



# PARTIE B : TRANSFORMATIONS NUCLEAIRES

## Chapitre 4 : Radioactivité, décroissance radioactive

### Pré requis :

- ✓ La structure de l'atome et de son noyau vue en 2<sup>nde</sup> et en 1<sup>ère</sup> S (composition, ordre de grandeur des tailles)
- ✓ L'interaction forte qui assure la cohésion de la matière à l'échelle du noyau.

### Connaissances et savoir-faire exigibles :

- (1) Connaître la signification du symbole  ${}^A_Z X$  et donner la composition du noyau correspondant.
- (2) Définir l'isotopie et reconnaître des isotopes.
- (3) Reconnaître les domaines de stabilité et d'instabilité des noyaux sur un diagramme (N,Z).
- (4) Définir un noyau radioactif.
- (5) Connaître et utiliser les lois de conservation.
- (6) Définir la radioactivité  $\alpha$ ,  $\beta^-$ ,  $\beta^+$ , l'émission  $\gamma$  et écrire l'équation d'une réaction nucléaire pour une émission  $\alpha$ ,  $\beta^-$  ou  $\beta^+$  en appliquant les lois de conservation.
- (7) À partir de l'équation d'une réaction nucléaire, reconnaître le type de radioactivité. (**Exercices**)
- (8) Connaître l'expression de la loi de décroissance et exploiter la courbe de décroissance.
- (9) Savoir que 1 Bq est égal à une désintégration par seconde.
- (10) Expliquer la signification et l'importance de l'activité dans le cadre des effets biologiques.
- (11) Connaître la définition de la constante de temps et du temps de demi-vie.
- (12) Utiliser les relations entre  $\tau$ ,  $\lambda$  et  $t_{1/2}$ . (**Exercices**)
- (13) Déterminer l'unité de  $\lambda$  ou de  $\tau$  par analyse dimensionnelle.
- (14) Expliquer le principe de la datation, le choix du radioélément et dater un événement.

### Savoir-faire expérimentaux : (voir TP $\phi$ n°3)

- (15) Réaliser une série de comptages relatifs à une désintégration radioactive.
- (16) À partir d'une série de mesures, utiliser un tableur ou une calculatrice pour calculer la moyenne, la variance et l'écart-type du nombre de désintégrations enregistrées pendant un intervalle de temps donné.

### Introduction historique :

#### *Activité documentaire*

- 1) Car ces rayons lui semblent mystérieux.
- 2) Les sels d'uranium ont, sans intervention extérieure, impressionné les plaques photographiques qui étaient rangés avec.
- 3) Marie Curie en déduit qu'il existe dans ces minerais un élément beaucoup plus actif que l'uranium lui-même.
- 4) Le radium.
- 5)  $Z(U) = 92$  ;  $Z(Po) = 84$  ;  $Z(Ra) = 88$
- 6) Dans le noyau d'uranium 238, nous avons 92 protons donc  $238 - 92 = 146$  neutrons  
Dans le noyau de polonium 209, nous avons 84 protons donc  $209 - 84 = 125$  neutrons  
Dans le noyau de radium 226, nous avons 88 protons donc  $226 - 88 = 138$  neutrons

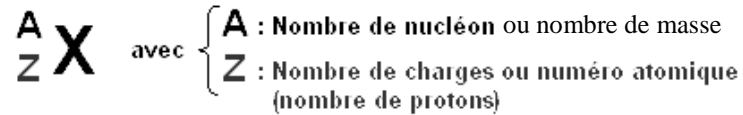
### I Stabilité et instabilité des noyaux :



### 1) Composition d'un noyau atomique <sup>(1)</sup> :

Nous avons vu en 2<sup>nde</sup> et en 1<sup>ère</sup> S de quoi était composé l'atome : un noyau entouré d'un cortège d'électrons. Nous allons ici nous occuper uniquement du noyau.

- a. Un noyau est composé de **nucléons**, qui rassemblent les **protons et les neutrons**. En raison de la charge électrique positive des protons, le noyau devrait exploser, mais sa **cohésion est maintenue par l'interaction forte**.
- b. La représentation symbolique du noyau d'un atome est la suivante :



Ex : Soit le noyau écrit de manière symbolique  ${}^{63}_{29}\text{Cu}$  :

C'est un noyau de cuivre qui a pour composition : 29 protons et  $63 - 29 = 34$  neutrons

### 2) Isotope <sup>(2)</sup> :

Des noyaux qui ont **même numéro atomique Z** mais des **nombre de nucléons différents A** s'appelle des **isotopes** (ils ont donc même nombre de protons mais un nombre de neutrons différent).

Ex : pour l'élément uranium, il existe plusieurs isotopes dont ceux-ci :  ${}^{235}_{92}\text{U}$  et  ${}^{238}_{92}\text{U}$

pour l'élément carbone, il existe plusieurs isotopes dont ceux-ci :  ${}^{12}_6\text{C}$  et  ${}^{14}_6\text{C}$

### 3) Stabilité et instabilité des noyaux <sup>(3)</sup> :

- a. Malgré l'interaction forte, sur les 1500 noyaux connus (naturels et artificiels), **seuls 260 sont stables**. **les autres se désintègrent spontanément**, plus ou moins rapidement selon leur composition.
- b. Pour localiser ces deux types de noyaux, **on utilise un diagramme (N,Z)** ; où  $N = A - Z$  désigne le nombre de neutrons, et  $Z$  le nombre de protons (*voir livre p 81*) :
- On voit que pour  $Z < 20$ , les **noyaux stables se situent sur la diagonale, appelée vallée de stabilité** (autant de protons que de neutrons).
  - Ensuite, **la stabilité du noyau n'est assurée que si le nombre de neutrons est supérieur au nombre de protons** (si  $Z$  est trop élevé, les forces électrostatiques l'emportent sur les forces nucléaires et les noyaux se désintègrent).
  - **Aucun noyau dont  $Z > 83$  n'est stable.**

## II La radioactivité :

### 1) Définition <sup>(4)</sup> :

En dehors de la vallée de stabilité, **les noyaux instables sont dits radioactifs**. **Chaque noyau va se transformer en noyau stable** en une ou plusieurs désintégration(s) spontanée(s).

Au cours de ce processus, il y aura émission de particules qui pourra être accompagnée de rayonnement électromagnétique.

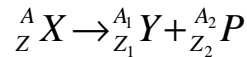
### 2) Lois de conservation d'une réaction nucléaire <sup>(5)</sup> :



Une réaction nucléaire sert à décrire la transformation d'un noyau instable en noyau stable, tout comme l'équation de la réaction chimique. Mais ici, cette **réaction ne concerne que les noyaux des atomes**.

**Lors d'une réaction nucléaire, il y a conservation du nombre de nucléons A et du nombre de charges Z.**

Ex : Soit une réaction nucléaire où un noyau père (X) donne naissance à un noyau fils (Y) en émettant une particule chargée P :



Les lois de conservation s'écrivent :  $A = A_1 + A_2$  et  $Z = Z_1 + Z_2$

### 3) Différentes radioactivités <sup>(6)</sup>:

Selon leur **position dans le diagramme (N,Z)** (voir livre p81), les noyaux instables engendrent un type de radioactivité.

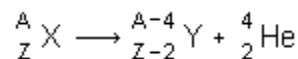
Aussi, si le **noyau fils** obtenu lors d'une désintégration est stable ou non, **il se désintègre immédiatement après être apparu ou non**.

*Fiche élève*

#### a. Radioactivité $\alpha$ :

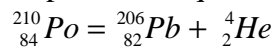
##### ➤ Définition :

Ce sont plutôt les **noyaux lourds** qui répondent à cette radioactivité. Ces noyaux se désintègrent en expulsant des **noyaux d'Hélium**, en suivant les lois de conservation, cela nous donne une équation nucléaire du type :



##### ➤ Exemple :

Le polonium  ${}^{210}_{84} \text{Po}$  est radioactif  $\alpha$ . Selon l'équation ci-dessus, il va donner naissance à un noyau fils de numéro atomique  $84 - 2 = 82$  : il s'agit d'un noyau de plomb. L'équation de désintégration du polonium est donc :



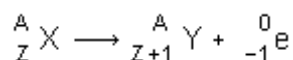
##### ➤ Propriétés :

Les particules  $\alpha$  sont **arrêtées par une feuille de papier** ou une petite couche d'air. Elles sont **très peu pénétrantes mais très ionisantes**, c'est à dire dangereuses lorsqu'elles sont ingérées par exemple.

#### b. Radioactivité $\beta^-$ :

##### ➤ Définition :

Ce sont les **noyaux qui ont trop de neutrons** qui sont soumis à la radioactivité  $\beta^-$  : Ces noyaux se désintègrent en émettant un **électron**, on obtient l'équation :



##### ➤ Remarque :

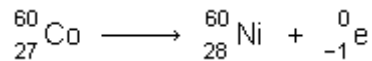
**L'électron ne provient pas du cortège électronique** puisque nous sommes à l'intérieur du noyau. Et comme le noyau ne comporte pas d'électrons, cela signifie qu'**il a été créé**.

En effet, lors de la radioactivité  $\beta^-$ , Le nombre de masse reste constant alors que le numéro atomique augmente d'une unité. Ceci ne peut être réalisé que si **un neutron s'est transformé en proton. Pendant cette transformation, un électron est éjecté**.



➤ Exemple :

Le cobalt 60 est radioactif  $\beta^-$  : il se transforme donc en un noyau de nickel selon l'équation nucléaire :



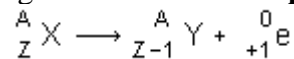
➤ Propriétés :

Ce rayonnement  $\beta^-$  est **assez pénétrant mais est arrêté par une épaisseur de quelques mm d'aluminium.**

c. Radioactivité  $\beta^+$  :

➤ Définition :

Cette radioactivité est caractéristique des **noyaux ayant trop de protons**, mais elle existe **que pour les noyaux artificiels**. Ces noyaux se désintègrent en émettant un **particule chargé +e, appelé positon** :

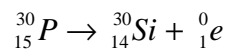


➤ Remarque :

De même que pour la radioactivité  $\beta^-$ , un **positon** n'est pas une particule constituant le noyau. Ainsi il est forcément **formé lors de la transformation d'un proton en neutron.**

➤ Exemple :

Le phosphore 30 qui a été créé par Irène et Frédéric Joliot-Curie en 1934 est émetteur  $\beta^-$  :



➤ Propriété :

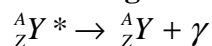
Les particules  $\beta^+$  ont une **durée de vie très courte** car lorsqu'elle rencontre un électron, les deux particules s'annihilent pour donner un rayonnement  $\gamma$ .

On utilise ces particules en médecine vu leur durée de vie.

d. Désexcitation  $\gamma$  :

➤ Définition :

**A la suite d'une radioactivité  $\alpha$  ou  $\beta$ , le noyau fils produit est souvent dans un état excité ( $Y^*$ ). Il se désexcitera en une ou plusieurs étapes en émettant un **rayonnement électromagnétique** (de même type que la lumière) par l'intermédiaire de photons de **très grande énergie** : les **photons  $\gamma$** .**



➤ Propriété :

Ces rayonnements  $\gamma$  est **très pénétrants**, ils sont **arrêtés par une épaisseur de plomb d'une vingtaine de centimètres.**

Exercices n°19 p98



### III Décroissance radioactive :

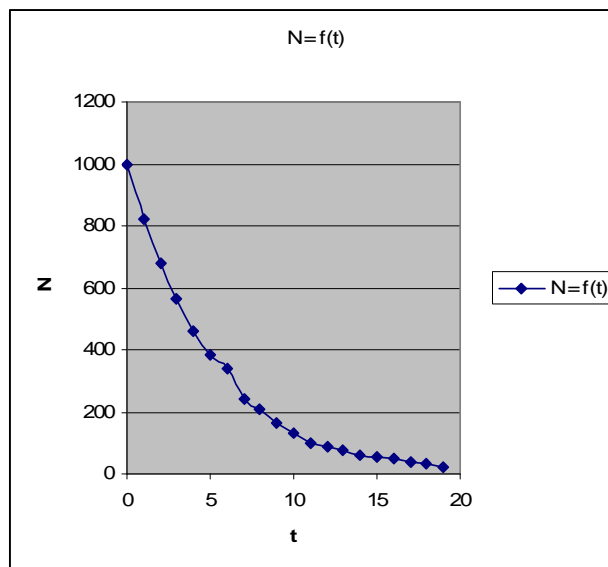
1) Activité : *Fiche élève*

a. Tableau :

t (en s)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Nombre de dés restants	1000	824	677	563	462	384	340	243	208	167

t (en s)	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Nombre de dés restants	132	101	87	78	63	54	49	37	31	24

b. Courbe :



c. Mesure de temps :

Pour toutes les mesures proposées, on trouve environ un temps égal à 3.6 s

d. Temps caractéristique :

Le temps caractéristique d'une décroissance radioactive est le temps nécessaire pour que la population de noyau passe de  $N$  à  $N/2$ .

2) Hypothèses de base quant à la désintégration d'un noyau individuel :

- a. La désintégration d'un noyau n'affecte pas celle de son voisin.
- b. Un noyau meurt « sans vieillir » (*lire explications du livre p100*).

3) Nombre de désintégration pendant une durée  $\Delta t$  <sup>(11)</sup> et <sup>(13)</sup> :

Nous voulons connaître **la loi mathématique qui traduit l'évolution** (courbe ci-dessus) **de la population moyenne d'un ensemble de noyaux radioactifs.**

Nous allons utiliser les notations suivantes :

Soit  $N_0$ , le nombre de noyaux radioactifs à l'instant  $t = 0$ .

Soit  $N(t)$ , le nombre de noyaux radioactifs restants à l'instant  $t$ .

Soit  $N + \Delta N$  le nombre de noyau restants à la date  $t + \Delta t$  (avec  $\Delta N < 0$  puisque  $N$  diminue).

Calculons alors le nombre de noyaux qui s'est désintégré entre  $t$  et  $t + \Delta t$  :

$$N_i - N_f = N - (N + \Delta N) = - \Delta N$$

Ce nombre est proportionnel :

- ✓ Au nombre  $N$  de noyaux présents, car pendant une même durée, le nombre de désintégration est deux fois plus importants si l'échantillon comporte deux fois plus de noyaux.
- ✓ A la durée  $\Delta t$ , car pour un même échantillon, le nombre de désintégration est deux fois plus important pendant une durée deux fois plus grande (il faut que  $\Delta t$  soit petit par rapport à  $t$ ).

On peut donc écrire :

$$- \Delta N = \lambda \times N \times \Delta t$$

$\lambda$  est la constante de proportionnalité appelée **constante radioactive**, elle **dépend de la nature du noyau radioactif**.

Pour connaître son unité, faisons une analyse dimensionnelle :

$$[\lambda] = \left[ \frac{-\Delta N}{N} \right] \times \left[ \frac{1}{\Delta t} \right] = 1 \times \frac{1}{T} = T^{-1} \text{ (car } \Delta N/N \text{ est un nombre)}$$

$\lambda$  a la dimension de l'inverse d'un temps, elle pourra être exprimé en  $s^{-1}$ ,  $min^{-1}$ ,  $h^{-1}$  ...

Mais généralement, on préférera caractériser la radioactivité d'un noyau à l'aide d'une **constante de temps** :

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \text{ qui est alors homogène à un temps.}$$

4) Loi de décroissance exponentielle <sup>(8)</sup> :  
*Fiche élève*

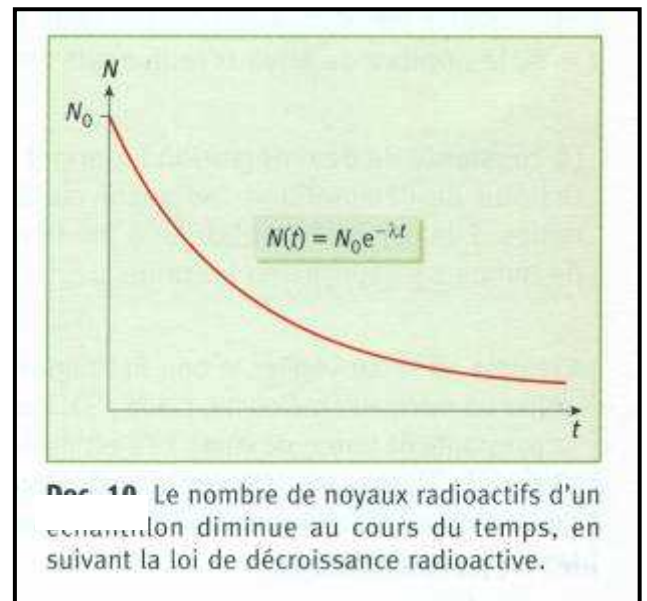
On rappelle que la désintégration des noyaux radioactifs au **niveau microscopique est aléatoire**, mais au niveau **macroscopique**, le nombre moyen  $N$  de noyaux restants dans l'échantillon suit une **loi déterminée**.

Si on fait tendre l'intervalle de temps  $\Delta t$  vers 0, la loi qui donne le nombre de désintégration pendant  $\Delta t$  devient :

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda \times N$$

Par des outils mathématiques (dérivée, équation différentielle), ceci nous conduit à :

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



**Doc n°1**

Cette décroissance peut être **plus ou moins rapide selon la nature des noyaux**, on peut les comparer en utilisant la notion de **temps caractéristique pour passer d'une population de  $N$  à une population de  $N/2$**  :



5) Demi-vie radioactive <sup>(11)</sup> :

a. Définition :

Comme vu dans l'activité, c'est le temps usuel qui permet de caractériser le comportement d'un échantillon radioactif.

La demi-vie  $t_{1/2}$  d'un échantillon radioactif est égale à la **durée nécessaire pour que la moitié des**

**noyaux de l'échantillon se soit désintégrée** :  $N(t + t_{1/2}) = \frac{N(t)}{2}$

La demi-vie est **homogène à un temps**, elle s'exprimera en s ou plus souvent dans une unité plus adaptée (voir tableau ci-après).

b. Exemple : *Fiche élève*

<u>Novau radioactif</u>	<u>Symbole</u>	<u>Demi-vie <math>t_{1/2}</math></u>	<u>Origine</u>
Rubidium 87	${}_{37}^{87}Ru$	$4,85 \cdot 10^{10}$ ans	Certaines roches
Thorium 232	${}_{90}^{232}Th$	$14 \cdot 10^9$ ans	Certaines roches
Uranium 238	${}_{92}^{238}U$	$4,46 \cdot 10^9$ ans	Certaines roches
Uranium 235	${}_{92}^{235}U$	$7,04 \cdot 10^8$ ans	Certaines roches
Potassium	${}_{19}^{40}K$	$1,3 \cdot 10^9$ ans	Roches
Radium	${}_{88}^{226}Ra$	1 600 ans	Roches terrestres riches en uranium
Carbone 14	${}_{6}^{14}C$	5 730 ans	Atmosphère et composés carbonés
Césium 137	${}_{55}^{137}Cs$	30,2 ans	Produits des réacteurs nucléaires
Radon 222	${}_{86}^{222}Rn$	3,8 jours	Gaz provenant de roches granitiques
Radon 220	${}_{86}^{220}Rn$	58 s	Gaz provenant de roches granitiques
Cobalt	${}_{27}^{60}Co$	5,27 ans	
Iode	${}_{53}^{131}I$	8,02 jours	

Doc n°2

c. Expression en fonction de la constante radioactive :

On a : 
$$N(t + t_{1/2}) = \frac{N(t)}{2}$$

Si on remplace les N par la loi de décroissance :

$$N_0 \times e^{-\lambda(t + t_{1/2})} = \frac{N_0 \times e^{-\lambda t}}{2}$$

D'où

$$N_0 \times e^{-\lambda t} \times e^{-\lambda t_{1/2}} = \frac{N_0}{2} \times e^{-\lambda t}$$

En simplifiant :

$$e^{-\lambda t_{1/2}} = \frac{1}{2}$$

Et enfin :

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \times \ln 2$$

La demi-vie **ne dépend donc que de** la constante radioactive  $\lambda$  (pas de  $N_0$ ).

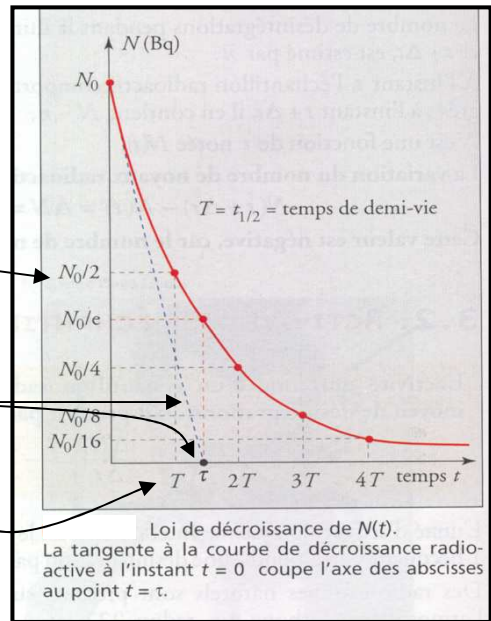
d. Détermination graphique : *Fiche élève*

Pour la demi-vie :

On repère l'ordonnée correspondant à  $N_0/2$ , on reporte sur la courbe et on retrouve en abscisse  $t_{1/2}$ .

On peut aussi retrouver la constante de temps :

Il s'agit du point d'intersection entre la tangente à la courbe en  $N = N_0$ , et l'axe des abscisses.



Exercices n°9 et 14 p 108/109

**Doc n°3**

6) Activité d'un noyau radioactif :

a. Définition <sup>(9)</sup> :

L'activité  $A$  d'une source radioactive est égale au nombre moyen de désintégration par seconde dans

l'échantillon :

$$A = -\frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{|\Delta N|}{\Delta t} > 0$$

Elle s'exprime en **becquerels (Bq)** en hommage au physicien du même nom. **1 Bq correspond à une désintégration par seconde.**

b. Exemple : *Fiche élève*

<u>Source</u>	<u>Activité</u>
1 L d'eau minérale ou d'eau de mer	10
1 L de lait	80
1 kg de poisson	100
1 homme de 70 kg	10 000
1 kg de granit	1 000
1 kg de minerai d'uranium	$25 \cdot 10^6$
Radioisotope pour les diagnostics médicaux	$70 \cdot 10^6$
Source radioactive médicale	$100\,000 \cdot 10^9$

**Doc n°4**

c. Dangerosité d'une source :

Plus l'activité d'une source est importante, plus elle est potentiellement dangereuse.

On sait que  $-\Delta N = \lambda \times N \times \Delta t$  donc  $A = \lambda \times N$ .

En l'exprimant en fonction de la demi-vie d'une source, on obtient :  $A = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \times N$

Ainsi l'activité d'une source **dépend de la demi-vie** mais aussi du **nombre de noyaux radioactifs présents** :

- Une source de courte demi-vie est potentiellement dangereuse si elle est abondante.





- Une source de longue demi-vie n'est pas très dangereuse, à condition qu'elle ne soit pas trop abondante.

d. Effets biologiques de la radioactivité<sup>(10)</sup> : (voir livre p 102)

L'action sur les tissus vivants dépend de plusieurs paramètres :

- Du **nombre de particules** reçues par seconde. Ce nombre **dépend de l'activité de la source** et de son éloignement.
- De l'énergie et de la nature des particules émises et donc reçues (voir II 3) .
- Du fractionnement de la dose reçue.
- De la nature des tissus touchés.

Les particules ionisantes et le rayonnement  $\gamma$  sont capables de **provoquer des réactions chimiques et des modifications dans la structure des molécules** constituant la matière vivante. En particulier, ils peuvent induire des mutations génétiques lorsque l'ADN se trouve modifié.

Mais il ne faut pas oublier que la radioactivité a également de **nombreuses applications en médecine** : radiothérapie, scintigraphie ...

IV Application de la radioactivité à la datation<sup>(14)</sup> :

1) Principe :

On connaît le comportement d'un échantillon de matière radioactive, la loi universelle s'écrit :

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

Ainsi, si on veut se servir de matière radioactive comme horloge, il faut que l'on évalue :

$$t = -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{N}{N_0}$$

Il faut donc utiliser un **échantillon radioactif dont  $\lambda$  est connue**, il faut **connaître  $N_0$**  et avoir un moyen de **déterminer  $N$** .

2) Comment choisir le radioélément à utiliser :

Il faut tout d'abord **estimer l'âge** de l'échantillon à dater, pour **choisir un radioélément dont la demi-vie est en rapport avec cet âge**.

Car au bout de  $10 \times t_{1/2}$ , on considère que les noyaux radioactifs sont tous désintégrés.

Par exemple, pour la datation des matériaux qui ont **jusqu'à 50 000 ans**, on utilise le **carbone 14 qui a une demi-vie de 5600 ans**.

3) La datation au carbone 14 :

Il faut partir de **deux hypothèses** :

- La répartition du carbone 14 dans l'atmosphère est homogène.
- La proportion de carbone 14 par rapport au carbone 12 est identique dans les tissus vivants et dans l'atmosphère, et ceci sur quelques dizaines de milliers d'années.

Ainsi la **composition de base est connue**.

A la mort de l'échantillon, il n'y a **plus d'échange** entre celui-ci et l'atmosphère, et la **proportion de carbone 14 dans les tissus morts décroît de manière exponentielle** : elle diminue par 2 tous les 5600 ans.

On mesure alors l'activité du **Carbone 14** dans l'échantillon, et on remonte à son âge.

Exercices n°19 p 110 + hors livre