $t_{1/2}$ , d'un noyau radioactif

On caractérise un noyau radioactif par sa demi-vie,  $t_{1/2}$  qui est la durée au bout de laquelle le nombre de noyaux radioactifs restants  $N(t_{1/2})$  est égal à la moitié du nombre initial de noyaux  $N_0$ .

$$N(t_{1/2}) = \frac{N_0}{2}$$

Représenter sur la courbe  $N = f(t)$  la période de  $\frac{1}{2}$  vie,  $t_{1/2}$ .  $t_{1/2}$  dépend t-il du nombre de noyaux initiaux ? La demi-vie est liée à la constante de désintégration radioactive  $\lambda$  par la relation suivante :  $t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda}$  (à démontrer)

Pour voir la démonstration vidéo clique ici.

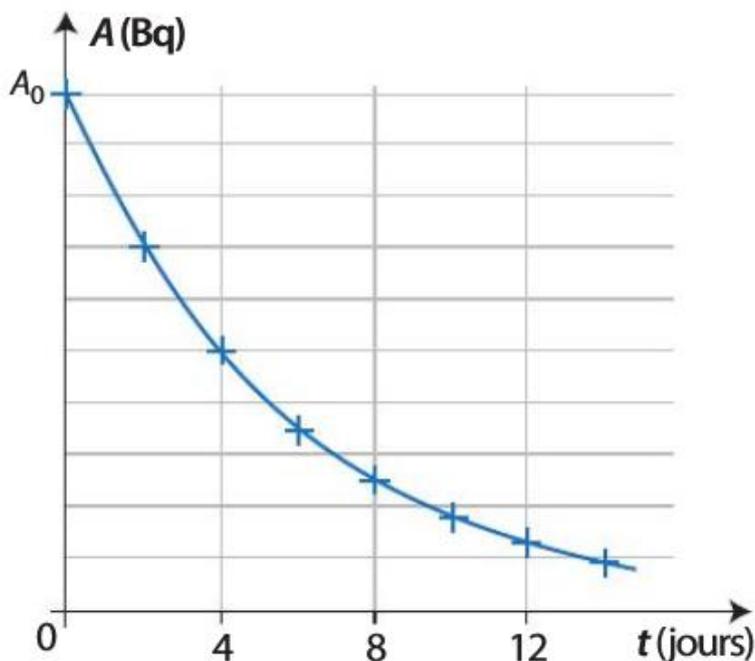
### II-4 Activité A d'un échantillon radioactif

L'activité d'un échantillon est égale à l'opposé de la variation du nombre de noyaux radioactifs ( $-dN$ ) divisé par la durée 'dt' pendant laquelle ils se désintègrent.

$$A(t) = -\frac{dN(t)}{dt}$$
$$A(t) = A_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot t)$$

Avec  $A_0$  activité à l'instant initial.

Unité : le becquerel(Bq)



Déterminer l'expression de  $A_0$  ; A quoi correspond une activité A de 1 becquerel ?

**Exemple** : les poissons pêchés au large des côtes de Fukushima ne sont pas commercialisés si leur activité radioactive dépasse la valeur  $A = 80 \text{ Bq}$ . Que signifie cette valeur ?

**Exercice** : Courbe représentant l'activité d'un échantillon de noyaux de radon radioactif au cours du temps : déterminer la durée de  $\frac{1}{2}$  vie radioactive.

### III) Application et radioprotection

#### III-1 Protection contre les rayons ionisants

Les rayonnements ionisants, quelle que soit leur origine, naturelle ou artificielle, nucléaire ou radiologique, ont suffisamment d'énergie pour arracher des électrons aux atomes de la matière qu'ils rencontrent. Lorsqu'ils agissent sur les constituants des cellules vivantes, ils peuvent altérer les structures moléculaires, détruire ou modifier les cellules et, dès lors, produire deux catégories d'effets biologiques. **Des effets certains, dits déterministes** (par exemple des brûlures, des nausées...) apparaissent systématiquement et de façon généralement précoce lorsque la dose de rayonnements reçue dépasse un certain seuil, spécifique de chaque effet. La gravité des dommages augmente avec la dose. **Des effets aléatoires, dits stochastiques** (principalement des cancers) apparaissent de façon non systématique et toujours différée de plusieurs années chez les individus exposés. La probabilité d'apparition de ces effets augmente en fonction de la dose reçue, mais leur gravité est indépendante de la dose.

Afin d'optimiser les expositions on peut agir à la fois sur :

- **la source de rayonnements** : réduction de l'intensité de la source, utilisation d'écrans, d'enceintes de confinement, de containers de protection absorbant les rayonnements ionisants, et d'autres systèmes de sécurité (sas, ventilations...)
- **les conditions de travail des hommes** : Eloignement maximum des sources de rayonnements, temps d'exposition minimum, utilisation de vêtements et accessoires de protection et suivi de protocoles d'intervention réduisant l'exposition externe et évitant la contamination radioactive de la peau ou la contamination interne par inhalation ou ingestion ;
- **les conditions d'exposition des patients** : mise en place de procédures radiodiagnostiques et radiothérapeutiques optimisées et d'une assurance de qualité des appareillages...

### III-2 Datation au carbone 14

Clique sur l'animation [carbone 14 \(CEA\)](#). Puis résume en quoi consiste la datation au carbone 14 des matières organiques.

**Exercice** : la loi de décroissance radioactive, concernant le carbone 14, peut également s'écrire en fonction de son activité :  $A = A_0 \times e^{-\lambda t}$  avec  $A_0 = A_{t=0}$ , l'activité initiale du carbone 14 (par exemple au moment de la mort d'un organisme) et  $A$  l'activité du carbone 14 mesurée à l'instant  $t$ .

Le prélèvement d'une poutre (en bois) dans la tombe du vizir Hemada à Sakara fournit une activité au moment de la mesure telle que  $A = 6,68$  désintégrations par minute et par gramme de carbone alors que  $A_0 = 13,5$  désintégrations par minute et par gramme de carbone.

4.1 Démontrer que l'expression qui permet de donner l'âge  $t$  de la mort d'un organisme s'écrit :

$$t = \frac{t_{1/2}}{\ln 2} \times \ln\left(\frac{A_0}{A}\right) \text{ avec } t_{1/2} = 5730 \text{ ans.}$$

4.2 Calculer, en faisant apparaître l'application numérique, l'âge  $t$  de la tombe de ce vizir de la première dynastie des pharaons.

Résumé : chapitre 6 : transformation nucléaire

## I) Radioactivité

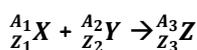
### I-1 Loi de conservation au cours d'une transformation nucléaire

**Lois de Soddy** : au cours d'une transformation nucléaire :

1) La somme des charges électriques des réactifs est égale à la \_\_\_\_\_ des charges électriques des \_\_\_\_\_ : le nombre de \_\_\_\_\_ se conserve.

2) La somme des \_\_\_\_\_ des réactifs est égale à la somme des nucléons des \_\_\_\_\_. Le nombre de nucléons se \_\_\_\_\_.

Equation de désintégration nucléaire :



Conservation du nombre de charge : \_\_\_\_\_

Conservation du nombre de nucléon : \_\_\_\_\_

La radioactivité  $\alpha$  correspond à l'émission d'un noyau d'hélium.

Le noyau d'hélium  ${}^4_2\text{He}$  est appelé particule  $\alpha$ .

Équation de désintégration correspondant à la radioactivité  $\alpha$  :

Lorsqu'un noyau excité  $Y^*$  se désexcite, il émet un rayon  $\gamma$ . Ce phénomène est appelé radioactivité  $\gamma$ .

Equation correspondante à la radioactivité  $\gamma$  :

La radioactivité  $\beta^-$  intervient lors d'une désintégration nucléaire provoquant l'émission d'un électron.

Le noyau père donne un noyau fils, généralement excité, et une particule  $\beta^-$  (autre nom de l'électron).

L'électron possède un nombre de masse nulle, et une charge égale à  $-1$  ( $-1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ).

Equation correspondant à la radioactivité  $\beta^-$

La radioactivité  $\beta^+$  intervient lors d'une désintégration nucléaire provoquant l'émission d'un positon  $e^+$ . Le positon possède un nombre de masse nul et une charge égale à +1 ( $1,6 \times 10^{-19}C$ ). Il correspond à un "électron positif". Equation de la radioactivité  $\beta^+$

## II) Loi de décroissance radioactive

La fonction  $N(t)$  vérifie l'équation différentielle du premier ordre :  $\frac{dN(t)}{dt} = -N(t) \cdot \lambda$   
Savoir redémontrer que la solution de cette équation différentielle est :  $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$

On caractérise un noyau radioactif par sa demi-vie,  $t_{1/2}$  qui est la durée au bout de laquelle le nombre de noyaux radioactifs restants  $N(t_{1/2})$  est égal à la moitié du nombre initial de noyaux  $N_0$ .  $N(t_{1/2}) = \frac{N_0}{2}$

L'activité d'un échantillon est égale à l'opposé de la variation du nombre de noyaux radioactifs ( $-dN$ ) divisé par la durée ' $dt$ ' pendant laquelle ils se désintègrent.

$$A(t) = -\frac{dN(t)}{dt}$$
$$A(t) = A_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot t)$$

Avec  $A_0$  activité à l'instant initial.

Unité : le becquerel(Bq)