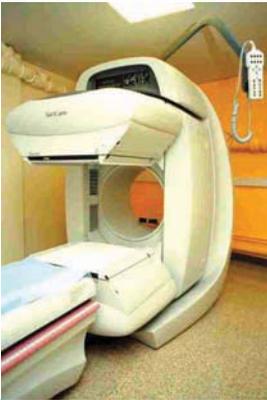


REACTIONS NUCLÉAIRES

1 1



En même temps que le "nucléaire" est utilisé à des fins pacifiques, comme pour produire de l'électricité ou pour faire de l'imagerie médicale, il peut avoir des effets catastrophiques pour la nature et l'humanité.

- ♦ Quel est le principe de datation des éruptions volcaniques ainsi que des momies pharaoniques ?
- ♦ En quoi diffère la centrale d'électricité thermonucléaire de la centrale thermique classique ?
- ♦ Qu'est-ce qu'un réacteur nucléaire ?
- ♦ En quoi consistait l'accident survenu le 26 avril 1986 dans la centrale thermonucléaire de la ville de Tchernobyl en Ukraine ? En quoi consiste la gravité de cet accident et quelles sont ses conséquences néfastes pour le considérer jusqu'à maintenant comme étant la plus grande catastrophe du nucléaire civil ?

REACTIONS NUCLÉAIRES

Selon leur énergie de liaison par nucléon, certains noyaux sont stables et gardent indéfiniment la même composition. D'autres sont instables et se transforment spontanément en émettant un rayonnement. Ces noyaux sont dits radioactifs. On parlera alors de réactions nucléaires spontanées du fait que ces transformations nucléaires se produisent sans intervention d'agent extérieur.

Il est possible également de provoquer la transformation d'un ou de plusieurs noyaux, relativement stables en d'autres noyaux. On parlera alors de réaction nucléaire provoquée.

Pour le grand public, le nucléaire est un mot qui symbolise le progrès scientifique et technologique d'un pays. Mais, il est aussi synonyme de danger, source de méfiance et porteur d'inquiétude. Pourtant, l'explication des processus mis en jeu est relativement simple.

REACTIONS NUCLEAIRES SPONTANÉES RADIOACTIVITÉ

1 LE PHÉNOMÈNE DE RADIOACTIVITÉ

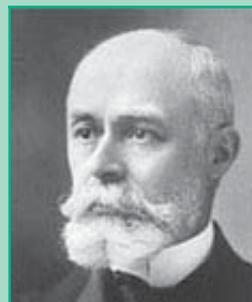
Activité documentaire

En 1896, Henri Becquerel étudie, après la découverte des rayons X en 1895 par Roentgen, l'émission X des substances fluorescentes. Il découvre par hasard l'impression de plaques photographiques rangées dans un tiroir obscur avec un échantillon de sulfate double de potassium et d'uranium. Il recommence l'expérience avec des composés d'uranium non fluorescents. Celle-ci se révèle positive. Becquerel suppose l'existence de rayons pénétrants, émis par les sels d'uranium responsables de l'impression des plaques photographiques. Il appelle ces rayons «rayons uraniques».

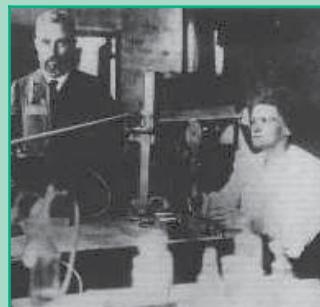
Au début de 1898, Marie Curie, physicienne française d'origine polonaise, découvre que les minerais d'uranium, comme la pechblende, émettent plus de rayonnements que l'uranium lui-même. Elle déduit que ces substances contiennent un élément beaucoup plus actif que l'uranium, le polonium qu'elle réussit à isoler avec l'aide de son mari Pierre Curie en Juillet 1898. Marie Curie détermine les propriétés du polonium et donne au phénomène d'émission de rayonnements le nom de radioactivité.

Pierre et Marie Curie découvrent et isolent en décembre 1898 un autre élément nouveau, le radium.

En 1934, Irène et Frédéric Joliot Curie découvrent la radioactivité artificielle en observant qu'une plaque d'aluminium devient radioactive sous l'effet d'un bombardement de particules α (noyaux d'atomes d'hélium). Cette découverte devrait ouvrir une nouvelle étape extrêmement féconde dans l'étude des phénomènes radioactifs.



Henri Becquerel
(1852-1908)



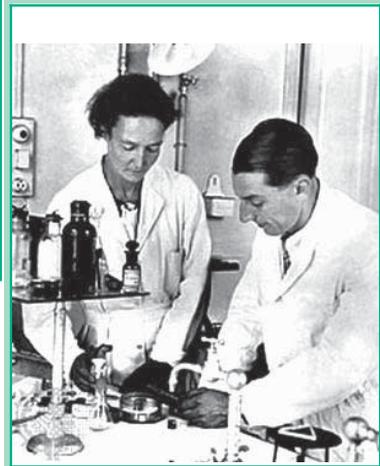
Pierre et Marie Curie
au laboratoire

Questions

- 1°) Qu'est-ce qui a amené Becquerel à supposer que les sels d'uranium qu'il a utilisés émettent un rayonnement pénétrant ?
- 2°) Qu'est-ce qui montre dans le texte que c'est Marie Curie et non Henry Becquerel qui a découvert la radioactivité ?
- 3°) Qu'est-ce qu'un corps radioactif d'après le texte ?
- 4°) Quand est-ce que la radioactivité est dite artificielle ?

Définition

La radioactivité est la transformation spontanée d'un noyau atomique instable en noyau d'une autre espèce chimique, avec émission de rayonnement. Un tel noyau est dit radioactif ; il est appelé parfois improprement radioélément.



Irène et Frédéric Joliot Curie
au laboratoire

2

LES DIFFERENTS TYPES DE RAYONNEMENTS RADIOACTIFS

2.1- MISE EN ÉVIDENCE EXPÉRIMENTALE

Vers 1899, Becquerel découvre qu'une partie du rayonnement émis par les sels d'uranium porte de l'électricité. Il lui vient l'idée d'étudier l'action d'un champ magnétique sur un faisceau de ces rayons.

Expérience

On place un sel de radium au fond d'une cavité étroite percée dans un cylindre de plomb à parois épaisses. Devant ce dernier et perpendiculairement à son axe, on place un écran E. Dans la zone qui les sépare on fait régner un champ électrique ou magnétique uniforme.

On observe alors sur l'écran E trois points d'impact A, B et C (Fig.1 et Fig.2).

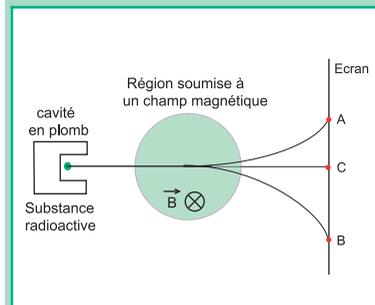


Fig.1 : Action d'un champ magnétique sur le rayonnement

Questions

- 1°) Qu'est-ce qui montre dans l'expérience réalisée que la radioactivité du radium consiste en l'émission de trois rayonnements différents ?
- 2°) En s'appuyant sur la disposition des trois points d'impact, montrer que le radium radioactif émet des particules chargées positivement et d'autres chargées négativement.
- 3°) Identifier le troisième type de rayonnement émis par le radium.

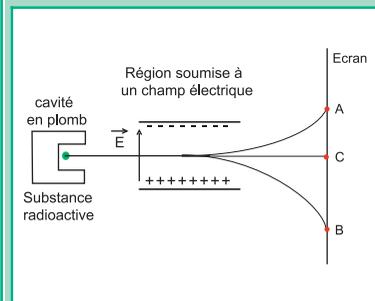


Fig.2 : Action d'un champ électrique sur le rayonnement

Interprétation

Les trois points d'impact obtenus sur l'écran montrent que le sel de radium émet spontanément un rayonnement. On dit alors que le sel de radium est une substance radioactive.

Aussi bien dans le cas de la figure 1 que dans le cas de la figure 2 :

* les rayons qui arrivent au point A sont porteurs de charges positives. Ils correspondent à l'émission d'un rayonnement connu sous le nom de rayonnement α . Il s'agit de noyaux d'hélium (ou hélions) ${}^4_2\text{He}$.

* Les rayons qui arrivent au point B sont porteurs de charges négatives, ils constituent un rayonnement connu sous le nom de rayonnement β^- . Il est constitué d'électrons ${}^0_{-1}e$.

* Les rayons qui arrivent au point C ne sont pas des corpuscules chargés puisqu'ils ne sont pas déviés. Il s'agit d'un rayonnement constitué de photons de très courte longueur d'onde (de l'ordre de 10^{-4} nm) connu sous le nom de rayonnement γ .

Conclusion

- Le rayonnement α est constitué par des particules α (noyaux d'hélium ou hélions) de symbole ${}^4_2\text{He}$.
- Le rayonnement β^- est constitué par des électrons de symbole ${}^0_{-1}e$.
- La rayonnement γ est constitué de photons.

L'étude des particules émises par certains radioéléments artificiels révèle l'existence d'une autre particule déviée en sens inverse à l'électron mais de même masse. Cette particule a été identifiée à un électron positif ou positon (on dit aussi positron) 0_1e . Le rayonnement correspondant est le rayonnement β^+ .

2.2- PROPRIÉTÉS DES RAYONNEMENTS RADIOACTIFS

* Pouvoir d'ionisation et pouvoir de pénétration

- Les particules α , émises avec des vitesses de l'ordre de $20000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, sont très ionisantes et très peu pénétrantes ; elles sont arrêtées par des plaques très minces d'aluminium, une feuille de papier ou quelques centimètres d'air par exemple (Fig.3).

- Les particules β^- sont émises avec des vitesses qui peuvent être extrêmement grandes, atteignant $290000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ et possédant donc une grande énergie. Elles sont beaucoup moins ionisantes mais plus pénétrantes que les particules α : elles sont arrêtées par un écran de plexiglas ou par une plaque d'aluminium d'une épaisseur de l'ordre de 7 mm (Fig.3).

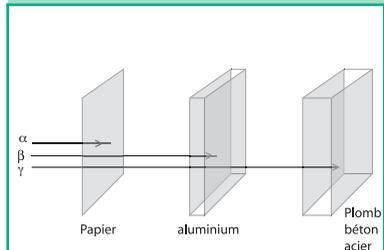


Fig.3 : Pouvoir de pénétration des rayonnements radioactifs

- Les particules β^+ ont des pouvoirs d'ionisation et de pénétration identiques à ceux de β^- .

- Le rayonnement de haute énergie γ est peu ionisant mais très pénétrant : il peut traverser un bloc de plomb, d'acier ou de béton d'une épaisseur de l'ordre de 20 cm (Fig.3).

* **Impression d'une plaque photographique** (fait découvert par Becquerel)

* **Luminescence d'un écran au sulfure de zinc** (apparition de scintillations en différents points de l'écran).

* **Ionisation des gaz**

Un électroscope chargé et placé au voisinage d'une substance radioactive se décharge quel que soit le signe de la charge portée par l'appareil. Cette propriété d'ioniser les gaz est exploitée pour fabriquer des détecteurs de rayonnements radioactifs. Le compteur privilégié pour sa facilité d'emploi est le compteur Geiger-Muller (Fig.4).

* **Indépendance de la pression et de la température**

Les facteurs qui influent habituellement sur les transformations chimiques comme la pression et la température (à condition qu'elle ne soit pas excessivement élevée) n'ont pas d'influence sur la radioactivité.

* **La radioactivité est un phénomène nucléaire**

Tant dans un corps simple que dans un corps composé et quel que soit son état physique (solide, liquide ou gazeux), la radioactivité d'un élément chimique est la même. De plus, les propriétés chimiques d'un isotope radioactif d'un élément donné sont les mêmes que celles d'un isotope non radioactif du même élément. Donc, la radioactivité est une propriété du noyau. Par conséquent, il n'est pas nécessaire d'isoler un élément radioactif pour utiliser son rayonnement.

APPLICATION

Etant un phénomène nucléaire, la radioactivité est utilisée pour étudier certains mécanismes de réactions chimiques ou des phénomènes biologiques au moyen d'isotopes radioactifs appelés «traceurs». Leur radioactivité permet de suivre leur cheminement dans un organisme, des canalisations d'eaux souterraines ou dans une réaction chimique.

* **Les effets biologiques de la radioactivité**

Etant donné que la radioactivité s'accompagne de l'émission de particules (α , β^- , β^+ , γ) très énergiques, celles-ci sont capables d'ioniser les atomes qu'ils rencontrent en leur arrachant des électrons. Les ions obtenus sont particulièrement réactifs avec les molécules qui les entourent. Dans le cas d'une molécule d'ADN, celle-ci est à l'origine d'une cellule cancéreuse lorsqu'elle est modifiée.

Les conséquences d'une exposition anormale de l'organisme à un rayonnement radioactif dépendent de la durée de l'exposition et de l'importance du rayonnement.



Fig.4 : Compteur Geiger Muller

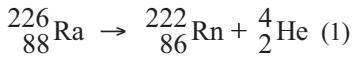
On dit qu'il y a **irradiation** lorsque l'organisme est exposé à un rayonnement inhabituel pendant une durée limitée. C'est le cas, par exemple, d'un patient subissant une radiographie. Les effets sur l'organisme dépendent de l'énergie reçue par ce dernier, elle-même dépendant de la fraîcheur de la source radioactive, de la durée d'exposition et de sa fréquence (exceptionnelle, répétitive).

On dit qu'il y a **contamination** lorsqu'un échantillon radioactif est absorbé par l'organisme. La contamination peut être accidentelle (ingestion ou respiration de substance radioactive) ou bien volontaire (en imagerie médicale par exemple). L'organisme sera exposé au rayonnement radioactif pendant toute la durée où l'échantillon se trouve absorbé et actif.

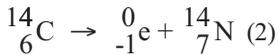
3 MECANISMES NUCLEAIRES

Question

Étant radioactif, le radium 226 (${}^{226}_{88}\text{Ra}$) se désintègre spontanément en noyaux de radon 222 (${}^{222}_{86}\text{Rn}$) avec émission de particules α selon l'équation :



De même, le carbone 14 se désintègre spontanément en azote 14 avec émission d'un rayonnement β^- selon l'équation :



Comparer dans les équations (1) et (2) les nombres de charge et les nombres de masse avant et après la réaction nucléaire considérée et en déduire que ces équations obéissent à des règles que l'on précisera.

Dans chacune des équations (1) et (2) écrites ci-dessus, on constate qu'il y a conservation du nombre de charge et du nombre de masse. En fait, la radioactivité obéit aux lois de conservation suivantes :

- **Conservation de l'énergie totale**
- **Conservation de la quantité de mouvement** (hors programme)
- **Conservation du nombre de charge** : la charge électrique totale du système se conserve (loi de SODDY).
- **Conservation du nombre de masse** : la somme des nombres de nucléons des noyaux formés est égale à la somme des nombres de nucléons des noyaux initiaux.

3.1- MÉCANISME DE LA RADIOACTIVITÉ α

La radioactivité α correspond à la transformation spontanée d'un noyau ${}^A_Z X$ en un noyau ${}^{A'}_{Z'} Y$ avec émission d'une particule α .

Question

Par application des lois de conservation du nombre de charge et du nombre de masse, écrire l'équation générale traduisant la radioactivité α .

La radioactivité α est traduite par l'équation : ${}^A_Z X \rightarrow {}^4_2 \text{He} + {}^{A'}_{Z'} Y$

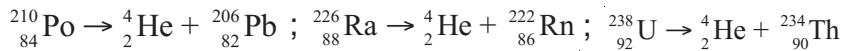
La loi de conservation du nombre de charge donne : $Z = 2 + Z'$, d'où : $Z' = Z - 2$.

La loi de conservation du nombre de masse donne : $A = 4 + A'$, d'où : $A' = A - 4$.

Ainsi, l'équation bilan d'une transformation radioactive α (ou désintégration α) s'écrit : ${}^A_Z X \rightarrow {}^4_2 \text{He} + {}^{A-4}_{Z-2} Y$

Le noyau X désintégré est appelé noyau père ; le noyau Y formé est appelé noyau fils.

Exemples :

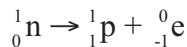


Remarque

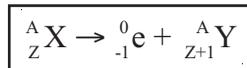
La radioactivité α concerne les noyaux lourds, noyaux instables à cause d'un excès de nucléons ($A > 200$).

3.2- MÉCANISME DE LA RADIOACTIVITÉ β^-

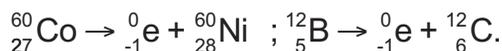
La radioactivité β^- correspond à la désintégration d'un noyau ${}^A_Z X$ en un noyau ${}^{A'}_{Z'} Y$ avec émission d'électron. Comme dans le noyau il n'y a pas d'électrons, un neutron se transforme au sein du noyau en un proton qui y demeure et un électron qui est éjecté selon l'équation bilan :



En procédant de la même manière que pour la radioactivité α , on montre que l'équation bilan d'une réaction nucléaire de type β^- s'écrit :



Exemples :



Remarque

La radioactivité β^- est caractéristique des noyaux présentant un excès de neutrons.

3.3- MÉCANISME DE LA RADIOACTIVITÉ β^+

La radioactivité β^+ correspond à la désintégration d'un noyau ${}^A_Z X$ en un noyau ${}^{A'}_{Z'} Y$ avec émission d'un positon ${}^0_1 e$ selon l'équation

$$\text{bilan : } {}^A_Z X \rightarrow {}^0_1 e + {}^{A'}_{Z-1} Y$$

$$\text{Exemples : } {}^{30}_{15} P \rightarrow {}^{30}_{14} Si + {}^0_1 e \quad ; \quad {}^{11}_6 C \rightarrow {}^{11}_5 B + {}^0_1 e$$

Question

Expliquer l'origine de la particule ${}^0_1 e$.

Interprétation :

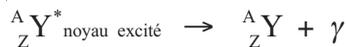
Comme le noyau ne contient pas de positons, un proton se transforme au sein du noyau en un neutron qui y demeure et un positon qui est expulsé selon l'équation bilan :

$${}^1_1 p \rightarrow {}^1_0 n + {}^0_1 e$$

La radioactivité β^+ est caractéristique des noyaux présentant un excès de protons. Or, de tels noyaux n'existent pas dans la nature ; ils sont produits au laboratoire. On dit qu'il s'agit d'une radioactivité artificielle.

3.4- EMISSION γ

Le rayonnement γ est dû à l'obtention à un état excité du noyau formé par radioactivité α ou β . En fait, il est émis avec le retour de ce noyau à son état fondamental selon le schéma suivant :



Les rayons γ étant très pénétrants, ils sont utiles et dangereux à la fois. En revanche, les rayonnements α et β sont moins dangereux puisqu'ils sont rapidement arrêtés.

Remarque : notion de famille radioactive

La radioactivité entraîne la transformation d'un noyau en un autre. Si ce dernier est lui même radioactif, il se désintégrera à son tour et ainsi de suite jusqu'à ce que le noyau obtenu soit stable. L'ensemble de ces noyaux constitue la famille radioactive du noyau ascendant appelé noyau père.

La famille la plus connue est celle de l'uranium ${}^{238}_{92} U$ qui conduit à l'isotope stable ${}^{206}_{82} Pb$ du plomb.

4 EVOLUTION TEMPORELLE DE LA RADIOACTIVITÉ

4.1- DÉCROISSANCE RADIOACTIVE

Considérons un échantillon de substance radioactive qui contient N_0 noyaux à l'instant $t = 0$.

Soit N le nombre de noyaux radioactifs présents dans l'échantillon à un instant $t > 0$.

Questions

1°) Comparer N à N_0 .

2°) Soit dN la variation moyenne de N entre les instants t et $t + dt$, où dt est un intervalle de temps infinitésimal. On admet que dN s'écrit : $dN = -\lambda N dt$, avec λ une constante positive.

a) Justifier le signe (-) figurant dans l'expression de dN .

b) Montrer que N s'écrit : $N = N_0 e^{-\lambda t}$.

L'échantillon étant radioactif, le nombre de noyaux qu'il renferme diminue au cours du temps. Donc, N est inférieur à N_0 .

Entre les instants t et $t + dt$, le nombre de noyaux non désintégrés diminue en moyenne de dN .

dN représente donc le nombre moyen de noyaux qui se désintègrent pendant l'intervalle de temps dt .

Dans l'expression $dN = -\lambda N dt$, le signe (-) traduit la diminution du nombre de noyaux présents dans l'échantillon à l'instant t .

Etant une caractéristique de l'élément radioactif, λ est appelée constante radioactive. Ayant la dimension de l'inverse d'un temps, elle est exprimée en s^{-1} .

Par intégration de la relation : $\frac{dN}{N} = -\lambda dt$, on obtient :

$$\ln N = -\lambda t + C$$

La constante d'intégration C est déterminée par les conditions initiales :

A l'instant $t = 0$, $\ln N_0 = C$. Il vient donc : $\ln N = -\lambda t + \ln N_0$
d'où : $\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$, ce qui conduit à : $N = N_0 e^{-\lambda t}$. Cette rela-

tion exprime la **loi de décroissance radioactive** (Fig 5).

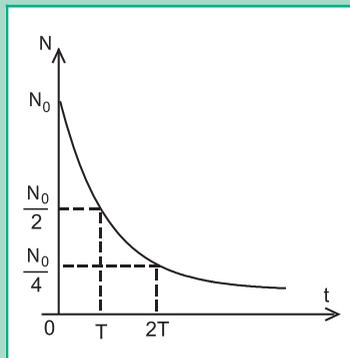


Fig. 5 : Courbe de la loi de décroissance radioactive

4.2- ACTIVITÉ D'UNE SOURCE RADIOACTIVE

Définition

On appelle activité d'une substance radioactive, notée A , le nombre de désintégrations qu'elle subit pendant une seconde.

Loi de décroissance de l'activité

D'après sa définition, l'activité s'écrit : $A = - \frac{dN}{dt}$.

Or, $dN = - \lambda N dt$. Donc, $A = \lambda N$

Sachant que $N = N_0 e^{-\lambda t}$, il vient : $A = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$. $\lambda N_0 = A_0$ activité à l'instant $t = 0$, on a finalement : $A = A_0 e^{-\lambda t}$.

L'activité s'exprime en becquerel (Bq).

Un becquerel correspond à une désintégration par seconde.

Comme le nombre N , l'activité A est une fonction exponentielle du temps (Fig.6).

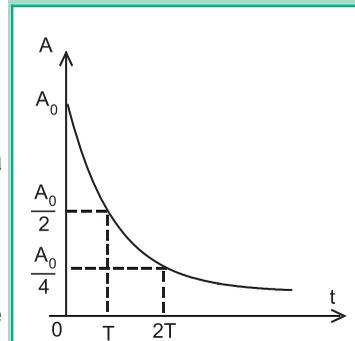


Fig. 6 : Courbe de la loi de décroissance de l'activité.

4.3- PÉRIODE RADIOACTIVE

Définition

On appelle période radioactive ou demi-vie d'une substance radioactive, la durée T au bout de laquelle le nombre de noyaux radioactifs initialement présents dans un échantillon de cette substance diminue de moitié.

A l'instant $t = T$, on a : $N = \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T}$, ce qui entraîne : $\frac{1}{2} = e^{-\lambda T}$

D'où : $T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$

Comme la constante radioactive λ , la période est une caractéristique du noyau radioactif ; elle peut varier de 10^{-15} s à 10^{23} s.

Exemples :

Noyau radioactif	${}^{214}_{84}\text{Po}$	${}^{214}_{83}\text{Bi}$	${}^{123}_{53}\text{I}$	${}^{137}_{55}\text{Cs}$	${}^{14}_6\text{C}$	${}^{238}_{92}\text{U}$
Période ou demi-vie	$1,5 \cdot 10^{-4}$ s	19,7 min	13,2 heures	30,2 ans	5730 ans	$4,5 \cdot 10^9$ ans

4.4- APPLICATION : DATATION PAR LE CARBONE 14

La méthode de datation au carbone 14, mise au point il y a environ une cinquantaine d'années, permet de dater des objets très anciens, comme des éruptions volcaniques ou des momies pharaoniques par exemple.

Les organismes vivants assimilent indifféremment les deux isotopes ${}^{12}_6\text{C}$ et ${}^{14}_6\text{C}$ du carbone qui restent en proportion relative constante dans l'organisme. A la mort des êtres vivants, le ${}^{14}_6\text{C}$ ne peut se renouveler dans l'organisme dans la mesure où le processus d'assimilation s'arrête.

Etant radioactif, le carbone 14 se désintègre selon une radioactivité β^- avec une période de 5730 ans. Par conséquent, le rapport

port $\frac{{}^{14}_6\text{C}}{{}^{12}_6\text{C}}$ diminue.

Questions

Pour connaître l'époque à laquelle vécurent des hommes préhistoriques dans une caverne, on mesure l'activité d'un échantillon de charbon de bois enfui dans le sol de la grotte. Il s'avère alors que le nombre de désintégrations n'est plus que 1,6 par minute, alors qu'il serait 11,5 par minute pour un échantillon de même masse de bois récemment coupé.

1°) Montrer que le temps écoulé depuis le dernier feu dans la grotte s'exprime par :

$$t = - \frac{T}{0,693} \ln \frac{A}{A_0} \quad , \text{ où } T \text{ est la période radioactive de } {}^{14}_6\text{C},$$

A_0 et A désignent respectivement les activités des échantillons considérés aux instants $t_0 = 0$ et $t > 0$.

2°) Sachant que $T = 5730$ ans, calculer t .

Remarque

Pour dater des échantillons plus vieux, on utilise des noyaux de période radioactive plus longue comme l'uranium 238 qui a permis de déterminer par exemple l'âge de la Terre estimé à 4,6 milliards d'années.

RÉACTIONS NUCLÉAIRES PROVOQUÉES

La découverte de la radioactivité en 1896 et son interprétation comme étant une réaction nucléaire spontanée ont poussé les chercheurs à faire des essais de réactions nucléaires provoquées. En 1938, on avait abouti à la mise en évidence de la fission et en 1952, on avait réalisé la première fusion nucléaire (bombe H).

1 LA RÉACTION DE FISSION

1.1- DÉFINITION

La réaction de fission est une réaction nucléaire au cours de laquelle un noyau lourd se scinde en deux noyaux plus légers et de masses comparables.

1.2- PRODUCTION D'UNE RÉACTION DE FISSION

La réaction de fission a pu être provoquée à partir de noyaux d'uranium et de plutonium bombardés le plus souvent par des neutrons lents. Étant une particule électriquement neutre, un neutron ne subit pas de répulsion de la part du noyau cible.

Dans toute réaction de fission, le noyau cible capte la particule incidente et se retrouve dans un état d'excitation et de déformation provoquant sa division en deux noyaux de masses moyennes (Fig.7a).

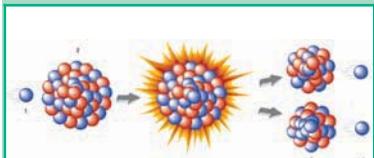
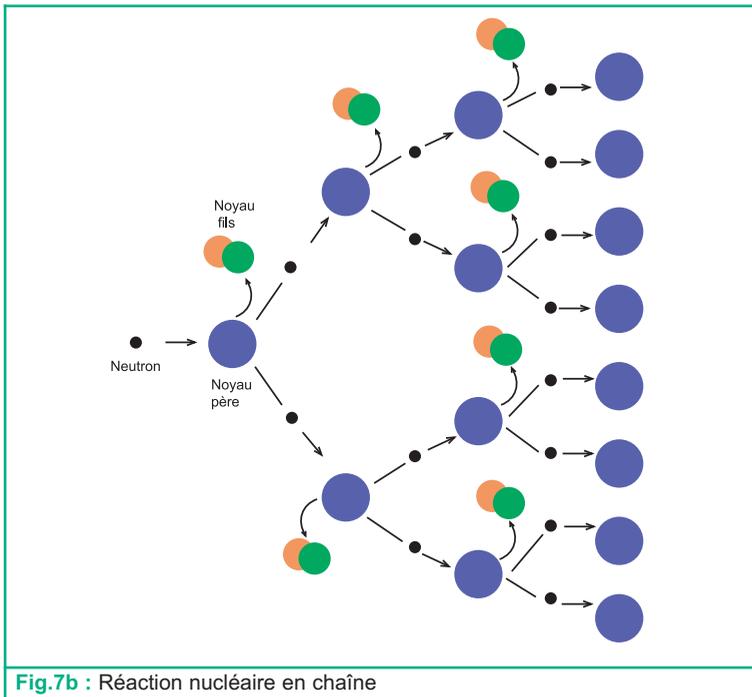


Fig.7a : Schéma d'une réaction de fission

Le noyau le plus utilisé est l'uranium 235, mais on utilise aussi l'uranium 233 et le plutonium 239.

Les noyaux qui subissent la fission sont dits fissiles.

Dans une réaction de fission, il y a émission de deux ou trois neutrons ; ceux-ci peuvent à leur tour provoquer la fission d'autres noyaux et ainsi de suite : c'est une réaction en chaîne (Fig.7b). La fission nucléaire est une réaction très énergétique. Dans le cas où cette réaction en chaîne n'est pas contrôlée, l'énergie libérée augmente très rapidement et il y a explosion, c'est la bombe atomique ou bombe A. Par contre, si le flux de neutrons émis est contrôlé, l'énergie libérée par unité de temps est constante, on dit que la réaction en chaîne est contrôlée. C'est le cas d'un réacteur de centrale nucléaire par exemple.



1.3- ÉQUATION GÉNÉRALE D'UNE RÉACTION DE FISSION

Questions

Soit ${}^A_Z X$ un noyau lourd qui subit la fission : sous l'impact d'un neutron ${}_0^1 n$, il se scinde en deux noyaux ${}^{A_1}_{Z_1} X_1$ et ${}^{A_2}_{Z_2} X_2$ avec libération de k neutrons.

1°) a) Par application des lois de conservation du nombre de charge et du nombre de masse, trouver la relation entre Z , Z_1 et Z_2 ainsi que la relation entre A , A_1 , A_2 et k .

b) En déduire l'équation générale d'une réaction de fission.

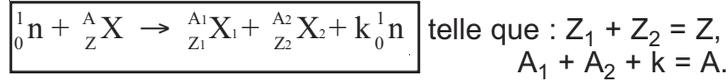
2°) Par fission d'un noyau d'uranium 235, il se forme un noyau de césium ${}_{55}^{140}\text{Cs}$ et un noyau ${}_{Z_2}^{93}\text{X}_2$, avec éjection de k neutrons.

a) Calculer Z_2 et identifier X_2 en se référant au tableau suivant :

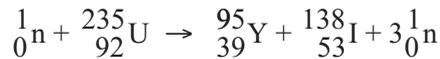
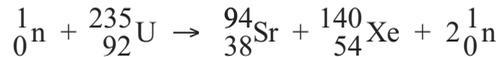
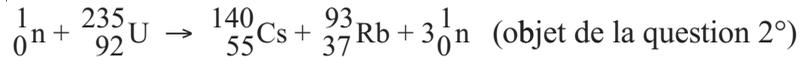
Élément chimique	Brome	Krypton	Rubidium	Strontium
Symbole	Br	Kr	Rb	Sr
Nombre de charge	35	36	37	38

b) Déterminer le nombre k de neutrons libérés.

Par application des lois de conservation du nombre de charge et du nombre de masse, l'équation générale d'une réaction de fission s'écrit :



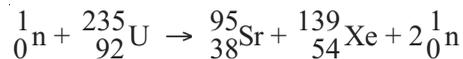
Exemples :



1.4- ENERGIE LIBÉRÉE PAR LA FISSION

Question

Montrer à l'aide de l'exemple suivant, qu'une réaction de fission libère, suite au défaut de masse Δm qui l'accompagne, une importante quantité d'énergie E :



D'après la loi de conservation de l'énergie totale du système de particules mises en jeu, on a :

$$E = \Delta m \cdot c^2.$$

$$\Delta m = \{m({}^{235}_{92}\text{U}) + m({}^1_0\text{n})\} - \{m({}^{95}_{38}\text{Sr}) + m({}^{139}_{54}\text{Xe}) + 2 m({}^1_0\text{n})\}$$

Avec les masses des particules concernées par la réaction :

$$m({}^{235}_{92}\text{U}) = 234,9934 \text{ u}, \text{ avec : } 1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV} \cdot c^{-2},$$

$$m({}^{139}_{54}\text{Xe}) = 138,8888 \text{ u},$$

$$m({}^{95}_{38}\text{Sr}) = 94,8064 \text{ u},$$

$$m({}^1_0\text{n}) = 1,0087 \text{ u},$$

la perte de masse qui accompagne la réaction est $0,2115 \text{ u}$, soit $197 \text{ MeV} \cdot c^{-2}$.

Rapportée à une mole d'atomes, l'énergie libérée est d'environ $2 \cdot 10^{13} \text{ J}$ ou encore $5,5 \cdot 10^6 \text{ kWh}$. C'est cette énergie que l'on exploite dans les réacteurs nucléaires (Fig.8).



Fig. 8 : Centrale thermonucléaire

2 LA RÉACTION DE FUSION

2.1- DÉFINITION

La fusion est une réaction nucléaire au cours de laquelle deux noyaux légers s'unissent pour former un noyau plus lourd.

Exemple :

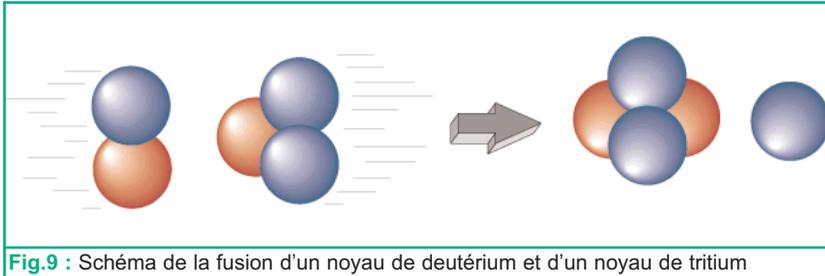


Fig.9 : Schéma de la fusion d'un noyau de deutérium et d'un noyau de tritium

2.2- PRODUCTION D'UNE RÉACTION DE FUSION

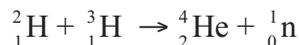
Pour réaliser une réaction de fusion, la plus grande difficulté réside dans la répulsion électrostatique. Les noyaux doivent pouvoir s'approcher extrêmement les uns des autres. Ceci ne peut être réalisé qu'à une température de l'ordre de 10^8 K. Donc, la fusion ne peut être réalisée qu'à des températures excessivement élevées (une centaine de millions de degrés). Le premier essai de production d'une réaction de fusion fut réalisé par les américains en 1952 et ce en faisant exploser la première bombe H dans l'océan pacifique (Fig.10).



Fig.10 : Explosion de la première bombe H testée, le 31 octobre 1952

2.3- ENERGIE LIBÉRÉE PAR LA FUSION

Pour déterminer l'ordre de grandeur de l'énergie libérée par une réaction de fusion, on peut s'appuyer sur l'exemple cité précédemment :



Questions

- 1°) Calculer la quantité d'énergie E libérée au cours de la formation d'un noyau d'hélium ${}^4_2\text{He}$ par la fusion d'un noyau de deutérium ${}^2_1\text{H}$ et d'un noyau de tritium ${}^3_1\text{H}$.
- 2°) La comparer à la quantité d'énergie libérée par la fission du noyau ${}^{235}_{92}\text{U}$ (calculée dans le paragraphe 1).
- 3°) Peut-on s'appuyer sur cette comparaison pour affirmer si la fusion est plus exoénergétique ou bien moins exoénergétique que la fission et pourquoi ?

$$E = Dm \cdot c^2.$$

$$Dm = \{m({}_1^2\text{H}) + m({}_1^3\text{H})\} - \{m({}_2^4\text{He}) + m({}_0^1\text{n})\}.$$

$$\text{Avec } m({}_1^2\text{H}) = 2,01355 \text{ u}, m({}_1^3\text{H}) = 3,01550 \text{ u};$$

$$m({}_2^4\text{He}) = 4,00150 \text{ u} \text{ et } m({}_0^1\text{n}) = 1,00867 \text{ u};$$

on aura : $Dm = 1,8880 \cdot 10^{-2} \text{ u}$, soit une libération d'énergie de 17,6 MeV, alors qu'une fission libère environ 200 MeV. Cependant, ramenée au nombre de nucléons (5 pour cette fusion et 236 pour la fission), cette énergie libérée par fusion est environ cinq fois plus importante que celle d'une fission.

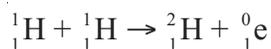
Contrairement aux cas des réactions de fission, on ne sait actuellement contrôler la fusion nucléaire que sur une durée de l'ordre de la microseconde seulement, bien que de nombreuses recherches soient en cours. Il n'y a donc pas, à présent, de possibilités d'utilisation constructive de l'énergie libérée par la fusion.

3 APPLICATIONS DES RÉACTIONS DE FISSION ET DE FUSION

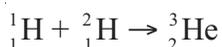
3.1- ENERGIE DU SOLEIL

L'énergie solaire est une énergie libérée par des réactions de fusion qui se produisent dans le soleil selon les principales étapes suivantes :

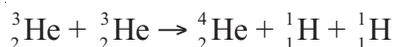
Première étape : synthèse du deutérium à partir de l'hydrogène



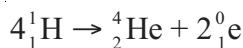
Deuxième étape : synthèse de l'hélium 3



Troisième étape : synthèse de l'hélium 4



La réaction bilan est la suivante :



Ces réactions ont lieu à 20 millions de degrés environ et sont très exoénergétiques, ce qui fait une libération de 24,7 MeV par noyau d'hélium formé.

De cette énergie solaire, la Terre reçoit, en moyenne 1 kW par m^2 au niveau du sol.

Comme utilisations directes de cette énergie solaire, on cite l'échauffement de l'eau par recours à l'effet de serre, la production d'énergie électrique par des turboalternateurs et par les photopiles.

3.2- ENERGIE NUCLÉAIRE

L'énergie libérée par les réactions nucléaires provoquées est utilisée, soit pour des fins utiles (réacteurs nucléaires), soit pour des fins destructives (bombe A et bombe H).

• Les réacteurs nucléaires

Un réacteur nucléaire est un appareil servant à réaliser des réactions de fission contrôlées. Les combustibles les plus utilisés sont l'uranium 235 et le plutonium 239. Certains réacteurs sont conçus pour produire de l'énergie électrique destinée à propulser un véhicule (navire, sous-marin,...) où à alimenter un réseau d'électricité (Fig.11). D'autres servent à produire des noyaux radioactifs pour usages scientifique, industriel ou médical.

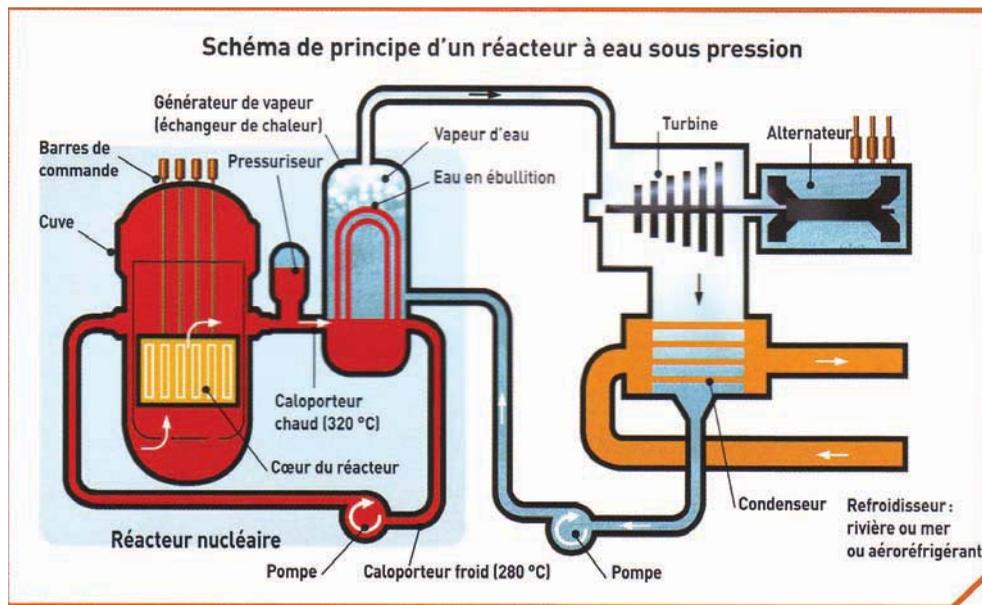


Fig.11 : Schéma d'un exemple de réacteur nucléaire

• La bombe atomique

Dans une bombe atomique (ou bombe A), on réalise une réaction de fission non contrôlée qui dégage une énergie énorme en un laps de temps très court, ce qui explique l'effet dévastateur de l'explosion qu'elle génère. La première bombe atomique réalisée avec l'uranium 235 fut lancée, le 6 août 1945 sur Hiroshima, puis celle réalisée avec du plutonium 239 fut lancée le 9 août 1945 sur Nagasaki au Japon (Fig.12).

• La bombe à hydrogène

Dans une bombe à hydrogène (ou bombe H), on réalise une réaction de fusion non contrôlée. Celle-ci est amorcée par une bombe atomique pour atteindre la température nécessaire à la fusion.



Fig.12 : Explosion d'une bombe au plutonium 239 à Nagasaki au Japon (9 août 1945)

L'essentiel

- Une réaction nucléaire est une transformation au cours de laquelle un ou plusieurs noyau(x) se désintègre(nt) en donnant un ou plusieurs noyau(x) nouveau(x) et éventuellement une ou plusieurs particules.
- Une réaction nucléaire peut être spontanée ou provoquée. Dans les deux cas, elle peut être symbolisée par une équation qui obéit aux lois de conservation du nombre de masse et du nombre de charge.
- La radioactivité est la transformation spontanée d'un noyau en un autre plus stable avec émission d'un rayonnement.
- On distingue trois types de radioactivités :
 - la radioactivité α (émission d'une particule α : noyau d'atome d'hélium ${}^4_2\text{He}$),
 - la radioactivité β^- (émission d'un électron ${}^0_{-1}e$),
 - la radioactivité β^+ (émission d'un positon 0_1e)
- L'émission γ est un phénomène corrélatif qui se produit chaque fois qu'un noyau fils est obtenu à l'état excité.
- La loi de décroissance radioactive est : $N = N_0 e^{-\lambda t}$, avec N_0 , le nombre de noyaux présents dans l'échantillon à l'instant $t = 0$ et λ la constante radioactive.
- La demi vie (ou période radioactive) T d'une substance radioactive est la durée au bout de laquelle le nombre de noyaux initialement présents diminue de moitié.

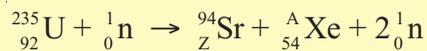
$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}$$
- L'activité A d'une substance radioactive est donnée par le nombre moyen de désintégrations par unité de temps, $A = A_0 e^{-\lambda t}$ où A_0 désigne l'activité à l'instant $t = 0$.
- A cause du défaut de masse qui en résulte, une réaction nucléaire libère de l'énergie.
- Un noyau lourd subit une réaction de fission lorsque, sous l'action d'un neutron lent, il se scinde en deux noyaux de masses comparables.
- La fusion est une réaction nucléaire au cours de laquelle des noyaux très légers fusionnent en un noyau moins léger.
- Les énergies libérées par les réactions nucléaires sont énormes ; toutefois, l'énergie libérée par la fusion est plus grande que celle libérée par la fission.

Exercices

Exercice résolu

ÉNONCÉ

I – 1°) Dans un réacteur nucléaire, un noyau d'uranium 235 capte un neutron lent et subit une fission symbolisée par l'équation suivante :



Déterminer les nombres A et Z en précisant les lois utilisées.

2°) Dans le même réacteur, l'isotope ${}_{92}^{238}\text{U}$ de l'uranium peut capter un neutron rapide et se transformer en isotope 239 de l'uranium. Le noyau obtenu est radioactif. Par deux désintégrations successives spontanées de type β^- , il se transforme en plutonium.

Ecrire l'équation de chacune des désintégrations β^- et préciser les nombres de masse et de charge du noyau de plutonium formé.

3°) a) L'isotope ${}_{92}^{234}\text{U}$ de l'uranium est radioactif α . Ecrire l'équation de sa désintégration radioactive et identifier le noyau X formé en se référant au tableau suivant :

Élément	Hélium	Neptunium	Uranium	Protactinium	Thorium
Symbole du noyau	${}_2^4\text{He}$	${}_{93}^{236}\text{Np}$	${}_{92}^{234}\text{U}$	${}_{91}^{231}\text{Pa}$	${}_{90}^{230}\text{Th}$
Masse du noyau (en u)	4,0015	235,9956	233,9904	230,9860	229,9737

b) Calculer en MeV et en joule l'énergie libérée par la désintégration d'un noyau d'uranium 234, puis celle libérée par un échantillon d'un gramme de cette substance radioactive.

c) En admettant que l'énergie libérée par la désintégration est répartie entre le noyau X et la particule α sous forme d'énergie cinétique et que le rapport des énergies cinétiques du noyau X et de la particule α est égal à l'inverse du rapport de leurs masses :

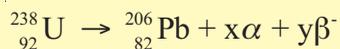
- déduire l'énergie cinétique de la particule α ainsi que celle du noyau X.
- calculer la vitesse de la particule α .

d) Certaines particules α émises ont en réalité une énergie cinétique égale à 13 MeV. L'écart entre cette valeur et la valeur calculée est expliqué par l'émission de radiations γ .

En déduire l'énergie de chacun des photons γ émis en même temps que ces particules α et calculer la longueur d'onde λ de l'onde associée.

II – L'uranium 238 est à l'origine d'une famille radioactive qui conduit à l'isotope stable du plomb ${}_{82}^{206}\text{Pb}$. Les désintégrations successives s'accompagnent d'une émission de particules α .

ou de particules β^- . Les noyaux intermédiaires étant d'une durée de vie suffisamment courte, on peut négliger leur présence dans les produits de la transformation. On assimile donc l'ensemble à une réaction unique :



1°) Déterminer les coefficients x et y .

2°) On suppose qu'à l'instant $t = 0$ de formation de minerai contenant de l'uranium 238, celui-ci ne contient aucun noyau de plomb 206.

On désignera par :

N_0 le nombre initial de noyaux d'uranium 238.

N le nombre moyen de noyaux d'uranium 238 qui subsistent à l'instant t .

N' le nombre moyen de noyaux de plomb présents à l'instant t .

a) Exprimer le nombre moyen N' de noyaux de plomb présents à l'instant t dans le minerai considéré en fonction de t , λ et N .

b) Exprimer l'âge du minerai en fonction de la période T de l'uranium ${}_{92}^{238}\text{U}$ et du rapport $\frac{N'}{N}$.

On pourra supposer $t \ll T$ et pour ε petit, on prendra $e^\varepsilon \approx 1 + \varepsilon$.

c) Application numérique : sachant qu'à l'instant t , l'échantillon du minerai contient 1g d'uranium 238 et 10 mg de plomb, calculer l'âge du minerai.

On donne : $T({}_{92}^{238}\text{U}) = 4,5 \cdot 10^9$ ans,

$$M(\text{U}) = 238 \text{ g.mol}^{-1},$$

$$M(\text{Pb}) = 206 \text{ g.mol}^{-1},$$

$$\ln 2 = 0,693,$$

$$1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV.c}^{-2},$$

$$1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J},$$

$$\text{nombre d'Avogadro } N_A = 6,02 \cdot 10^{23},$$

$$\text{constante de Planck } h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s},$$

$$\text{célérité de la lumière } c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}.$$

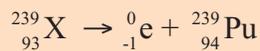
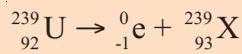
SOLUTION

1- 1°) D'après la loi de conservation du nombre de masse, on peut écrire :

$$235 + 1 = 94 + A + 2, \text{ ce qui donne : } \underline{A = 140}$$

D'après la loi de conservation du nombre de charge, on peut écrire : $92 = Z + 54$, ce qui donne : $\underline{Z = 38}$

2°) En respectant les lois de conservation précédentes, les équations des désintégrations β^- s'écrivent :



Remarque : On peut identifier, à l'aide du tableau périodique, la particule X intermédiaire à un noyau de neptunium Np.



La loi de conservation du nombre de masse donne : $A = 234 - 4 = 230$

Celle de conservation du nombre de charge donne : $Z = 92 - 2 = 90$.

Le noyau formé est donc l'isotope 230 du thorium : ${}_{90}^{230}\text{Th}$

b) Soit Δm , le défaut de masse qui accompagne la réaction nucléaire :

$$\Delta m = 233,9904 - [4,0015 + 229,9737] = 1,52 \cdot 10^{-2} \text{ u},$$

comme $1\text{u} = 931,5 \text{ MeV} \cdot \text{c}^{-2}$, on aura : $\Delta m \approx 14,16 \text{ MeV} \cdot \text{c}^{-2}$, d'où une libération d'énergie

$$\underline{W_1 = 14,16 \text{ MeV}}, \text{ soit } \underline{2,26 \cdot 10^{-12} \text{ J}}.$$

Soit W , l'énergie libérée par un échantillon de masse $m = 1 \text{ g}$ d'uranium 234.

$W = nW_1$ avec n , nombre de noyaux contenus dans $m = 1 \text{ g}$ d'uranium 234 et W_1 , l'énergie libérée par la désintégration d'un noyau d'uranium 234.

$$W = \frac{m \mathcal{N}}{M} W_1 \quad \text{où } \mathcal{N} \text{ désigne le nombre d'Avogadro et } M \text{ la masse molaire atomique de l'uranium 234.}$$

$$\text{A.N : } \underline{W = 3,64 \cdot 10^{22} \text{ MeV}} ; \underline{\text{soit } 5,8 \cdot 10^9 \text{ J}}.$$

c) L'énergie libérée par la réaction nucléaire se répartit, sous forme d'énergie cinétique, entre la particule α et le noyau de thorium ; on peut écrire :

$$W = E_c(\alpha) + E_c(\text{Th}) \quad (1)$$

$$\text{On a aussi : } \frac{E_c(\alpha)}{E_c(\text{Th})} = \frac{m_{\text{Th}}}{m_\alpha}$$

En exprimant $E_c(\alpha)$ en fonction de $E_c(\text{Th})$ on aura : $E_c(\alpha) = \frac{m_{\text{Th}} E_c(\text{Th})}{m_a}$ (2)

En combinant (1) et (2), il vient : $E_c(\text{Th}) \left[1 + \frac{m_{\text{Th}}}{m_\alpha} \right] = W$. D'où :

$$E_c(\text{Th}) = \frac{m_\alpha}{m_\alpha + m_{\text{Th}}} W \text{ et } E_c(\alpha) = \frac{m_{\text{Th}}}{m_\alpha + m_{\text{Th}}} W$$

Soit numériquement : $E_c(\text{Th}) = 0.242 \text{ MeV}$; $E_c(\alpha) = 13.918 \text{ MeV}$

La particule α emporte la majeure partie de l'énergie libérée, soit $\frac{E_c(\alpha)}{W} \cdot 100 = 98,2\%$

Vitesse de la particule α : $E_c(\alpha) = \frac{1}{2} m v_\alpha^2$ d'où : $\| \vec{v}_\alpha \| = \sqrt{\frac{2E_c(\alpha)}{m_\alpha}}$, soit numériquement :

$$\| \vec{v}_\alpha \| = 2,59 \cdot 10^7 \text{ m.s}^{-1}$$

d – L'énergie du photon γ est : $E_\gamma = 13,918 - 13,000 = 0,918 \text{ MeV}$.

On sait que $E_\gamma = \frac{hc}{\lambda}$, d'où : $\lambda = \frac{hc}{E_\lambda}$. A.N : $\lambda = 1,35 \cdot 10^{-12} \text{ m}$.

II – 1°) L'écriture des lois de conservation du nombre total de nucléons et du nombre total de charges permet de déterminer x et y . On a les deux équations suivantes :

$$238 = 206 + 4x \text{ et } 92 = 82 + 2x - y$$

D'où : $x = 8$ et $y = 6$.

2°) a) Le nombre moyen de noyaux N' de plomb présents à l'instant t est égal au nombre moyen de noyaux d'uranium 238 désintégrés entre l'instant $t = 0$ et l'instant t , soit :

$$N' = N(e^{\lambda t} - 1)$$

b) Le résultat précédent permet d'écrire : $\frac{N'}{N} = e^{\lambda t} - 1 = e^{\frac{\ln 2}{T} t} - 1$. Or $t \ll T$ fait que le terme

$$\frac{\ln 2}{T} t = \varepsilon \text{ est très petit ; on peut donc utiliser l'approximation : } e^{\frac{\ln 2}{T} t} \approx 1 + \frac{\ln 2}{T} t$$

On a donc $\frac{N'}{N} = \frac{\ln 2}{T} t$, ce qui donne l'âge du minerai : $t = \frac{N'}{N} \frac{T}{\ln 2}$

c) Le nombre moyen de noyaux d'uranium 238 présents dans un échantillon de masse $m_U = 1 \text{ g}$ est : $N_U = N = \frac{m_U \mathcal{N}}{M_U}$; celui de noyaux de plomb 206 présents dans un échantillon de $m_{\text{Pb}} = 10 \text{ mg}$ est : $N_{\text{Pb}} = N' = \frac{m_{\text{Pb}} \mathcal{N}}{M_{\text{Pb}}}$; \mathcal{N} désigne le nombre d'Avogadro.

$$t = \frac{N'}{N} \frac{T}{\ln 2} = \frac{m_{\text{Pb}}}{m_U} \frac{M_U}{M_{\text{Pb}}} \frac{T}{\ln 2}; \text{ soit numériquement : } t = 75 \cdot 10^6 \text{ ans.}$$

Exercices à résoudre

Tests rapides des acquis

1 Items "vrai ou faux"

Evaluer les propositions suivantes par vrai ou faux.

- 1- La radioactivité est une transformation nucléaire spontanée.
- 2- La radioactivité est toujours une transformation lente.
- 3- Le nombre de noyaux désintégrés d'une substance radioactive ne dépend que du temps.
- 4- L'activité d'une substance radioactive est proportionnelle au temps.
- 5- La demi vie d'un élément radioactif est aussi la durée au bout de laquelle la masse d'un échantillon de cet élément diminue de moitié.
- 6- Au cours de toute réaction nucléaire, les lois de conservation de la charge totale et du nombre total de nucléons sont toujours respectées.
- 7- Les réactions de fission et de fusion sont des réactions nucléaires spontanées.
- 8- Dans une bombe à hydrogène, la réaction de fusion qui se produit est amorcée par une réaction de fission.
- 9- L'énergie du soleil est due à une réaction de fusion transformant l'isotope ^1_1H de l'hydrogène en hélium ^4_2He .
- 10- Le rayonnement γ est beaucoup plus pénétrant que les rayonnements α et β . Il provoque de nombreuses ionisations dans l'organisme et est de ce fait très dangereux.

2 Questions à Choix Multiples

Préciser pour chacune des questions suivantes, la (ou les) proposition(s) juste(s).

I – Une réaction nucléaire :

- a- est accélérée par l'utilisation d'un catalyseur,
- b- est ralentie par une augmentation de pression,
- c- ne dépend pas des facteurs habituels des transformations chimiques tels que la pression, la température et le catalyseur.

II – La radioactivité d'une substance radioactive :

- a- est un phénomène nucléaire,
- b- dépend de la combinaison chimique dans laquelle est engagé le noyau radioactif,
- c- est la même pour tous les isotopes d'un même élément.

III – Une réaction nucléaire est :

- a- toujours spontanée,
- b- toujours provoquée,
- c- selon le cas, spontanée ou provoquée.

IV – La loi de décroissance radioactive s'exprime par la relation :

- a- $N = N_0 e^{-\lambda t}$,
- b- $N = N_0 e^{\lambda t}$,
- c- $N = N_0 (1 - e^{-\lambda t})$.

V – La période radioactive ou demi vie d'un élément radioactif est la durée nécessaire pour que le nombre des noyaux initialement présents dans l'échantillon:

- a- diminue de moitié,
- b- diminue du quart,

c- augmente de la moitié.

VI – Au cours d'une réaction nucléaire, il y a :

a- seulement conservation du nombre total de nucléons,

b- seulement conservation de la charge électrique totale,

c- à la fois conservation du nombre total de nucléons et conservation de la charge électrique totale.

VII– Deux échantillons contiennent le même nombre de noyaux. Ceux du premier échantillon ont une demi vie plus courte que ceux du deuxième. L'activité initiale du premier échantillon est :

a- supérieure à celle du deuxième,

b- inférieure à celle du deuxième,

c- égale à celle du deuxième.

VIII– Du fait que le rayonnement γ est plus pénétrant que β et α :

a- il est utilisé en médecine sans aucune pré-

caution car il ne présente aucun danger,

b- il est très dangereux mais tout de même il est utilisé en médecine avec beaucoup de précautions (gammathérapie) pour traiter certains cancers,

c- il est très dangereux pour les cellules vivantes et il n'est jamais utilisé en médecine.

IX – Une réaction de fission :

a- Consiste en la capture d'un neutron par un noyau lourd qui se scinde alors en noyaux plus légers,

b- donne toujours un noyau de masse plus importante,

c- libère une faible quantité d'énergie.

X – Une réaction de fusion de deux noyaux légers:

a- donne toujours un noyau plus stable que les noyaux initiaux,

b- donne toujours un noyau de masse plus faible et libère de l'énergie.

c- donne toujours un noyau unique.



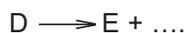
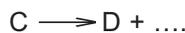
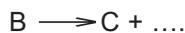
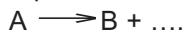
Exercices d'application

3

Compléter le tableau suivant :

	A	B	C	D	E
Noyau	${}^{214}_{84}\text{Po}$	${}^{210}_{82}\text{Pb}$	${}^{\dots}_{83}\text{Bi}$	${}^{\dots}_{84}\text{Po}$	${}^{\dots}_{82}\text{Pb}$
Nombre de masse			210	210	
Nombre de charge		82	83		
Nombre de neutrons	130			126	124

Compléter les réactions nucléaires suivantes et identifier la particule formée:



4

L'uranium 238 donne plusieurs désintégrations successives : x désintégrations de type α et y désintégrations de type β^- et se transforme en ${}^{226}_{88}\text{Ra}$. Le radium 226, lui même radioactif,

conduit par plusieurs désintégrations

successives à un isotope stable ${}^{206}_{82}\text{Pb}$, après avoir subi x' désintégrations de type α et y' désintégrations de type β^- . Déterminer x , y , x' et y' .

5

Etant radioactif, le polonium ${}^{218}_{84}\text{Po}$ se désintègre en un noyau de plomb ${}^A_Z\text{Pb}$ avec émission d'une particule α .

1°) Ecrire l'équation de la réaction de désintégration en précisant les lois de conservation qui la régissent.

2°) Le noyau ${}^A_Z\text{Pb}$ est radioactif de période T . Un échantillon de ${}^A_Z\text{Pb}$ a une masse $m_0 = 40$ mg à un instant de date $t = 0,54$ minutes plus tard, il n'en reste que $m = 10$ mg. Déterminer la valeur de la période T ainsi que celle de la constante radioactive λ de ${}^A_Z\text{Pb}$.

D'après Bacc. Juin 2004. Session principale. Section sport

6 L'isotope $^{226}_{88}\text{Ra}$ du radium est radioactif ; il émet un rayonnement α et se transforme en un isotope du radon ^A_ZRn .

1°) Ecrire l'équation de cette désintégration en précisant les valeurs de Z et A.

2°) Les masses des noyaux intervenant dans la désintégration précédente sont respectivement :

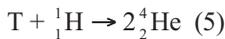
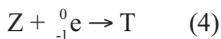
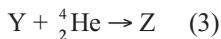
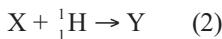
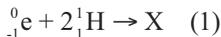
$$M(\alpha) = 4,0015 \text{ u} ; M(^A_Z\text{Rn}) = 221,9703 \text{ u} ;$$

$$M(^{226}_{88}\text{Ra}) = 225,9771 \text{ u}.$$

Calculer l'énergie totale libérée par la désintégration d'un noyau de radium $^{226}_{88}\text{Ra}$.

On donne : $1\text{u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

7 Selon Bethe et Critchfield (1938), l'une des hypothèses possibles pour expliquer l'énergie fournie par le soleil est d'envisager la succession suivante des réactions nucléaires :



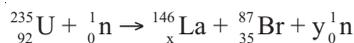
X, Y, Z et T représentent les noyaux.

1°) Equilibrer les cinq équations nucléaires précédentes et identifier les noyaux X, Y, Z et T en se référant au tableau suivant :

H							He
Li	Be	B	C	N	O	F	Ne

2°) Faire le bilan des cinq équations précédentes. Quel est le type de la réaction obtenue ?

8 1°) Sous l'impact d'un neutron lent ^1_0n , un noyau d'uranium $^{235}_{92}\text{U}$ peut subir avec libération d'énergie la fission suivante :

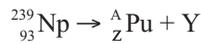
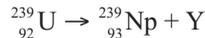
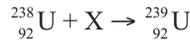


a) Déterminer x et y en précisant les lois utilisées.

b) Expliquer l'origine de l'énergie libérée au cours de cette réaction nucléaire.

2°) Le bombardement d'un noyau $^{238}_{92}\text{U}$ par une

particule X déclenche une série de réactions nucléaires dont les trois premières sont :

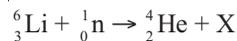


a) Identifier les particules X et Y.

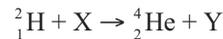
b) Déterminer A et Z du noyau de plutonium.

9 Pour réaliser une réaction de fusion, on procède comme suit :

Première étape : bombardement du lithium par des neutrons



Deuxième étape : réaction de fusion



1°) Identifier X et Y.

2°) Ecrire l'équation bilan correspondant à ces deux étapes.

10 1°) Le noyau d'uranium $^{238}_{92}\text{U}$ peut capturer un neutron sans émission d'aucun rayonnement.

a) Ecrire l'équation de cette réaction nucléaire.

b) Le noyau obtenu est radioactif, sa désintégration conduit à l'isotope du plutonium $^{239}_{94}\text{Pu}$.

Ecrire l'équation en précisant le nombre et la nature des particules émises au cours de cette réaction nucléaire.

2°) On bombarde un noyau d'uranium 235 par un neutron, il se produit la réaction nucléaire suivante :



a) Déterminer A et Z.

b) Quel est le type de cette réaction nucléaire ?

11 Le brome $^{77}_{35}\text{Br}$ est un émetteur β^+ , il donne comme noyau fils un isotope de l'élément sélénium Se, avec émission éventuelle d'un rayonnement γ . Sa période radioactive est de 57 h. Il est utilisé en imagerie médicale.

1°) Ecrire l'équation traduisant la désintégration d'un noyau de brome 77.

2°) Calculer la constante radioactive λ .

3°) Un échantillon a une activité initiale de $5,7 \cdot 10^{15} \text{ Bq}$. Calculer le nombre moyen N_0 de noyaux au moment de la mesure.

Exercices de synthèse

12 A - 1°) Le polonium 210 ($^{210}_{84}\text{Po}$) est radioactif α . Ecrire l'équation de la réaction de sa désintégration sachant que le noyau fils est un isotope du plomb.

2°) En admettant que toute l'énergie libérée par la réaction est communiquée aux particules formées sous forme d'énergie cinétique et que le rapport des énergies cinétiques du noyau de plomb et de la particule α est égal à l'inverse du rapport de leur masse, calculer l'énergie $E_c(\alpha)$ de la particule α émise et celle $E_c(\text{Pb})$ du noyau fils, immédiatement après la désintégration. On exprimera ces énergies en MeV. Calculer la vitesse de la particule α et celle du noyau fils.

On donne : $M(\alpha) = 4,0015 \text{ u}$;

$M(^{210}_{84}\text{Po}) = 209,9368 \text{ u}$; $M(^{206}_{82}\text{Pb}) = 205,9295 \text{ u}$

$1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV}\cdot\text{c}^{-2}$; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

B – L'isotope 137 du césium $^{137}_{55}\text{Cs}$ est radioactif β^- . Le noyau ^A_ZBa obtenu à la suite de cette désintégration peut être soit dans l'état fondamental, soit dans un état excité à la suite duquel il reviendra à son état fondamental.

I - On ne considèrera que le cas où le noyau obtenu est dans son état fondamental.

1°) Déterminer A et Z et écrire l'équation de la réaction nucléaire qui a lieu.

2°) En utilisant les données consignées dans le tableau suivant, calculer en MeV et en joules l'énergie libérée au cours de cette désintégration.

Particule ou noyau	$^0_{-1}\text{e}$	$^{137}_{55}\text{Cs}$	^A_ZBa
Masse en u	$5,5 \cdot 10^{-4}$	136,8768	136,8743

On rappelle que $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

Dire, sans calcul, sous quelles formes se retrouve cette énergie ?

II – On considère maintenant toutes les désintégrations possibles du césium 137. On rappelle que le nombre N des noyaux restants à l'instant t s'exprime en fonction du nombre N_0 des noyaux présents à l'instant $t = 0$ par la relation $N = N_0 e^{-\lambda t}$, où λ est une constante égale dans ce cas à $8,4 \cdot 10^{-10} \text{ s}^{-1}$. Calculer en secondes et en années la période T.

13 L'élément carbone est composé principalement de deux isotopes stables, le

$^{12}_6\text{C}$ (98,9%) et le $^{13}_6\text{C}$ (1,1%). D'autre part, le carbone contient encore une très petite partie de l'isotope radioactif $^{14}_6\text{C}$ de période $T = 5730$ années, qui est formé continuellement sous forme de dioxyde de carbone dans l'atmosphère terrestre, par effet des radiations cosmiques et qui se mélange par l'intermédiaire du cycle CO_2 de la nature, aux isotopes $^{12}_6\text{C}$ et $^{13}_6\text{C}$.

1°) Donner la relation entre la constante radioactive λ et la période T.

2°) Pour le taux de désintégration du carbone participant au cycle CO_2 de la nature, on trouve la valeur de 13,6 désintégrations par minute et par gramme de carbone. Quand une matière végétale, par exemple un arbre, meurt elle ne participe plus au cycle CO_2 de la nature. Par conséquent, le taux de décomposition de carbone diminue.

Pour un morceau de bois ayant fait partie d'un navire Viking, on mesure en 1983, 12 désintégrations par minute et par gramme de carbone. En quelle année l'arbre ayant fourni ce bois a-t-il été abattu ?

3°) Quelle est la valeur du rapport isotopique $\frac{^{12}_6\text{C}}{^{14}_6\text{C}}$ du carbone participant au cycle CO_2 de la nature ?

On donne : Une année = 365 jours. Nombre d'Avogadro $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

14 Le radium $^{226}_{88}\text{Ra}$ se désintègre en émettant une particule α et en produisant un noyau ^A_ZX dans son état fondamental.

1°) Sachant que ^A_ZX est un isotope du radon, écrire l'équation bilan de la désintégration en explicitant les règles utilisées.

2°) Le noyau ^A_ZX est également radioactif. On désire déterminer la période radioactive de ce noyau. A l'instant $t = 0$, on dispose d'un

échantillon contenant N_0 noyaux ; à l'instant t , ce nombre devient N . On obtient le tableau de mesures suivant :

t (heures)	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
$\ln N$	6,90	6,75	6,60	6,45	6,30	6,15	6,00	5,85	5,70	5,55	5,40

- a) Tracer la courbe : $\ln N = f(t)$.
 b) Déduire de la courbe obtenue l'expression de la loi de décroissance radioactive.
 c) Déterminer la période radioactive T en jours du noyau ${}^A_Z X$.
 3°) Sachant que le rapport de l'énergie cinétique du noyau formé et de l'énergie cinétique de la particule α émise est égal à l'inverse du rapport de leurs masses, déterminer la valeur de ce rapport. Quelle remarque vous suggère-t-il ?
 4°) En supposant que l'énergie libérée par la désintégration se trouve en totalité sous forme d'énergie cinétique, calculer la vitesse de la particule α sachant que l'énergie libérée vaut 4,5 MeV.
 5°) En réalité, le phénomène de désintégration est accompagné de l'émission d'une radiation électromagnétique de longueur d'onde $\lambda = 2,5 \cdot 10^{-11}$ m.

- a) Interpréter ce phénomène.
 b) Calculer la valeur de l'énergie cinétique de la particule α compte tenu de l'émission du photon.

On donne :

- Masse du noyau d'hélium = 4,0015 u.
- Masse du noyau de radon = 221,9771 u.
- $1 \text{ u} = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$;
 $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$; $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

D'après Bacc. Juin 1997

15

L'image scintigraphique utilise des traceurs et des marqueurs. Un traceur est une substance qui peut se localiser de façon sélective au niveau d'une structure particulière de l'organisme. Un marqueur est un noyau qui se prête aisément à une détection externe. Il émet des rayonnements γ qui sont détectés à l'extérieur de l'organisme à l'aide d'une caméra à scintillation (gammacamera).

L'association d'un traceur et d'un marqueur per-

met, grâce au marqueur, de suivre l'évolution du traceur dans l'organisme.

Pour réaliser des scintigraphies thyroïdiennes, l'iode radioactif est le traceur physiologique de référence, il sert à la fois de traceur et de marqueur. On utilise pour cela soit l'iode 131 (${}^{131}_{53} \text{I}$) soit l'iode 123 (${}^{123}_{53} \text{I}$). Il est possible, après administration de faibles doses d'iode 131, par exemple, d'obtenir une scintigraphie de la thyroïde reflétant la distribution de la radioactivité au sein de l'organe.

I – 1°) L'iode 123 est produit par réaction nucléaire entre des deutons ${}^2_1 \text{H}$ de haute énergie et du tellure ${}^{122}_{52} \text{Te}$. Écrire l'équation de cette réaction nucléaire.

2°) L'iode 131 de demi vie $T = 8$ jours est émetteur β^- et γ . Écrire l'équation de sa désintégration sachant qu'il se forme un noyau de xénon. Calculer en MeV l'énergie libérée par cette réaction nucléaire.

On donne : $m({}^{131}_{53} \text{I}) = 130,87705 \text{ u}$;
 $m({}^A_Z \text{Xe}) = 130,87545 \text{ u}$; $m({}^0_{-1} \text{e}) = 5,486 \cdot 10^{-4} \text{ u}$.
 $1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV.c}^{-2}$.

3°) Pour une scintigraphie thyroïdienne, un patient adulte doit ingérer par voie orale une quantité d'iode 131 d'activité A_0 . Le délai entre l'administration du traceur et la réalisation des images est de 24 h. Quelle est en fonction de A_0 , l'activité A de l'iode 131 dans le corps au moment où les images sont réalisées ?

II – 1°) L'iode 123 est émetteur γ pur de demi vie $T' = 13,2$ h.

Pour une scintigraphie thyroïdienne, il faut injecter à un patient adulte une quantité d'iode 123 d'activité égale à $6,4 \cdot 10^6 \text{ Bq}$. Tracer la courbe représentant A en fonction du temps. On représentera simplement les activités correspondant à T , $2T$, $3T$, $4T$...

2°) La réalisation des images se fait entre 2 et 4 h après administration de l'iode. Déterminer graphiquement l'activité de l'iode 123 au bout de 4 h. Que vaudrait-elle si on réalisait, comme dans le cas de l'iode 131, une image 24 h après l'injection ?

16

Le cobalt ${}_{27}^{60}\text{Co}$ est radioactif β^- , avec une demi vie $T = 5,27$ ans.

Le noyau fils est émis dans un état excité. Il revient à l'état fondamental en émettant un rayonnement γ . En médecine, ce rayonnement est utilisé pour traiter certains cancers en irradiant de l'extérieur, les tumeurs afin de les détruire. On utilise ainsi des bombes à cobalt.

Le noyau fils du cobalt 60 se désexcite par deux rayonnements de longueurs d'onde $1,6 \cdot 10^{-12}$ m et $1,8 \cdot 10^{-12}$ m.

1°) Ecrire l'équation de la désintégration du cobalt 60 et celles de la désexcitation de son noyau fils.

2°) Au bout de quelle durée la bombe à cobalt aura-t-elle perdu 90% de son activité ?

3°) Chaque électron émis possède une énergie cinétique de $4,5 \cdot 10^{-14}$ J qu'il transmet intégralement au tissu humain qui l'absorbe.

Quelle est l'énergie transmise par unité de temps au tissu humain par une bombe d'activité $1,7 \cdot 10^{18}$ Bq ? On suppose que seuls 10% des électrons émis sont dirigés vers la cible.

4°) Quelle est l'énergie transmise aux tissus humains pendant une exposition de 0,8 seconde ?

5°) Si l'on considère qu'une exposition de 10 secondes à proximité immédiate d'une source dont l'activité est voisine de 10^{14} Bq est dangereuse, que peut-on dire de celle nécessaire à l'utilisation de la bombe à cobalt ?



17 Etude de texte

Le 26 février 1896, Henri Becquerel tente d'exciter la fluorescence de certains composés chimiques en les exposant au soleil dans l'espoir qu'ils impressionnent ensuite des plaques photographiques. Le sulfure de calcium semble donner des résultats, mais ceux-ci ne sont pas reproductibles. En revanche, le sulfate

double d'uranium paraît, après avoir été exposé au soleil, voiler les émulsions photographiques...

Le soleil a du mal à percer en cette journée d'hiver. Dépité, il enferme dans un tiroir les sels d'uranium qu'il voulait exposer et les plaques photographiques. Il ne les développe que quatre jours plus tard. Surprise, elles sont impressionnées. Un nouveau phénomène vient d'être découvert : il y a émission d'un rayonnement invisible dont les effets sont similaires à ceux des rayons X...

En 1898, Pierre Curie propose le mot radioactivité pour désigner ce phénomène qui ébranla le monde scientifique.

Henri Becquerel (1852–1908) est considéré comme le père de la radioactivité. Son fils Jean écrit à propos des travaux de son père :

«Les caractères fondamentaux de ce phénomène sont :

1°) L'émission est spontanée et d'une constance remarquable : de larges variations de température ne la modifient pas.

2°) Le dégagement d'énergie (émission de rayonnement) appartient en propre à l'atome, c'est-à-dire qu'il ne dépend aucunement de l'état de combinaison de l'uranium, alors que les autres propriétés physiques ou chimiques changent d'un composé à l'autre. »

Questions

1°) Quelle est la part du hasard et celle de la perspicacité scientifique dans le déroulement de cette découverte ?

2°) Quelle est la nature du rayonnement invisible qui impressionne les plaques photographiques dans les expériences de Becquerel ?

3°) Comment Becquerel appelle-t-il les rayons émis par le sulfate double d'uranium ?

4) Expliquer pourquoi le phénomène découvert par Becquerel est une propriété de l'élément uranium.

En savoir plus

Usages médicaux de la radioactivité

Malgré les dangers que présentent les rayonnements radioactifs, il y a entre eux ceux qui sont utilisés en médecine.

En imagerie médicale (radiographie, scintigraphie...), on utilise certaines substances comme sources de rayonnement. Pour un examen scintigraphique (Fig.1a) de la thyroïde par exemple (Fig.1b), on administre au patient une faible dose d'iode 123 . Cet isotope particulier est choisi pour sa faible période radioactive et son aptitude à migrer vers les différentes parties du corps.

L'enregistrement du rayonnement émis par la source permet de donner une image de la partie du corps dont l'exploitation permet de diagnostiquer son état.

La faible dose ingérée est bien supportée par l'organisme tant que l'opération n'est pas renouvelée trop souvent.

Cependant, pour les personnes souvent exposées aux rayonnements radioactifs, la radioprotection est indispensable par l'usage d'écrans (contre l'irradiation), voire même par l'usage de combinaisons qui protègent à la fois contre l'irradiation et la contamination. Il faut également diminuer la durée d'exposition et s'éloigner autant que possible de la source radioactive.



Fig.1a : Appareil permettant de faire une scintigraphie

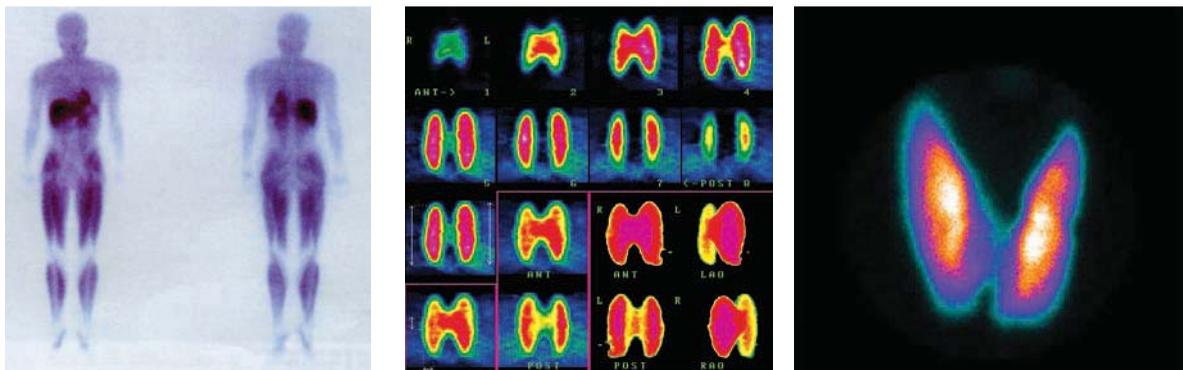


Fig.1b : Exemples de scintigraphies (corps humain et thyroïde)

Rayonnements et santé

Les particules émises par une source radioactive transportent de l'énergie. Quand elles traversent un milieu matériel, elles perdent peu à peu cette énergie en provoquant une ionisation sur leur passage et finissent par s'arrêter : elles sont alors absorbées par le milieu.

Les effets des rayonnements sur les cellules vivantes

Les particules α , ayant un pouvoir ionisant très important, ont un pouvoir de pénétration très faible, de l'ordre de quelques micromètres. De ce fait, les rayons α ne sont pas dangereux

pour la santé. Toutefois, il faut exclure une absorption interne qui peut provoquer une inhalation, une ingestion...

- Les particules β , ayant un pouvoir ionisant moins important que celui des particules α , ont un pouvoir de pénétration de quelques millimètres et, de ce fait, le rayonnement β est dangereux pour la peau.

- Les rayons γ ne sont pas directement ionisants. L'interaction entre ces rayons et les atomes du milieu qu'ils traversent peut donner naissance à des électrons qui, eux, sont ionisants. L'ionisation peut donc avoir lieu après une profonde pénétration.

Les effets ionisants du rayonnement sont dangereux pour les êtres vivants étant donné que l'ionisation agit sur les tissus. Les ions qui en résultent sont nocifs pour les ADN et les enzymes.

L'ionisation peut provoquer, par exemple, la rupture des liaisons hydrogène, la séparation des sucres et des phosphates, rendant ainsi la duplication et la transcription de l'information génétique de l'ADN à l'ARN des cellules impossibles. L'effet principal des rayonnements est donc la perte de la capacité de reproduction ; les structures moléculaires nécessaires à la vie sont endommagées.

Une cellule endommagée peut, dans certains cas, redevenir normale d'elle-même par des processus biochimiques.

Généralement, les cellules sont très sensibles aux rayonnements au stade de la mitose ; celles qui sont les moins différenciées sont les plus sensibles, ce qui est le cas des cellules cancéreuses. C'est pourquoi certains rayonnements sont utilisés dans le traitement des cancers.

Un organisme peut être exposé de deux façons différentes aux rayonnements ionisants :

- Par **irradiation**, lorsque la source se trouve en dehors de l'organisme.
- Par **contamination**, lorsque la source est absorbée par l'organisme (ingestion, respiration...). Ce dernier se trouve exposé tant que la source n'est pas évacuée ou « morte ».

Les effets pathologiques des rayonnements sur l'homme dépendent de la dose énergétique reçue. Pour concrétiser « la quantité de rayonnement » reçue, on définit deux grandeurs et deux unités correspondantes.

- la **dose énergétique reçue** est la quantité d'énergie reçue par unité de masse. Son unité dans le système international est le Gray noté Gy et telle que $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J.kg}^{-1}$.

- L'**équivalent de dose** tient compte du fait que, à énergies égales, toutes les particules ne sont pas également ionisantes. A chaque type de particule est associé un facteur de qualité Q (voir tableau ci-après).

L'équivalent de dose est le produit de ce facteur par la dose énergétique reçue, on l'exprime en sievert noté Sv.

Particule	α	β	γ	x
Q (Sv.Gy ⁻¹)	20	1	1	1

Selon la dose énergétique reçue par l'homme, on distingue :

* **Les effets somatiques** résultent d'une exposition de l'individu aux rayonnements entraînant une irradiation aiguë à fort débit de dose (0.5 Sv en quelques minutes), ces effets peuvent être :

- **précoces**: on peut avoir une irradiation de la peau provoquant des brûlures, des infections, des cancers voire la mort quand la dose est importante ; une irradiation des intestins (risque de perforation) ; une irradiation des yeux (cataracte), des gonades (stérilité)...

- **tardifs**: cancers et leucémies, peuvent se manifester plus de dix ans après l'irradiation.

La gravité de ces effets ne dépend pas de la dose reçue. Par contre, leur probabilité d'apparition augmente avec cette dose.

Signalons, à cet effet, que Irène et Frédéric Joliot Curie sont morts d'une leucémie.

* **Les effets foeto-embryonnaires** sont à l'origine de malformations ou de la mort des embryons. L'irradiation de la femme enceinte est donc contre-indiquée car les tissus des embryons sont particulièrement radiosensibles. La fréquence, mais non la gravité, des effets génétiques (action sur la descendance du sujet irradié), augmente avec la dose reçue. Ces effets résultent d'une dose supérieure à 0.05 Sv.

Effet d'une dose sur l'homme (très simplifié)

Dose reçue (Sv)	Symptômes précoces	Symptômes tardifs	Diagnostic
< 1	Aucun	Aucun	
1 – 2	Vomissements (24h) Lymphocytes : < 1500/mm ³	Possibilité d'induction de cancers à long terme	Survie 100%
2 – 5	Vomissements (3 à 4 jours) Lymphocytes : < 1000/mm ³	Infection La moelle est atteinte	Mortalité possible sans traitement, rare après soins
5 – 9	Vomissements ininter- rompus Lymphocytes : < 500/mm ³	Hémorragies Système gastro - intesti- nal détruit	Mort très probable même avec des soins
> 9	Troubles du système nerveux Lymphocytes : ≈ 0	Le système nerveux central est partiellement détruit	Mortalité 100% quel que soit le traitement

D'après : Electricité de France.

Energie nucléaire et électricité

Dans une centrale thermonucléaire, comme dans une centrale thermique au charbon ou au fuel, on transforme l'énergie thermique libérée par un combustible en énergie mécanique, puis électrique.

L'énergie thermique produite transforme l'eau en vapeur. Celle-ci actionne ensuite une turbine qui entraîne un alternateur produisant de l'énergie électrique. La vapeur qui alimente la turbine peut être produite soit directement dans le réacteur, soit par l'intermédiaire d'un échangeur.

Dans une centrale thermique classique, l'énergie thermique provient de la combustion dans la chaudière d'un combustible fossile (charbon, fuel-oil, gaz...) alors que dans une centrale nucléaire, l'énergie thermique provient de la fission des noyaux d'uranium dans le réacteur nucléaire.

Principe de fonctionnement

Si le principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire est simple, la technologie mise en œuvre est, en revanche, très complexe en raison des puissances mises en jeu, des rendements recherchés et des problèmes variés que pose la domestication de l'atome et des précautions qu'elle impose.

Une centrale nucléaire est constituée essentiellement :

- **d'un réacteur** (Fig.2) qui comporte :

* une partie active ou cœur composé du combustible, du modérateur et d'un fluide dit caloporteur. Il assure la production d'énergie thermique.

Le combustible le plus couramment utilisé est l'uranium 235.

Le modérateur ralentit les neutrons pour entretenir la réaction en chaîne.

Le fluide caloporteur qui transforme l'énergie thermique, gazeux ou liquide, évacue hors du réacteur l'énergie thermique libérée par la fission nucléaire.

* un dispositif de réglage et de sécurité servant à maintenir la réaction en chaîne à un niveau déterminé et à l'arrêter immédiatement en cas de situation anormale

- des échangeurs d'énergie thermique

L'énergie thermique extraite du cœur du réacteur par le fluide de refroidissement est transmise par des échangeurs d'énergie thermique au circuit eau-vapeur. La vapeur produite dans les échangeurs alimente la turbine qui entraîne l'alternateur produisant l'électricité.

Sécurité dans les centrales nucléaires

Un contrôle rigoureux de l'installation nucléaire est indispensable car le réacteur concentre une énorme quantité d'énergie et dégage une intense radioactivité. De coûteux mais indispensables dispositifs de sécurité sont mis en place.

D'une façon générale, les réacteurs nucléaires sont conçus de telle sorte que la réaction en chaîne a tendance à se ralentir quand la température augmente.

Dans tous les cas, la sécurité de fonctionnement est obtenue par :

- les barres de réglage qui permettent de maintenir la puissance du réacteur à un niveau donné,
- les barres de sécurité dont la chute automatique arrête la réaction en cas de détection d'anomalie de fonctionnement.

Dans le but de bien protéger l'environnement contre les rayonnements radioactifs, on dispose une gaine autour du combustible pour retenir les produits de fission. De plus, le réacteur est placé dans une cuve étanche entourée par une protection biologique dont le rôle est d'arrêter les radiations, et enfin une enceinte de sécurité dite aussi enceinte de confinement entoure l'ensemble de la partie nucléaire de la centrale. L'ensemble constitue le bâtiment réacteur conçu pour résister par exemple, à la chute d'un avion.

Malgré les mesures draconiennes de sécurité, l'accident de la centrale de Tchernobyl en Ukraine (Russie), survenu le 26 Avril 1986, a fait immédiatement une trentaine de morts et plusieurs centaines de milliers de personnes contaminés par le césium 137. L'accident est survenu suite à l'explosion du quatrième réacteur, encore en essai, et dans lequel la réaction en chaîne échappe au contrôle. Un énorme incendie détruit le site (Fig.3) et une haute radiation contamine rapidement la zone dans un rayon d'une trentaine de kilomètres, obligeant les autorités à évacuer d'urgence 130000 habitants.

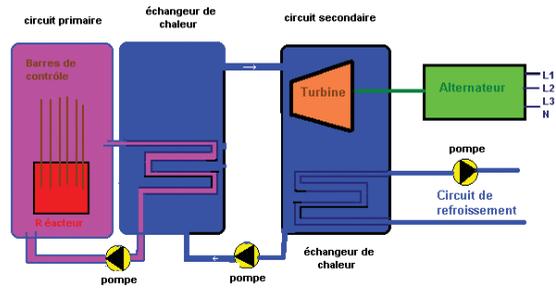


Fig.2 : Schéma simplifié d'une centrale nucléaire

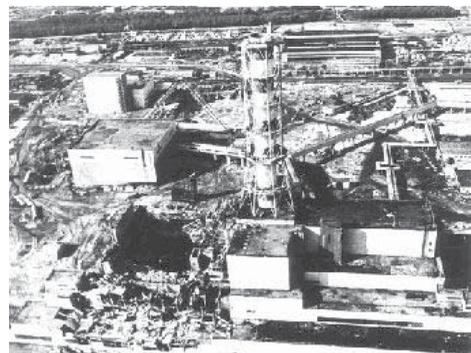


Fig.3 : Site dévasté de Tchernobyl

Réponses aux exercices

Chapitre 1

3. 1°) $0,7 \mu\text{F}$, 2°) $8,8 \cdot 10^{-3} \text{ J}$
 4. 1°) $18 \mu\text{C}$, 2°) a) $0,9 \text{ V}$, b) $8,1 \cdot 10^{-6} \text{ J}$
 5. 1°) $0,24 \text{ s}$, 2°) a) 12 V , b) $3,6 \cdot 10^{-8} \text{ A}$
 6. 1°) $6 \cdot 10^{-4} \text{ A}$, 2°) 20 ms , 3°) 92 ms
 7. 3°) $1 \mu\text{s}$, 4°) 10^{-8} F
 8. 1°) $0,12 \text{ s}$, 2°) $12 \text{ k}\Omega$, 3°) $10 \mu\text{F}$
 9. 3°) 12 V , 150 ms , 4°) $15 \text{ k}\Omega$

Chapitre 2

3. a- Nord, b- Sud, c- Sud; d- Nord.
 4. 1°) a) Bp et Ba sont opposés., b) La règle du bonhomme d'Ampère.
 2°) a) Bp et Ba ont le même sens, b) La règle du bonhomme d'Ampère.
 5. 1°) $\frac{di}{dt} = -\frac{c}{L}$. 2°) $t \in [0, 5 \text{ ms}]$, $\frac{di}{dt} = -6 \text{ A}\cdot\text{s}^{-1}$
 $t \in [5, 8 \text{ ms}] \Rightarrow \frac{di}{dt} = 10 \text{ A}\cdot\text{s}^{-1}$, 3°) $t \in [0, 5 \text{ ms}]$,
 $i = f(t)$ décroissante.
 $t \in [5, 8 \text{ ms}]$, $i = f(t)$ croissante.
 6. 1°) $u_{AB} = (12L.t + 6r.t^2) \cdot 10^{-3} \text{ V}$. 2°) $u_{AB} \simeq 6,06 \text{ V}$.
 7. 1°) $t \in [0, 40 \text{ ms}] \Rightarrow u_{AB} = 3L$, $-t \in [40, 50 \text{ ms}] \Rightarrow$
 $u_{AB} = -12L$, 2°) $t \in [0, 40 \text{ ms}] \Rightarrow u_{AB} = 0,3V$
 $-t \in [40, 50 \text{ ms}] \Rightarrow u_{AB} = -1,2V$
 8. 1°) $i(t)$ tend vers une limite I_0 . 2°) $I_0 = \frac{E}{r + R_0}$.
 3°) $\frac{di}{dt} + \frac{R}{L}i = \frac{E}{L}$. 4°) On remplace i par son expression. 5°) $A = \frac{E}{R}$; $\alpha = \frac{R}{L}$. 6°) $\tau = \frac{L}{R}$; pour $t = 5 \cdot \tau$ le régime permanent s'établit.
 9. a) $I_0 = \frac{E}{R} = 0,1 \text{ A}$. b) $\tau = \frac{L}{R} = 0,83 \text{ ms}$.
 10. 1°) $u_{AB} = L \cdot \frac{di}{dt} + r \cdot i$. 2°) $u_{BC} = R \cdot i$. 3°) courbe 1: u_{BC} , courbe 2: u_{AB} . 4°) $I_0 = \frac{E}{r + R} = 28,6 \text{ mA}$.
 5°) $I_0 = \frac{u_{BC}}{R} \simeq 28,5 \text{ mA}$. 6°) Méthode de tangente
 7°) $\tau = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ s}$. 8°) $\tau = \frac{L}{r + R}$.
 Donc, $L = \tau \cdot (r + R) = 0,53 \text{ H}$.
 11. 2°) $u_{AB} = L \cdot \frac{di}{dt} + r \cdot i$. 3°) a) $I_0 = \frac{u_r}{r'} = 0,1 \text{ A}$. b) $r' = 10 \text{ ?}$. 4°) $\tau \simeq 10^{-3} \text{ s}$. 5°) $L = (r + r') \cdot \tau = 60 \text{ mH}$.
 6°) $W = 0,3 \text{ mJ}$.

12. 1°) $I_0 = 50 \text{ mA}$.
 2°) a) la méthode de la tangente donne $\tau = 22 \text{ ms}$.
 b) $i(t_{1/2}) = \frac{I_0}{2} \rightarrow \tau = 22 \text{ ms}$.
 3°) $L = R \cdot \tau = 1,1 \text{ H}$.
 4°) $e \simeq 3,3 \text{ V}$.

13. 1°) Le courant i circule de A vers B à travers la

$$\text{bobine. } I = \frac{E}{R + r} = 0,6 \text{ A.}$$

2°) Le courant i circule de A vers B à travers la bobine, la diode est passante.

$$3°) W = m \cdot \|\vec{g}\| \cdot h = 36,3 \cdot 10^{-3} \text{ J.}$$

$$W_m = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 = 324 \cdot 10^{-3} \text{ J. Le rendement } \tau = 11,2 \text{ \% .}$$

Chapitre 3

3. 1°) Oscillations libres amorties;
 2°) $E = 1,52 \cdot 10^{-4} \text{ J}$; 4°) $L = 2,67 \text{ H}$
 4. 1°) L'amplitude décroît au cours du temps
 2°) $T = 6,5 \text{ ms}$; 3°) $T_0 = 6,28 \text{ ms}$. 4°) $T_E = 3,3 \text{ ms}$;
 5°) $T = 2T_E$.
 7. 1°) $T_0 = 4,0 \text{ ms}$ et $T = 4,4 \text{ ms}$, donc $T > T_0$.
 2°) $E_1 = 1,485 \mu\text{J}$ et $E_7 = 0,145 \mu\text{J}$.
 3°b) L'énergie totale diminue au cours du temps.
 9. 1°) $Q_0 = 3 \cdot 10^{-5} \text{ C}$; 2°b) Voir cours page 2°
 d) $U_m = 3 \text{ V}$, $\phi = \pi/2 \text{ rad}$; 2°f) $t_k = 0,75 T_0 + kT_0$.
 3°a) $T > T_0$; 3°c) $W_J = 32,2 \mu\text{J}$.
 10. 1°) L'amplitude des oscillations diminue.
 2°b) $L = 0,255 \text{ H}$; 25%
 11. 1°a) $A = 0$, $u_C = E$, donc (2) correspond à u_C .
 1°c) $\tau = 0,7 \text{ s}$; 1°d) $i \simeq 158 \mu\text{A}$.

Chapitre 4

3. $C = 9,5 \cdot 10^{-7} \text{ F}$
 5. 2°) $I = U/Z$; 3°a) $N = 48 \text{ Hz}$;
 3°b) $Z_0 = 32,5 \Omega$; $I_0 = 3,077 \text{ A}$.
 6. 2°a) Résonance d'intensité. 2°b) ω_0 ne dépend que de L et de C . 2°c) $Z = R$ et $\Delta\phi = 0$.
 7. 1°) $r = 15,4 \Omega$; 2°) $Q = 10,445$; $P = 0,26 \text{ W}$.
 9. 2°a) $L_0 = 1 \text{ H}$; 2°b) $Q = 6,28 > 1$; 3°) $L < 1,6 \text{ H}$.
 10. 1°) $E_0 = 2\pi U^2 / \omega_0 R$; 2°) $E_t = LU^2 / R^2$.
 3°) $E_t / E_0 = Q / 2\pi$.
 11. 2°) $L = 0,135 \text{ H}$; $r = 60 \Omega$.
 12. 4°) a) Courbe (2)
 b) $N_0 = 210 \text{ Hz}$; $N_r = 205 \text{ Hz}$;
 $C = 5,75 \mu\text{F}$; $R = 40,5 \Omega$.

Chapitre 5

3. 3.46 cm, 5.77 rad.s⁻¹, 0 rad
 4. 2°) 0.628 s
 5. 1°) 0.89s, 2°) 0.14 m.s⁻¹, 3°) X_m diminue.
 6. 1°) a) 0.628 s, b) 1.59 Hz, 2°) a) 0.8 s ;
 T > T_O, b) E_O = 0.1 J ; E₁ = 0.036 J

Chapitre 6

3. 2°) T_O = 0,28 s ; 3) Risque de rupture
 5. 1°) T = d/v ; N = v/d 2°) b) v_O = 3 m.s⁻¹
 6. 2°) a) 68,2 tr.min⁻¹ ; 5 cm ; 2.27 Hz ; π/2 rad
 b) T_O = T, résonance de vitesse ;
 d) F_m = 1,29 N ; φ_F = 0 rad ; P = 0,46 W
 7. 3) a) 0,8 s, b) 3,14 N.m⁻¹.

Chapitre 7

3. 1°) N = 50Hz, λ = 0,2 m. 2°) b- M₁ et S vibrent en opposition de phase, M₂ et S vibrent en phase.
 3°) N_e = 25 Hz : immobilité ; N_e = 49Hz : mouvement ralenti dans le sens réel ; N_e = 51 Hz mouvement ralenti dans le sens inverse.
 4. 1°) y_S(t) = 5.10⁻³.sin(100πt)
 2°) a) y_M(t) = 5.10⁻³.sin(100πt - 2πd/λ),
 b) y_M(t) = 5.10⁻³.sin(100πt - π).
 5. 1°) -a) v = 5 m.s⁻¹. b) λ = 5.10⁻² m. 2°)
 a) y_M(t) = 2.10⁻³.sin(200πt - π). c) t = 6,75.T + k.T.
 6. 1°) λ = 5.10⁻³ m, 2°) v = 0,25 m.s⁻¹. 3°) t₁ = 6.10⁻² s.
 4°) y_S(t) = 4.10⁻³.sin(100πt + π), 5) Points sur les cercles de rayons : x₁ = λ/2 ; x₂ = 3λ/2 ; x₃ = 5λ/2 .
 7. 1°) b-λ = 8.10⁻³ m. 2°) a) y_M(t) = 2.10⁻³.sin(100πt)
 b) v = 0,4 m.s⁻¹. c) y_O(t) = 2.10⁻³.sin(100πt + π).
 4°) Deux cercles de rayons x₁ = λ et x₂ = 2λ.
 8. 2°) a) λ = 0,3 m ; v = 30 m.s⁻¹ ; N = 100Hz.
 b) y_S(t) = 3.10⁻³.sin(200πt).
 c) y_A(t) = 3.10⁻³.sin(200πt - π).
 9. I. 1°) T = 0,01 s ; λ = 0,2 m. 2°) v = 20 m.s⁻¹ ;
 x_A = 0,40 m ; t₁ = 0,02 s .
 3°) y_S(t) = 4.10⁻³.sin(200πt) ; y_A(t) = 4.10⁻³.sin(200πt)
 4°) c) 3 points situés à x = 5λ/12 + kλ (k = 0, 1, ou 2).
 II- 1°) y_M(t) = 10⁻³.sin(628t - 2π.x/λ), 2°) v = 0,4 m.s⁻¹.
 4°) immobilité : N_e = N/k, pour k=1: N_e = N = 100 Hz.
 10. 1°) a) N = 50 Hz ; λ = 0,2m. b) v = 10 m.s⁻¹.
 c) x₁ = 0,55 m ; t_O = 0,055 s.
 2°) S et M₁ en quadrature de phase.
 3°) t = (6,75.10⁻² + 0,02k) s ; t₁ = 6,75.10⁻² s.
 4°) 3 points situés à x = λ/8 + kλ, avec k = 0, 1, ou 2.
 11. 1°) a) 10⁻⁴ s/div, b) dilution de l'énergie.
 2°) b) d = 34 cm ; base de temps : 2.10⁻⁴ s / div.
 12. 1°) N = 500 Hz. 2°) λ = 0,68 m, 3°) v = 340 m.s⁻¹.
 13. b) N = 1000 Hz, c) λ = 0,34 m. d) v = 340 m.s⁻¹
 14. 1°) a) T = 68 ms, s = 0,1 ms/div.
 b) θ = 0,15 ms ; Δt = n.T + θ = n / f + θ .
 2°) U_R = 300 mV ; U_B = 250 mV.
 3°) λ = d₂ - d₁ = 23 cm. v = λ.f = 338 m.s⁻¹.
 4°) d = v. Δt = v (n / f + θ) = λ.n + λ.f.θ,
 d = 23.n + 5,1 (cm) ; d = 51,1 cm.
 5°) Célérité constante, l'air est un milieu non dispersif.

Chapitre 8

4. 1°) rides circulaires, 3°) diffraction,
 4°) λ << l, pas de diffraction.
 6. 1°) n=c/v, 2°) sin(i₁)=n.sin(i₂), 4°) une tache,
 5°) oui, on obtient le spectre de la lumière blanche.
 7. 1°) Une seule radiation, 2°) a) Tache centrale de
 largeur L, b) λ/a = 6,3.10⁻⁶ < 0,174, 3°) L' = 9,2.10⁻³ m,
 4°) L' < L, 5°) L = 0,63.10⁻³ m, on mesure difficilement L.
 8. 2°) θ₁ = X₁/2D,
 4°) X₁ = 2λ. D/a = 1,8.10⁻² m.
 9. 1°) n₁sin(i₁) = n₂sin(i₂), 2°) sin(r_j) = sin(i)/n_j,
 r₁ = 19,67°, 3°) i_j > r_j par la suite D = i_j - r_j = 10,3°.
 4°) r_b = 19,2° et D' = 10,8°, ainsi la radiation bleue est
 la plus déviée, la dispersion de la lumière.

Chapitre 9

3. 1°) (non) ; 2°) (non) .
 4. 1°) E_{4,2} = 2,27 eV = 3,63.10⁻¹⁹ J, E_{3,1} = 7,05 eV =
 11,28.10⁻¹⁹ J. 2°) λ_{4,2} = 547 nm, λ_{3,1} = 176 nm.
 3°) spectroscopie à réseau.
 5. 1°) E₁ = -13,6 eV ; E₂ = -3,4 eV ; E₃ = -1,5 eV ;
 E₄ = -0,85 eV. E_∞ = 0 ; 2°) c) ionisé .
 3°) λ_{4,1} = 97,3 nm . 4°) v_i = 3,29.10¹⁵ Hz .
 6. a) n=1, c) E_i = 13,6 eV. d) λ_{4,1} = 97,3 nm .
 e) λ_{2,1} = 121,7 nm
 7. a) E_i = 13,6 eV. b) E_{2,1} = 10,2 eV. c) λ_{2,1} = 121,7 nm
 d) v_{n,2} = (E_n - E₂) / h, série de Balmer, λ_{3,2} = 656,7 nm.
 8. 1°) a) (E=0 : ionisation). b) (E₁ = -13,6 eV).
 c) (E_i = 13,6 eV) . 3°) λ_{6,2} = 411 nm .
 9. 2°) v_{2,1} = 3/4.E_O/h. 3°) v_{3,2} = v_{3,1} - v_{2,1}

Chapitre 10

3. m = 4,0015 u
 4. E_O = 22,23. 10⁴ MeV
 5. 2°) E₈₅ = 739,685 MeV ; E₈₉ = 771,53 MeV
 E_{85/A} = 8,7 MeV ; E_{89/A} = 8,67 MeV
 3°) Rb(85) plus stable que Rb(89).
 6. 1°) 2p et 2n 2°) Δm = 0,0304 u, 3°) E = 28,3176 MeV.
 4°) H_e(4) > H_e(6) > H_e(3)
 7. 2°) E = 1755,67 MeV. 3°) E/A = 7,377 MeV ; 4°)
 E = 1,7.10¹⁴ J.
 8. 2°) a) E = 1136,337 MeV = 1818,14.10⁻¹³ J 2°) b)
 E/A = 8,175 MeV ; 3°) a) y_{Se} = 8,5 MeV ;
 y_U = 7,395 MeV. y = - 7,13.10⁻³ A + 9,07.
 9. 2°) E_{Mg} = m_{Mg}c². 3°) E_p = 938,28 MeV ; E_n = 939,576 MeV.

Chapitre 11

4. x = 3, y = 2, x' = 5, y' = 4
 5. 1°) ²¹⁸₈₄Po → ⁴₂He + ²¹⁴₈₂Pb ; 2°) T = 27 min ; λ = 4,27.10⁻⁴ s⁻¹
 6. 1°) ²²⁶₈₈Ra → ⁴₂He + ²²²₈₆Rn ; 2°) W = 7,9.10⁻¹³ J.
 8. 1°) a) x = 57, y = 3 ; b) défaut de masse ; 2°) a) X
 un neutron ¹₀n, Y un électron ⁰₋₁e ; b) A = 239 Z = 94.
 10. 1°) a) ²³⁸₉₂U + ¹₀n → ²³⁹₉₂U ; b) ²³⁹₉₂U → ²₋₁e + ²³⁹₉₄Pu ;
 2°) a) A = 94, Z = 54 ; b) fission
 11. 1°) ⁷⁷₃₅Br → ⁰₋₁e + ⁷⁷₃₄Se ; 2°) 3,38.10⁻⁶ s⁻¹ ;
 3°) 1,68.10²¹.