# B Transformations nucléaires

## Décroissance radioactive

### 1.1 Stabilité et instabilité des noyaux

L’atome est constitué d’un noyau central et d’un nuage électronique. Le noyau est une zone de dimension très faible où se répartissent A nucléons : N neutrons et Z protons (A = Z + N).

Le noyau d’un atome correspondant à un élément chimique X est noté : 

Les isotopes sont des espèces qui ont le même nombre de protons et un nombre de neutrons différents.

*Exemple*   le noyau d’un atome de cuivre qui possède 29 protons et 34 neutrons

 un noyau isotope du précédent qui possède 29 protons et 36 neutrons

Le nombre de noyaux naturellement présents sur la Terre est d'environ 325. Le nombre total d'isotopes est porté à environ 2000 à partir des réactions nucléaires effectuées en laboratoire.

Si l'on reporte sur un graphique le nombre de neutrons (N) en fonction du nombre de protons (Z), on obtient le diagramme de tous les noyaux possibles :



La courbe en noir correspond aux noyaux stables. On remarque donc que ceux-ci sont peu nombreux par rapport à l'ensemble des noyaux possibles.

### 1.2 La radioactivité

Un noyau radioactif est instable et se désintègre spontanément en donnant un noyau différent et en émettant des particules α ou β et souvent un rayonnement γ.

▪ les particules α sont des noyaux d’hélium 

▪ les particules β sont des électrons ( ou β−) ou des positrons ( ou β+).

▪ le rayonnement γ est un onde électromagnétique de très courte longueur d’onde

#### Lois de conservation

Au cours d'une réaction nucléaire, il y a conservation de la charge électrique du noyau et conservation du nombre de nucléons.

▪ radioactivité α  (exemple )

▪ radioactivité β−  (exemple )

▪ radioactivité β+  (exemple )

Lors d'une désintégration, un noyau père instable expulse une particule. Le noyau fils issu de la désintégration est le plus souvent dans un excité (Y\*). Il redevient stable en libérant l'excédent d'énergie qu'il possède sous la forme d’un rayonnement γ :



### 1.3 Loi de décroissance

#### Caractère aléatoire d’une désintégration radioactive

La désintégration d'un noyau instable à un caractère aléatoire. Un matériau radioactif (contenant un grand nombre de noyaux instables) est donc un échantillon de grande taille dans lequel se répète un phénomène aléatoire un certain nombre de fois : c’est le domaine d'étude de la statistique. Les comptages en radioactivité utilisent donc la moyenne, la variance et l’écart-type du nombre de désintégrations enregistrées pendant un intervalle de temps donné.

#### Constante radioactive

Pour un échantillon contenant un seul type de noyaux radioactifs, la variation moyenne du nombre de noyaux ΔN (t) entre des instants très proches t et t + Δt est proportionnelle :

▪ au nombre de noyaux N (t) présents à l’instant t

▪ à la durée Δt



λ représente le coefficient de proportionnalité (nommé constante radioactive) qui ne dépend que du type de noyaux qui se désintègrent. La durée τ = 1/ λ est appelée constante de temps.

#### Evolution de la population moyenne d’un ensemble de noyaux radioactifs

Lorsque Δt → 0, l’équation ci-dessus devient  ou encore . C’est une équation différentielle dont la solution est appelée loi de décroissance radioactive :



N0 est le nombre de noyaux présents à la date t = 0 et N le nombre de noyaux encore présents à l’instant t.

#### La demi-vie

Pour un type de noyau radioactif, la demi-vie est la durée au bout de laquelle une population de noyaux est divisée par deux :

 ⇒  ⇒ 

Les relations entre la demi-vie t1/2, la constante de temps τ et la constante radioactive λ s’écrivent :



N

N0

tangente à la courbe de décroissance radioactive à l’instant t = 0



t

τ

t1/2

#### Activité d’un échantillon

L'activité moyenne A d'un échantillon radioactif est le nombre moyen de désintégrations qu'il produit par seconde :



L’unité de l’activité est le Becquerel (Bq). Un Becquerel est égal à une désintégration par seconde.

*Exemples*

▪ La radioactivité naturelle du corps humain est d’environ 100 000 Bq, dus essentiellement au carbone et au potassium 

▪ La radioactivité naturelle des roches, qui libèrent principalement du radon, mesurée en France est de quelques dizaines à quelques centaines de Becquerel par m³

#### Effets biologiques de la radioactivité

En traversant le corps, les particules α et β, ainsi que le rayonnement γ, provoquent des destructions cellulaires. A faible dose ces rayonnements sont responsables d'une augmentation des cancers et d'anomalies génétiques.

On parle d'irradiation lorsqu'un organisme se trouve à proximité d'une source radioactive. Il reçoit alors une partie du rayonnement émis par la source. Il y a contamination lorsque les produits radioactifs sont absorbés par les voies digestives ou respiratoires. Ils peuvent alors se désintégrer au sein même de l'organisme.

Le danger augmente avec l'activité A de la source radioactive, la proximité de la source, la durée d'exposition et le type de radioactivité (les particules α sont arrêtées par une feuille de papier ; les particules β par une fine plaque d’aluminium ; le rayonnement γ par une forte épaisseur de plomb ou de béton).

#### Application à la datation

Le carbone 14 est produit en permanence par le rayonnement cosmique à partir de l’azote dans la haute atmosphère. Les échanges qui se produisent entre l'atmosphère et le monde vivant maintiennent quasiment constant le rapport entre la quantité de carbone 14 et celle de carbone 12. Mais, dès qu'un organisme meurt, le carbone 14 qu'il contient n'est plus renouvelé puisque les échanges avec le monde extérieur cessent ; sa proportion se met à décroître car il est radioactif (t1/2 = 5 568 ans). Pour déterminer l'âge du matériau mort, on mesure l'activité résiduelle du carbone 14 d'un échantillon de matériau mort et on applique la formule :



A0 est, en première approximation, constante pour les êtres vivants et donnée dans les tables.

## Noyaux, masse, énergie

### 2.1 Equivalence masse énergie

#### Energie de liaison

La masse du noyau est inférieure à la somme des masses de chacun de ses nucléons. Cette masse Δm ne disparaît pas mais se transforme en énergie ΔE :



Cette énergie assure la cohésion des constituants du noyau : on l’appelle donc l’énergie de liaison du noyau.

#### Relation d’équivalence

La formule d’Einstein (E = mc2) montre que la masse au repos et l’énergie sont des grandeurs équivalentes. En effet, en mécanique classique, une particule libre au repos possède une énergie nulle.

La masse peut se transformer en énergie et réciproquement.

#### Unité de masse et d’énergie

L’électron-volt « eV » est une unité d’énergie bien adaptée à l'atome. C’est l'énergie reçue par un électron accéléré par une différence de potentiel de un volt :

We = (VA-VB).I.Δt = U.e = 1.1,6.10-19 = 1,6.10-19 J (cf. cours de 1ère S)

On utilise également le MeV (= 106 eV) mieux adapté à l'échelle du noyau.

La masse d'un noyau ou d'un atome est souvent exprimée en unité de masse atomique (symboles u). L’unité de masse atomique est le douzième de la masse d'un atome de carbone 12 :



D'après la relation ci-dessus, une masse égale à 1 u correspond à une énergie d'environ 931,5 MeV.

#### Energie de liaison par nucléon

L’énergie de liaison par nucléon n’est pas identique pour tous les noyaux :

  (MeV / nucléon)

260

220

200

180

160

140

120

100

80

60

40

20

240

0

A

-1



-2



-3

courbe d’Aston

-4

-5

-6

-7



-8



-9



faible pour les noyaux légers, elle augmente jusqu’aux noyaux de masse moyenne, se trouvant aux alentours du fer 56, et décroît ensuite.

### 2.2 Fission et fusion

L’évolution de l’énergie de liaison indique que les nucléons les plus liés appartiennent aux noyaux de masse moyenne. Donc, toutes les transformations de noyaux tendant à produire des noyaux de masse moyenne vont permettre de libérer de l’énergie. Ces transformations sont appelées réactions nucléaires.

  (MeV / nucléon)

fission

fusion

260

220

180

140

100

60

20

-8

-6

-4

-2

0

A

Elles sont de deux types :

▪ la fusion est une réaction nucléaire au cours de laquelle des noyaux très légers s’unissent en un noyau de taille moyenne

*Exemple* 

▪ la fission est une réaction nucléaire au cours de laquelle un noyau très lourd se casse en deux noyaux de taille moyenne

*Exemple* 

### 2.3 Bilan de masse et d’énergie d’une réaction nucléaire

*Exemple pour la radioactivité* 

- perte de masse |Δm| = m () - m () - m () = 8,6.10-30 kg

- perte d’énergie |ΔE| = Δm.c2 = 8,6.10-30 . (3.108)2 = 7,8.10-13 J = 4,9 MeV

*Exemple pour la fission* 

- énergie libérée E = El () + El () - El () = 94 . 8,593 + 140 . 8,290 - 235 . 7,59

 = 808 + 1161 - 1784 = 185 MeV

- cette énergie libérée est aussi égale à la perte de masse d’après la relation d’équivalence

*Exemple pour la fusion* 

- perte de masse |Δm| = m () + m () - m () - m ()

 = 2,01355 + 3,01550 - 4,00150 - 1,00866 = 1,889.10-2 u

- perte d’énergie |ΔE| = Δm.c2 = 1,889.10-2 . 931,5 = 17,6 MeV

#### Amorçage des réactions de fission et de fusion

Dans toute masse d'uranium, les noyaux atomiques subissent sporadiquement des fissions spontanées. Les neutrons générées peuvent sortir de la masse ou être absorbé par un autre noyau rencontré en chemin, lequel peut alors fissionner à son tour ...

Lorsqu'on rassemble une certaine quantité d'uranium 235, il existe une « masse critique » à partir de laquelle se produit, spontanément, une « réaction en chaîne » qui aboutit à l'explosion nucléaire. En fait, cette réaction en chaîne se produit déjà en deçà de la masse critique, mais elle n'est pas dans ce cas explosive.

La fusion nécessite de porter la matière à des températures très élevées, qui se chiffrent en millions de degrés (c'est pourquoi on parle de fusion thermonucléaire). L’explosion d'une bombe à fission est capable de « chauffer » suffisamment l’hydrogène pour amorcer une réaction de fusion. Depuis une trentaine d’années de nombreux laboratoires tentent de surmonter les problèmes techniques liés au contrôle de la fusion.

## Notations, unités et valeurs

A nombre de masse ou nombre de nucléons. [ A ] = sans unité

A activité d’un échantillon radioactif. [ A ] = Bq

c célérité de la lumière dans le vide. c = 3.108 m.s-1

d opérateur différentiel.

d/dt opérateur de dérivation.

e charge élémentaire. e = 1,6.10-19 C

E énergie. [ E ] = J

El énergie de liaison du noyau. [ El ] = J

eV unité d’énergie adaptée à l'atome. 1 eV = 1,6.10-19 J

I intensité d’un courant électrique continu. [ I ] = A

m masse. [ m ] = kg

N nombre de neutrons d’un noyau. [ N ] = sans unité

N nombre de noyaux à l’instant t. [ N ] = sans unité

t temps. [ t ] = s

t1/2 temps de demi-vie d’un type de noyau radioactif. [ t1/2 ] = s

u unité de masse atomique. 1 u = 1,66054.10-27 kg

VA potentiel électrique au point A. [ VA ] = V

We travail électrique. [ We ] = J

Z nombre de charge ou numéro atomique. [ Z ] = sans unité

α noyau d’hélium 

β+ positron 

β− électron 

Δ variation d’une quantité physique. Δ = quantité finale – quantité initiale

γ rayonnement électromagnétique très énergétique

λ constante radioactive. [ λ ] = s-1

τ constante de temps. [ τ ] = s

## Connaissances et savoir-faire exigibles

1 Décroissance radioactive

Connaître la signification du symbole  et donner la composition du noyau correspondant.

Définir l’isotopie et reconnaître des isotopes.

Reconnaître les domaines de stabilité et d’instabilité des noyaux sur un diagramme (N,Z).

Définir un noyau radioactif.

Connaître et utiliser les lois de conservation.

Définir la radioactivité α, β−, β+, l’émission γet écrire l’équation d’une réaction nucléaire pour une émission α, β−, β+ en appliquant les lois de conservation.

À partir de l’équation d’une réaction nucléaire, reconnaître le type de radioactivité.

Connaître l’expression de la loi de décroissance et exploiter la courbe de décroissance.

Savoir que 1 Bq est égal à une désintégration par seconde.

Expliquer la signification et l’importance de l’activité dans le cadre des effets biologiques.

Connaître la définition de la constante de temps et du temps de demi-vie.

Utiliser les relations entre τ, λ et t 1/2

Déterminer l’unité de λou de τ par analyse dimensionnelle.

Expliquer le principe de la datation, le choix du radioélément et dater un événement.

2 Noyaux, masse, énergie

Définir et calculer un défaut de masse et une énergie de liaison.

Définir et calculer l’énergie de liaison par nucléon.

Savoir convertir des J en eV et réciproquement.

Connaître la relation d’équivalence masse énergie et calculer une énergie de masse.

Commenter la courbe d’Aston pour dégager l’intérêt énergétique des fissions et des fusions.

Définir la fission et la fusion et écrire les équations des réactions nucléaires en appliquant les lois de conservation.

A partir de l’équation d’une réaction nucléaire, reconnaître le type de réaction.

Faire le bilan énergétique d’une réaction nucléaire en comparant les énergies de masse.