

Transformations nucléaires et décroissance radioactive

COURS • C15 • TERMINALE

Spécialité de terminale, programme officiel. Cours original rédigé avec une IA. Le cours de ton enseignant fait foi.

Sommaire du cours

Ce que tu dois savoir faire	1
Cours	1
Exemples résolus	7
Méthodes et pièges	8
Vers le PASS	8
Exercices	9
Corrigés	10

Ce que tu dois savoir faire

- Décrire la composition d'un noyau à partir de sa notation symbolique (nombre de masse A en exposant, numéro atomique Z en indice) et reconnaître des isotopes.
- Exploiter le diagramme (N, Z) pour situer la vallée de stabilité et prévoir le type de radioactivité d'un noyau instable.
- Écrire l'équation d'une désintégration α , β^- ou β^+ et d'une émission γ en appliquant les lois de conservation.
- Établir et exploiter la loi de décroissance radioactive $N(t) = N_0 \exp(-\lambda t)$.
- Définir l'activité d'un échantillon, l'exprimer en becquerels et relier $A(t)$ à $N(t)$.
- Définir la demi-vie, établir $t_{1/2} = \ln 2 / \lambda$ et l'utiliser pour des calculs rapides en puissances de 2.
- Expliquer le principe d'une datation par radioactivité et déterminer un âge à partir de mesures d'activité.
- Citer des applications médicales des radio-isotopes et justifier le choix d'un isotope par sa demi-vie et son type d'émission.
- Connaître les unités de dose (gray, sievert) et les principes de radioprotection.

Cours

1. Le noyau atomique

Un atome est formé d'un **noyau** très petit (rayon de l'ordre de 10^{-15} m, soit cent mille fois moins que l'atome) entouré d'électrons. Le noyau contient des **nucléons** : les **protons**, de charge $+e$, et les **neutrons**, neutres. Les masses du proton et du neutron sont très voisines (environ $1,67 \times 10^{-27}$ kg) et environ 1 840 fois supérieures à celle de l'électron : presque toute la masse de l'atome est dans le noyau.

Un noyau se note par le symbole X de l'élément, précédé du **nombre de nucléons A** (nombre de masse) en exposant et du **nombre de protons Z** (numéro atomique, nombre de charge) en indice : ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{238}_{92}\text{U}$. Dans les écritures générales, on note simplement $X(A ; Z)$. Le nombre de neutrons est $N = A - Z$. Par exemple, le noyau ${}^{238}_{92}\text{U}$ contient 92 protons et $238 - 92 = 146$ neutrons.

Des **isotopes** sont des noyaux de même Z (même élément) mais de A différents, donc de nombres de neutrons différents. Le carbone possède ainsi les isotopes ${}^{12}_6\text{C}$ (98,9 % du carbone naturel), ${}^{13}_6\text{C}$ et ${}^{14}_6\text{C}$; ce dernier est radioactif. Des isotopes ont les mêmes propriétés chimiques, car celles-ci dépendent des électrons, donc de Z .

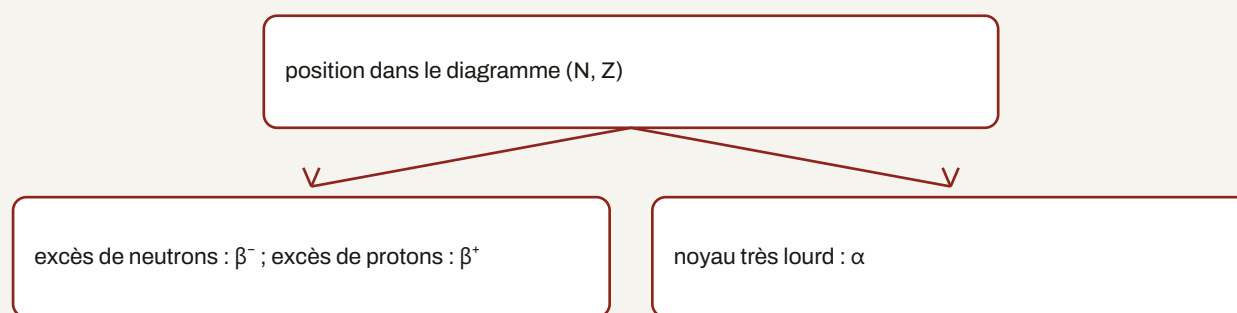
Cohésion du noyau. Les protons se repoussent par interaction électrique. La cohésion du noyau est assurée par l'**interaction forte**, attractive entre nucléons, très intense mais de très courte portée (de l'ordre de la taille du noyau). La stabilité d'un noyau dépend de l'équilibre entre ces deux interactions, donc de ses nombres de protons et de neutrons.

Diagramme (N, Z) et vallée de stabilité. En plaçant tous les noyaux connus dans un diagramme où l'on porte N en fonction de Z , les noyaux stables forment une bande étroite, la **vallée de stabilité**. Pour les noyaux légers (Z inférieur à 20 environ), elle suit la droite $N = Z$. Pour les noyaux plus lourds, elle s'incurve au-dessus de cette droite : il faut davantage de neutrons que de protons pour compenser la répulsion électrique. Au-delà de $Z = 83$ (bismuth), aucun noyau n'est stable.

La position d'un noyau instable par rapport à la vallée permet de prévoir son mode de désintégration :

- noyau **trop riche en neutrons** (au-dessus de la vallée) : radioactivité β^- ;
- noyau **trop riche en protons** (au-dessous de la vallée) : radioactivité β^+ ;
- noyau **trop lourd** (A supérieur à 200 environ) : radioactivité α .

Prévoir la désintégration d'un noyau instable



Deux branches distinctes • ce schéma ne relie pas les deux issues entre elles

2. Les radioactivités α , β^- , β^+ et l'émission γ

Un noyau **radioactif** est un noyau instable qui se transforme **spontanément** en un autre noyau, en émettant une particule et souvent un rayonnement. On parle de **désintégration**. Le noyau initial est le **noyau père**, celui qui est obtenu est le **noyau fils**.

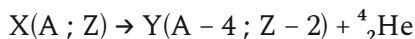
Lois de conservation (lois de Soddy). Au cours d'une transformation nucléaire, il y a conservation :

- du **nombre de nucléons** : la somme des A est la même avant et après ;

- de la **charge électrique** : la somme des Z est la même avant et après.

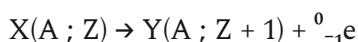
Ces deux lois suffisent pour compléter une équation de désintégration. Contrairement à une transformation chimique, une transformation nucléaire **change l'élément** : l'élément chimique n'est pas conservé.

Radioactivité α . Le noyau émet une particule α , c'est-à-dire un noyau d'hélium ${}^4_2\text{He}$:



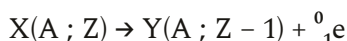
Exemple : ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He}$. Vérification : $238 = 234 + 4$ et $92 = 90 + 2$.

Radioactivité β^- . Un neutron du noyau se transforme en proton, avec émission d'un électron ${}^0_{-1}\text{e}$ (et d'un antineutrino, particule neutre de masse quasi nulle, souvent omise dans les équations au lycée) :



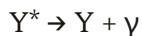
Exemple : ${}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + {}^0_{-1}\text{e}$. Le nombre de nucléons ne change pas, Z augmente de 1. L'électron émis vient du noyau, pas du cortège électronique.

Radioactivité β^+ . Un proton se transforme en neutron, avec émission d'un **positon** ${}^0_1\text{e}$, antiparticule de l'électron, de même masse et de charge $+e$ (et d'un neutrino) :



Exemple : ${}^{18}_9\text{F} \rightarrow {}^{18}_8\text{O} + {}^0_1\text{e}$. Ce type concerne des noyaux artificiels, produits en cyclotron.

Émission γ . Après une désintégration, le noyau fils est souvent dans un **état excité**, noté avec un astérisque. Il se désexcite en émettant un **photon** γ , rayonnement électromagnétique de très haute énergie (de l'ordre du MeV, environ un million de fois l'énergie d'un photon visible) :



L'émission γ ne change ni A ni Z . Exemple : ${}^{60}_{27}\text{Co} \rightarrow {}^{60}_{28}\text{Ni} + {}^0_{-1}\text{e}$, puis ${}^{60}_{28}\text{Ni} \rightarrow {}^{60}_{28}\text{Ni} + \gamma$.

Désintégration	Particule émise	Variation de A	Variation de Z	Pouvoir de pénétration
α	noyau ${}^4_2\text{He}$	-4	-2	faible : arrêtée par une feuille de papier ou quelques cm d'air
β^-	électron ${}^0_{-1}\text{e}$	0	$+1$	moyen : arrêté par quelques mm d'aluminium
β^+	positon ${}^0_1\text{e}$	0	-1	le positon s'annihile très vite avec un électron
γ	photon	0	0	élevé : atténué par plusieurs cm de plomb ou du béton épais

Transformations provoquées et énergie. Les transformations nucléaires peuvent aussi être provoquées : **fission** d'un noyau lourd (uranium 235) frappé par un neutron, ou **fusion** de noyaux légers (dans les étoiles). Toutes obéissent aux mêmes lois de conservation. Elles libèrent des énergies de l'ordre du MeV par noyau, contre quelques eV par entité pour une réaction chimique, car la masse des

produits est légèrement inférieure à celle des réactifs (relation $E = \Delta m \times c^2$).

3. La loi de décroissance radioactive

Caractère aléatoire. On ne peut pas prévoir l'instant où un noyau donné va se désintégrer. La désintégration est **aléatoire** et **spontanée** : elle ne dépend ni de l'âge du noyau, ni de la température, ni de la pression, ni de la combinaison chimique dans laquelle se trouve l'atome. En revanche, pour un très grand nombre de noyaux identiques, le comportement global est parfaitement prévisible : c'est une loi **statistique**.

Chaque noyau d'une espèce donnée a une probabilité λdt de se désintégrer pendant une durée dt très courte. La grandeur λ est la **constante radioactive**, caractéristique du noyau, en s^{-1} .

Mise en équation. Soit $N(t)$ le nombre de noyaux radioactifs présents à l'instant t . Pendant dt , le nombre de désintégrations est en moyenne $\lambda N(t) dt$, et N diminue d'autant :

$$dN = -\lambda N dt, \text{ soit } dN/dt = -\lambda N$$

C'est une équation différentielle du premier ordre, du type $y' = ay$ avec $a = -\lambda$. Ses solutions sont $N(t) = C \exp(-\lambda t)$. Avec $N(0) = N_0$:

$$N(t) = N_0 \times \exp(-\lambda t)$$

C'est la **loi de décroissance radioactive** : le nombre de noyaux radioactifs décroît exponentiellement. On définit aussi la **constante de temps** $\tau = 1/\lambda$: à $t = \tau$, $N = N_0/e$, soit environ 37 % de N_0 . La tangente à l'origine de la courbe $N(t)$ coupe l'axe des temps en $t = \tau$.

La loi est la même que celle d'une réaction chimique d'ordre 1 : λ joue le rôle de la constante de vitesse k .

4. L'activité d'un échantillon

L'**activité** A d'un échantillon est le nombre moyen de désintégrations qu'il subit par seconde :

$$A(t) = -dN/dt = \lambda \times N(t)$$

Elle s'exprime en **becquerels** (Bq) : 1 Bq = 1 désintégration par seconde. Comme A est proportionnelle à N :

$$A(t) = A_0 \times \exp(-\lambda t), \text{ avec } A_0 = \lambda N_0$$

L'activité est la grandeur que l'on mesure, avec un compteur Geiger ou un détecteur à scintillation : le détecteur compte les particules ou photons émis, et l'on corrige du **bruit de fond** (radioactivité naturelle ambiante, mesurée sans échantillon). Pour retrouver le nombre de noyaux, on utilise $N = A/\lambda$.

Ordres de grandeur : le corps humain a une activité d'environ 8 000 Bq (potassium 40 et carbone 14 surtout) ; un kilogramme de granite, environ 1 000 Bq ; une dose injectée pour une scintigraphie, quelques centaines de mégabecquerels.

5. Demi-vie

La **demi-vie** $t_{1/2}$ d'un noyau radioactif est la durée au bout de laquelle la moitié des noyaux initialement présents se sont désintégrés : $N(t_{1/2}) = N_0/2$.

Relation avec λ . $N_0 \exp(-\lambda t_{1/2}) = N_0/2$, donc $\exp(-\lambda t_{1/2}) = 1/2$, soit $\lambda t_{1/2} = \ln 2$:

$$t_{1/2} = \ln 2 / \lambda \approx 0,693 / \lambda$$

La demi-vie **ne dépend pas** de N_0 ni de l'instant de départ : au bout de chaque nouvelle demi-vie, le nombre de noyaux restants est encore divisé par deux. Après n demi-vies :

$$N = N_0 / 2^n \text{ et } A = A_0 / 2^n$$

Après 10 demi-vies, il reste 1/1 024, soit environ 0,1 % des noyaux : l'activité est souvent considérée comme négligeable.

Plus généralement, $N(t) = N_0 \times 2^{-t/t_{1/2}}$, écriture pratique pour les calculs.

Noyau	Désintégration	Demi-vie	Usage
Fluor 18	β^+	110 min	imagerie TEP
Technétium 99m	γ	6,0 h	scintigraphie
Iode 131	β^- et γ	8,0 jours	traitement de la thyroïde
Radon 222	α	3,8 jours	gaz naturel des sols granitiques
Cobalt 60	β^- et γ	5,3 ans	sources de rayonnement γ
Carbone 14	β^-	5 730 ans	datation archéologique
Potassium 40	β^- (principalement)	$1,25 \times 10^9$ ans	datation des roches
Uranium 238	α	$4,47 \times 10^9$ ans	datation des roches, âge de la Terre

Les demi-vies couvrent un domaine immense, de fractions de seconde à des milliards d'années.

Calculer avec la décroissance radioactive

1. identifier $t_{1/2}$ ou λ • 2. convertir les durées dans la même unité • 3. calculer $t/t_{1/2}$ • 4. appliquer $N = N_0 \times 2^{-t/t_{1/2}}$ ou $N = N_0 \exp(-\lambda t)$ • 5. revenir à l'activité par $A = \lambda N$

6. Datation par radioactivité

Principe. Si l'on connaît l'activité A_0 (ou le nombre de noyaux N_0) d'un échantillon à sa formation et son activité A aujourd'hui, la loi de décroissance donne la durée écoulée :

$$A = A_0 \exp(-\lambda t), \text{ donc } t = (1/\lambda) \times \ln(A_0/A) = (t_{1/2} / \ln 2) \times \ln(A_0/A)$$

Datation au carbone 14. Le carbone 14 est produit en permanence dans la haute atmosphère par l'action des neutrons cosmiques sur l'azote 14. Il s'intègre au dioxyde de carbone, puis aux êtres vivants par la photosynthèse et l'alimentation. Tant qu'un organisme vit, il échange du carbone avec son milieu : la proportion de carbone 14 dans son carbone reste constante, égale à celle de l'atmosphère, ce qui correspond à une activité d'environ 0,23 Bq par gramme de carbone. À sa mort, les échanges cessent : le carbone 14 n'est plus renouvelé et son activité décroît avec une demi-vie de 5 730 ans. On compare l'activité par gramme de carbone de l'échantillon à celle d'un organisme vivant.

Domaine de validité. Une méthode de datation n'est utilisable que si la durée à mesurer est du même ordre de grandeur que la demi-vie : trop courte, l'activité n'a presque pas changé ; trop longue, elle est devenue trop faible pour être mesurée. Le carbone 14 permet de dater jusqu'à 40 000 à 50 000 ans environ, et ne concerne que des restes d'êtres vivants (bois, os, tissus, charbon). Pour les roches, on utilise des noyaux de très longue demi-vie (potassium 40, uranium 238) en comparant les quantités de noyaux père et fils.

L'hypothèse de base, la constance de la teneur en carbone 14 de l'atmosphère au cours du temps, n'est qu'approximative ; on corrige les âges par des courbes d'étalonnage.

7. Applications médicales

Imagerie (diagnostic). On injecte un **traceur** : une molécule qui se fixe sur l'organe étudié, marquée par un isotope radioactif. Comme les isotopes ont les mêmes propriétés chimiques, la molécule marquée suit le même chemin que la molécule ordinaire. Un détecteur externe repère le rayonnement et reconstitue une image du fonctionnement de l'organe.

- **Scintigraphie** : le technétium ^{99m} émet des photons γ , qui traversent les tissus et sont détectés par une caméra. Sa demi-vie de 6,0 h suffit pour l'examen tout en limitant l'exposition.
- **Tomographie par émission de positons (TEP)** : le fluor 18, fixé sur une molécule analogue du glucose, émet des positons. Chaque positon s'annihile avec un électron voisin en produisant **deux photons γ** de même énergie (511 keV) émis dans des directions opposées ; leur détection simultanée localise l'émission. Les cellules qui consomment beaucoup de glucose, comme certaines cellules tumorales, apparaissent nettement.

Thérapie. On utilise des rayonnements pour détruire des cellules ciblées :

- **radiothérapie externe** : faisceaux de rayons X ou γ dirigés vers une tumeur (le cobalt 60 a longtemps servi, remplacé aujourd'hui surtout par des accélérateurs) ;
- **curiethérapie** : sources radioactives placées au contact de la tumeur ;
- **radiothérapie interne vectorisée** : l'iode 131, émetteur β^- , se fixe dans la thyroïde, où ses électrons, peu pénétrants, déposent leur énergie localement.

Le choix d'un isotope médical repose sur trois critères : le **type d'émission** (γ ou β^+ pour voir de l'extérieur, β^- ou α pour agir localement), une **demi-vie** courte mais compatible avec la préparation et l'examen, et la **chimie** de l'élément (fixation sur l'organe visé).

8. Effets biologiques et radioprotection

Les rayonnements α , β , γ sont **ionisants** : ils arrachent des électrons aux atomes et aux molécules qu'ils traversent, ce qui peut endommager les cellules, notamment l'ADN. Les effets dépendent de l'énergie reçue, de sa répartition dans le temps et de la nature du rayonnement.

Grandeurs de dose.

- La **dose absorbée** D est l'énergie reçue par unité de masse de matière : $D = E/m$, en **gray** ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$).
- La **dose efficace**, en **sievert (Sv)**, tient compte du type de rayonnement et de la sensibilité des organes exposés : à dose absorbée égale, un rayonnement α est environ 20 fois plus nocif qu'un rayonnement β ou γ (facteur de pondération 20 contre 1).

L'exposition moyenne d'une personne en France est de l'ordre de 4,5 mSv par an, d'origine naturelle (radon, rayonnement cosmique, sols, aliments) et médicale. La réglementation limite l'exposition ajoutée par les activités humaines à 1 mSv par an pour le public (hors exposition médicale et naturelle) et à 20 mSv par an pour les travailleurs exposés.

Principes de radioprotection. Toute exposition doit être **justifiée** (le bénéfice attendu dépasse le risque), **optimisée** (aussi faible que raisonnablement possible) et **limitée** (respect des valeurs réglementaires). En pratique, on se protège d'une source par trois moyens :

- le **temps** : réduire la durée d'exposition ;
- la **distance** : s'éloigner de la source, l'exposition diminuant rapidement avec la distance ;
- l'**écran** : interposer un matériau adapté (plexiglas pour les β , plomb ou béton pour les γ).

Exposition externe et interne. Une source α placée à l'extérieur du corps est peu dangereuse, car la couche superficielle de la peau arrête les particules. Inhalée ou ingérée, elle devient au contraire très dangereuse, car elle dépose toute son énergie dans les tissus voisins : c'est le cas du radon, gaz radioactif issu des sols granitiques, qui s'accumule dans les pièces mal aérées. Les sources γ , très pénétrantes, posent surtout un problème d'exposition externe.

Se protéger d'une source radioactive

temps : réduire la durée

distance : s'éloigner

écran : papier pour α , aluminium ou plexiglas pour β , plomb ou béton pour γ

Repères complémentaires, sans séquence causale

Exemples résolus

Exemple 1 : écrire des équations de désintégration

Écrire les équations de désintégration : a) du phosphore $^{32}_{15}\text{P}$, émetteur β^- ; b) du radium 226 ($^{226}_{88}\text{Ra}$), émetteur α ; c) du carbone 11 ($^{11}_6\text{C}$), émetteur β^+ . Données : Z = 5 (B), 6 (C), 7 (N), 16 (S), 84 (Po), 86 (Rn).

Résolution. a) β^- : on émet $^0_{-1}\text{e}$. Conservation de A : $32 = A + 0$, donc $A = 32$; de Z : $15 = Z - 1$, donc $Z = 16$, soufre. $^{32}_{15}\text{P} \rightarrow ^{32}_{16}\text{S} + ^0_{-1}\text{e}$. b) α : on émet ^4_2He . $A = 226 - 4 = 222$; $Z = 88 - 2 = 86$, radon. $^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow ^{222}_{86}\text{Rn} + ^4_2\text{He}$. c) β^+ : on émet $^0_{+1}\text{e}$. $A = 11$; $Z = 6 - 1 = 5$, bore. $^{11}_6\text{C} \rightarrow ^{11}_5\text{B} + ^0_{+1}\text{e}$.

Exemple 2 : datation d'un charbon de bois

Un charbon de bois découvert dans une grotte a une activité de 0,060 Bq par gramme de carbone. Un bois vivant a une activité de 0,230 Bq par gramme de carbone. $t_{1/2}(^{14}\text{C}) = 5\,730$ ans. Déterminer l'âge du charbon.

Résolution. L'activité par gramme décroît selon $A = A_0 \exp(-\lambda t)$ depuis la mort de l'arbre, avec $\lambda = \ln 2 / t_{1/2}$. $t = (t_{1/2} / \ln 2) \times \ln(A_0/A) = (5\,730 / 0,693) \times \ln(0,230/0,060)$. $0,230/0,060 = 3,83$; $\ln 3,83 = 1,344$; 5

$730/0,693 = 8\,267$ ans. $t = 8\,267 \times 1,344 \approx 1,11 \times 10^4$ ans, soit environ 11 000 ans. Contrôle : $A/A_0 = 0,060/0,230 \approx 0,26$, légèrement supérieur à $1/4 = (1/2)^2$: l'âge est un peu inférieur à $2 t_{1/2} = 11\,460$ ans. Cohérent.

Exemple 3 : préparation d'une dose de fluor 18

Un laboratoire prépare à 7 h 00 une dose de fluor 18 d'activité 800 MBq. L'injection a lieu à 9 h 00. $t_{1/2}({}^{18}\text{F}) = 110$ min. a) Calculer l'activité au moment de l'injection. b) Calculer le nombre de noyaux de fluor 18 injectés. c) Quelle activité reste-t-il 24 h après la préparation ?

Résolution. a) Durée : $t = 120$ min, soit $t/t_{1/2} = 120/110 = 1,09$. $A = 800 \times 2^{-1,09} = 800 \times 0,469 \approx 376$ MBq. b) $\lambda = \ln 2 / t_{1/2} = 0,693 / (110 \times 60 \text{ s}) = 1,05 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. $N = A/\lambda = 3,76 \times 10^8 / 1,05 \times 10^{-4} \approx 3,6 \times 10^{12}$ noyaux. c) 24 h = 1 440 min, soit $1\,440/110 = 13,1$ demi-vies. $A = 800 \times 2^{-13,1} \approx 800 \times 1,15 \times 10^{-4} \approx 0,09$ MBq, soit environ 9×10^4 Bq : l'activité a été divisée par près de 9 000. La demi-vie courte limite la durée de l'exposition, mais impose de produire le fluor 18 près du lieu d'examen.

Méthodes et pièges

- Méthode type : écris l'équation de désintégration en vérifiant séparément la conservation de A et celle de Z, puis identifie l'élément fils par son Z.
- Pour un calcul de décroissance, vérifie d'abord si la durée est un nombre entier de demi-vies : la division par 2^n est alors immédiate.
- Mets t et $t_{1/2}$ dans la même unité ; pour calculer $A = \lambda N$, exprime λ en s^{-1} afin d'obtenir des becquerels.
- Ne confonds pas « la moitié des noyaux restent après $t_{1/2}$ » avec « tous les noyaux ont disparu après $2 t_{1/2}$ » : il en reste un quart.
- L'électron β^- vient de la transformation d'un neutron dans le noyau, pas du cortège électronique.
- Ne confonds pas noyau et atome : les équations nucléaires ne font pas intervenir les électrons du cortège, et les charges ne sont pas notées sur les noyaux.
- L'émission γ ne change pas l'élément : A et Z restent identiques.
- La demi-vie ne dépend ni de la quantité initiale, ni de la température, ni de l'état chimique.
- Pour une datation, l'âge mesuré doit être de l'ordre de quelques demi-vies : vérifie toujours la cohérence avec un calcul en puissances de 2.

Vers le PASS

En PASS, la radioactivité est approfondie en biophysique : énergie de liaison et défaut de masse, filiations radioactives et équilibres entre père et fils (le générateur molybdène 99 / technétium 99m), capture électronique et conversion interne, interactions des rayonnements avec la matière (effet photoélectrique, effet Compton, atténuation exponentielle des photons, couche de demi-atténuation), et dosimétrie. La période effective d'un radiopharmaceutique combine la demi-vie physique et l'élimination biologique, ce qui réutilise directement la loi exponentielle de ce chapitre. Les QCM portent souvent sur l'écriture d'une désintégration, un calcul d'activité en puissances de 2 et le choix d'un écran de protection.

Suite en PASS : Radioactivité, interactions et dosimétrie

Exercices

Niveau 1 : s'entraîner

- Donne le nombre de protons, de neutrons et de nucléons des noyaux $^{14}_6\text{C}$, $^{12}_6\text{C}$, $^{131}_{53}\text{I}$, $^{127}_{53}\text{I}$ et $^{235}_{92}\text{U}$.
Lesquels sont isotopes ? Justifie.
- Complète les équations à l'aide des lois de conservation (Z : He 2, Th 90, Ra 88, Pb 82, Po 84) :
a) $^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow \dots + {}^4_2\text{He}$; b) $^{234}_{90}\text{Th} \rightarrow {}^{234}_{91}\text{Pa} + \dots$; c) $^{210}_{84}\text{Po} \rightarrow \dots + {}^4_2\text{He}$.
- Identifie le type de désintégration : a) $^{40}_{19}\text{K} \rightarrow {}^{40}_{20}\text{Ca} + ?$; b) $^{210}_{84}\text{Po} \rightarrow {}^{206}_{82}\text{Pb} + ?$; c) $^{22}_{11}\text{Na} \rightarrow {}^{22}_{10}\text{Ne} + ?$
- L'iode 131 a une demi-vie de 8,0 jours. a) Quelle fraction d'un échantillon reste-t-il au bout de 24 jours ? b) Au bout de combien de jours l'activité est-elle divisée par 16 ?
- Un échantillon contient $1,0 \times 10^{15}$ noyaux d'iode 131 ($t_{1/2} = 8,0$ jours). a) Calcule λ en s^{-1} . b) Calcule l'activité de l'échantillon.

Niveau 2 : type bac

- Un patient reçoit une gélule d'iode 131 d'activité 3,7 GBq ($t_{1/2} = 8,0$ jours).
a) Écris l'équation de la désintégration β^- de $^{131}_{53}\text{I}$ (Z du xénon : 54). b) Calcule l'activité au bout de 16 jours. c) Au bout de combien de temps l'activité devient-elle inférieure à 37 MBq ? d) Le noyau fils est formé dans un état excité : que se passe-t-il ensuite ?
- Une poutre de bois d'un site néolithique a une activité par gramme de carbone égale à 58 % de celle d'un bois vivant. $t_{1/2}({}^{14}\text{C}) = 5\,730$ ans.
a) Explique pourquoi l'activité d'un être vivant reste constante et pourquoi elle diminue après sa mort. b) Calcule l'âge de la poutre. c) Peut-on dater par le carbone 14 un fossile de 200 000 ans ? Justifie par un calcul.
- Pour une scintigraphie, on injecte 500 MBq de technétium 99m ($t_{1/2} = 6,0$ h, $M \approx 99 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$, émetteur γ pur ; $N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$).
a) Écris l'équation de la désintégration ${}^{99}_{43}\text{Tc} \rightarrow {}^{99}_{43}\text{Tc} + \dots$ b) Calcule l'activité au bout de 24 h. c) Calcule le nombre de noyaux injectés puis leur masse. d) Pourquoi choisit-on un émetteur γ de demi-vie de quelques heures ?
- Radioprotection.
a) Classe les rayonnements α , β^- et γ par pouvoir de pénétration croissant et indique pour chacun un écran adapté. b) Un manipulateur de 70 kg reçoit une dose absorbée de 2,0 mGy sur tout le corps : quelle énergie a-t-il absorbée ? c) Cite les trois moyens pratiques de se protéger d'une source. d) Pourquoi le radon, émetteur α , est-il préoccupant alors que les α sont arrêtés par une feuille de papier ?

Niveau 3 : vers le PASS

- Dans une pièce fermée et non ventilée, l'activité volumique du radon 222 ($t_{1/2} = 3,8$ jours) vaut $300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$; on suppose qu'aucun radon n'est plus apporté.
a) Écris l'équation de la désintégration α du radon 222 (Z = 86 ; Z du polonium : 84). b) Calcule l'activité volumique au bout de 10 jours. c) Calcule le nombre de noyaux de radon par mètre cube au départ.

11. L'uranium 238 se transforme en plomb 206 ($^{206}_{82}\text{Pb}$), stable, par une suite de désintégrations α et β^- . Détermine le nombre de désintégrations α et β^- de cette famille radioactive.

12. Caractère statistique.

a) Quelle est la probabilité qu'un noyau donné de fluor 18 ($t_{1/2} = 110$ min) existe encore au bout de 330 min ? b) Calcule la probabilité qu'il se désintègre pendant une seconde donnée. c) Un échantillon contient 1 000 noyaux. Combien en restera-t-il en moyenne au bout de 220 min ? Pourquoi le résultat réel peut-il différer légèrement ? d) Pourquoi la loi de décroissance est-elle très bien vérifiée pour un échantillon de 10^{12} noyaux ?

13. Un détecteur mesure le nombre de désintégrations par minute d'un échantillon d'un radio-isotope inconnu, bruit de fond de 50 coups par minute déjà retranché :

t (min)	0	10	20	30	40
comptage (min^{-1})	8 000	5 040	3 175	2 000	1 260

a) Montre que la décroissance est exponentielle. b) Détermine la demi-vie. c) Calcule λ en min^{-1} . d) Qu'aurait-on obtenu en oubliant de retrancher le bruit de fond, pour les mesures tardives ?

Corrigés

1. $^{14}_6\text{C}$: 6 protons, 8 neutrons, 14 nucléons. $^{12}_6\text{C}$: 6, 6, 12. $^{131}_{53}\text{I}$: 53, 78, 131. $^{127}_{53}\text{I}$: 53, 74, 127. $^{235}_{92}\text{U}$: 92, 143, 235.

Isotopes : $^{14}_6\text{C}$ et $^{12}_6\text{C}$ (même $Z = 6$), $^{131}_{53}\text{I}$ et $^{127}_{53}\text{I}$ (même $Z = 53$) ; ils ne diffèrent que par leur nombre de neutrons.

2. a) $A = 226 - 4 = 222$, $Z = 88 - 2 = 86$: $^{222}_{86}\text{Rn}$.

b) $A : 234 = 234 + A$, donc $A = 0$; $Z : 90 = 91 + Z$, donc $Z = -1$: $^0_{-1}\text{e}$ (désintégration β^-). c) $A = 210 - 4 = 206$, $Z = 84 - 2 = 82$: $^{206}_{82}\text{Pb}$.

3. a) A conservé, Z augmente de 1 : particule $^0_{-1}\text{e}$, β^- .

b) A diminue de 4, Z de 2 : particule ^4_2He , α . c) A conservé, Z diminue de 1 : particule ^0_1e , β^+ .

4. a) 24 jours = 3 $t_{1/2}$: il reste 1/8, soit 12,5 %.

b) $16 = 2^4$: il faut 4 $t_{1/2}$, soit 32 jours.

5. a) $t_{1/2} = 8,0 \times 24 \times 3 600 = 6,91 \times 10^5$ s ; $\lambda = 0,693 / 6,91 \times 10^5 \approx 1,0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$.

b) $A = \lambda N = 1,0 \times 10^{-6} \times 1,0 \times 10^{15} = 1,0 \times 10^9 \text{ Bq}$.

6. a) $^{131}_{53}\text{I} \rightarrow ^{131}_{54}\text{Xe} + ^0_{-1}\text{e}$ ($A : 131 = 131 + 0$; $Z : 53 = 54 - 1$).

b) 16 jours = 2 $t_{1/2}$: $A = 3,7 / 4 \approx 0,93 \text{ GBq}$. c) $3,7 \text{ GBq} / 37 \text{ MBq} = 100$. $2^{t/t_{1/2}} = 100$, donc $t = t_{1/2} \times \ln 100 / \ln 2 = 8,0 \times 4,605 / 0,693 \approx 53 \text{ jours}$. d) Le xénon excité se désexcite en émettant un photon γ : $^{131}_{54}\text{Xe}^* \rightarrow ^{131}_{54}\text{Xe} + \gamma$.

7. a) Vivant, l'organisme échange sans cesse du carbone avec l'atmosphère, dont la teneur en ^{14}C est constante : les noyaux désintégrés sont remplacés et l'activité par gramme reste constante. Après la mort, plus aucun renouvellement : l'activité décroît selon la loi exponentielle.

b) $t = (t_{1/2} / \ln 2) \times \ln(A_0/A) = 8 267 \times \ln(1/0,58) = 8 267 \times 0,545 \approx 4,5 \times 10^3 \text{ ans}$. c) 200 000 ans représentent $200 000 / 5 730 \approx 35$ demi-vies : $A/A_0 = 2^{-35} \approx 3 \times 10^{-11}$. **Activité indécélable** : la datation au carbone 14

est impossible.

8. a) ${}^{99}_{43}\text{Tc} \rightarrow {}^{99}_{43}\text{Tc} + \gamma$ (A et Z inchangés).

b) $24 \text{ h} = 4 \text{ t}\frac{1}{2}$: $A = 500 / 16 \approx 31 \text{ MBq}$. c) $\lambda = 0,693 / (6,0 \times 3\,600) = 3,21 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$; $N = A/\lambda = 5,00 \times 10^8 / 3,21 \times 10^{-5} \approx 1,6 \times 10^{13} \text{ noyaux}$. $n = N/N_A = 2,59 \times 10^{-11} \text{ mol}$; $m = n \times M \approx 2,6 \times 10^{-9} \text{ g}$, soit **2,6 ng** : une masse infime suffit. d) Les photons γ traversent les tissus et sont détectés à l'extérieur. Une demi-vie de quelques heures laisse le temps de l'examen tout en faisant décroître rapidement l'activité, donc l'exposition.

9. a) Pénétration croissante : $\alpha < \beta^- < \gamma$. Écrans : feuille de papier pour α , quelques millimètres d'aluminium ou de plexiglas pour β^- , plomb ou béton épais pour γ .

b) $E = D \times m = 2,0 \times 10^{-3} \times 70 = 0,14 \text{ J}$. c) **Temps** (réduire la durée), **distance** (s'éloigner), **écran** (s'abriter derrière un matériau adapté). d) Le radon est un gaz : il est **inhale**. Les particules α émises dans les poumons déposent toute leur énergie dans les tissus voisins, sans écran possible ; elles sont en outre environ 20 fois plus nocives que les γ à dose absorbée égale.

10. a) ${}^{222}_{86}\text{Rn} \rightarrow {}^{218}_{84}\text{Po} + {}^4_2\text{He}$.

b) $A = 300 \times 2^{-10/3,8} = 300 \times 2^{-2,63} \approx 300 \times 0,161 \approx 48 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. c) $\lambda = 0,693 / (3,8 \times 86\,400) = 2,11 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$; $N = A/\lambda = 300 / 2,11 \times 10^{-6} \approx 1,4 \times 10^8 \text{ noyaux par m}^3$.

11. Seules les désintégrations α changent A, de 4 à chaque fois : nombre de $\alpha = (238 - 206)/4 = 8$. Ces 8 désintégrations abaissent Z de 16 : $92 - 16 = 76$. Pour arriver à Z = 82, il faut augmenter Z de 6, chaque β^- l'augmentant de 1 : **6 désintégrations β^-** .

Bilan : ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{206}_{82}\text{Pb} + 8 {}^4_2\text{He} + 6 {}^0_{-1}\text{e}$ (A : $238 = 206 + 32$; Z : $92 = 82 + 16 - 6$).

12. a) $330 \text{ min} = 3 \text{ t}\frac{1}{2}$: probabilité de survie $(1/2)^3 = 1/8 = 0,125$.

b) $\lambda = 0,693 / 6\,600 \text{ s} = 1,05 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$: la probabilité de désintégration pendant une seconde vaut $\lambda \times 1 \text{ s} \approx 1,05 \times 10^{-4}$. c) $220 \text{ min} = 2 \text{ t}\frac{1}{2}$: en moyenne **250 noyaux**. Le phénomène est aléatoire : le nombre réel fluctue autour de la moyenne (d'environ une quinzaine de noyaux ici). d) Les fluctuations relatives diminuent quand le nombre de noyaux augmente : pour 10^{12} noyaux, elles sont négligeables et la loi moyenne est suivie avec une excellente précision.

13. a) Rapports successifs sur 10 min : $5\,040/8\,000 = 0,630$; $3\,175/5\,040 = 0,630$; $2\,000/3\,175 = 0,630$; $1\,260/2\,000 = 0,630$. Le facteur est constant sur des intervalles égaux : **décroissance exponentielle**.

b) Le comptage est divisé par 4 en 30 min ($8\,000 \rightarrow 2\,000$), soit 2 demi-vies en 30 min : **$t\frac{1}{2} = 15 \text{ min}$** . c) $\lambda = \ln 2 / t\frac{1}{2} = 0,693 / 15 \approx 4,6 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$ (vérification : $\exp(-0,0462 \times 10) = 0,630$). d) Sans correction, les mesures tardives, faibles, seraient trop grandes de 50 coups par minute : la décroissance apparaîtrait plus lente et la **demi-vie serait surestimée**.