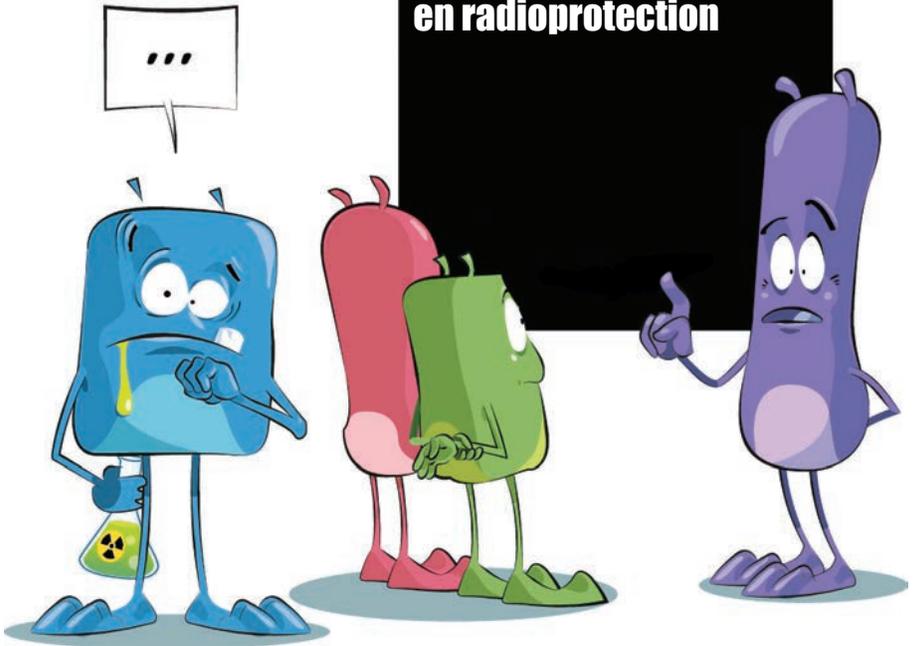


**Marc Ammerich**

# Exercices de radioprotection

**2**

**Niveau initial  
en radioprotection**





# **Exercices de radioprotection**

**Tome 2 : Niveau initial  
en radioprotection**



# **Exercices de radioprotection**

**Tome 2 : Niveau initial  
en radioprotection**

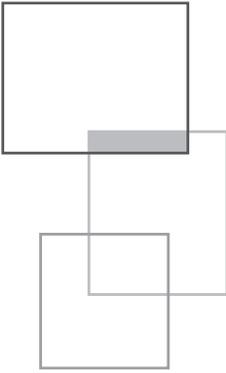
**Marc Ammerich**

*Imprimé en France*

ISBN (papier) : 978-2-7598-2325-3 - ISBN (ebook) : 978-2-7598-2347-5

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1er de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences, 2019

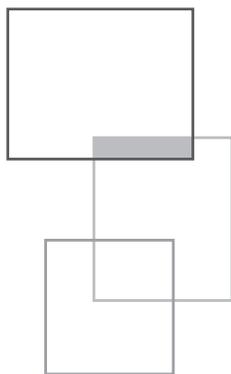


# Table des matières

---

<b>Introduction générale.....</b>	<b>7</b>
<b>QUESTIONS</b>	<b>9</b>
<b>Radioactivité.....</b>	<b>11</b>
<b>Interactions rayonnement matière – exposition externe – grandeurs dosimétriques – détection.....</b>	<b>23</b>
<b>Protection contre l'exposition interne – effets biologiques des rayonnements.....</b>	<b>43</b>
<b>Réglementation.....</b>	<b>61</b>
<b>RÉPONSES</b>	<b>69</b>
<b>Radioactivité.....</b>	<b>71</b>
<b>Interactions rayonnements matière – exposition externe – grandeurs dosimétriques – détection.....</b>	<b>93</b>
<b>Protection contre l'exposition interne – effets biologiques des rayonnements.....</b>	<b>117</b>
<b>Réglementation.....</b>	<b>139</b>





# Introduction générale

---

Depuis de nombreuses années, vous avez eu l'occasion de consulter ou d'acquérir des ouvrages de radioprotection pour tous les niveaux. Certains sont même assez anciens.

J'ai eu en commençant mes études à la fin des années 1970 l'ouvrage *Radioprotection pratique* de messieurs Rodier et Chassagny.

Tout le monde a également en mémoire le fameux *Vade-Mecum* de Raymond Pannetier. Vous connaissez probablement, par le même auteur, le grand tableau des radionucléides.

Plus récemment, la série des ouvrages pour les personnes compétentes de l'INSTN permet à ceux qui vont être désignés pour assurer cette fonction d'avoir une source d'informations importantes.

Il existe ensuite des ouvrages à des niveaux supérieurs, traitant de sujets particuliers, comme la radioactivité d'Yves Chelet ou la dosimétrie et l'exposition externe de Laurent Bourgois et Rodolphe Antoni.

Un prochain ouvrage écrit par Arnaud Boquet va concerner le niveau bac +2 en radioprotection.

Mais il n'existait pas à proprement parler de livrets d'exercices (en dehors de ceux proposés dans les ouvrages) déclinés sur plusieurs niveaux.

J'ai donc, avec les encouragements d'Henri Métivier et de mon éditeur EDP Sciences, rédigé trois livrets d'exercices pour combler cette petite lacune.

Chaque livret sera donc composé de la manière suivante : les énoncés sont regroupés dans la première partie et vous trouverez les corrigés dans la seconde partie.

Mais ne trichez pas ! Regardez les corrigés quand vous aurez terminé l'exercice, sauf si vous êtes totalement bloqué.

Je tiens à remercier ici Arnaud Boquet qui a été un relecteur attentif (et c'est assez rébarbatif de reprendre les exercices et les corrigés) des trois livrets et qui a donné son point de vue éclairé sur les niveaux.

## ***Formation initiale – premier niveau***

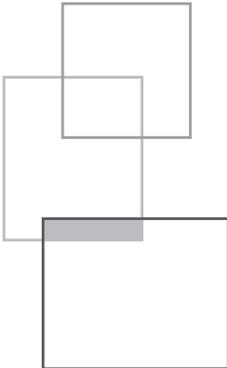
Ce livret est adapté pour les niveaux bac, BTS et licence, licence pro. Un étudiant niveau bac pourra y apprendre les bases, un étudiant niveau BTS pourra se perfectionner sur l'aspect quantitatif des phénomènes et un étudiant niveau licence/licence pro y trouvera ce qu'un radioprotectionniste est censé savoir faire. Et toute personne soucieuse d'améliorer ses compétences en RP y trouvera son compte.

## ***Les commentaires d'Arnaud***

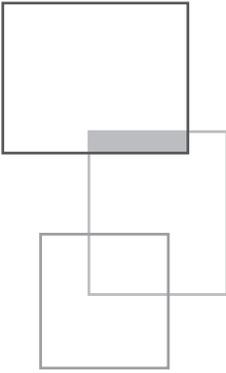
Pour avoir fait les exercices et étant donné le niveau actuel des étudiants de bac à licence, je pense que ces exercices seront adaptés.

J'ai bien aimé le fait de reprendre les mêmes thèmes pour les exercices en fonction des chapitres (radioactivité, protection externe, protection interne). De plus, les exercices prennent des cas concrets fort intéressants et souvent illustrés.

# QUESTIONS







# Radioactivité

---

## Rappels

Processus naturel qui fait que certains atomes instables (déséquilibrés) reviennent dans un état de stabilité.

On désigne cette transformation sous le nom de désintégration.

Ce processus s'accompagne de l'émission de différents rayonnements :  $\alpha$   $\beta^-$   $\beta^+$   $X$   $\gamma$  (particulaires ou électromagnétiques). Dans le cas du rayonnement gamma, le phénomène est désigné par désexcitation. On observe également le processus d'émission d'électrons de conversion interne.

Ces rayonnements sont porteurs d'énergie variant de quelques keV à 9 MeV (en dehors de processus d'accélération).

À la suite des désintégrations et désexcitations, il peut y avoir un réarrangement du cortège électronique. Cela produit l'émission de rayonnements X et d'électrons Auger.

La grandeur ACTIVITÉ a pour unité du système international le becquerel.

1 désintégration par seconde = 1 Bq

La grandeur ACTIVITÉ est également liée à la PÉRIODE. C'est le temps nécessaire pour que l'activité diminue de moitié.

$$A = \frac{\ln 2 \cdot N}{T}$$

A étant l'activité et N le nombre de noyaux radioactifs.

Activité et période étant liées, on constate une décroissance radioactive au cours du temps, pour chaque atome radioactif.

$$A = A_0 \cdot e^{-\left(\frac{\ln 2}{T} \cdot t\right)}$$

L'activité est propre à chaque produit radioactif, fonction de la période. Plus la période est petite, plus la masse mise en jeu pour avoir une activité importante est petite.

La masse d'un produit radioactif  $m$  est donnée par la formule :

$$m = \frac{M \cdot N}{N_A}$$

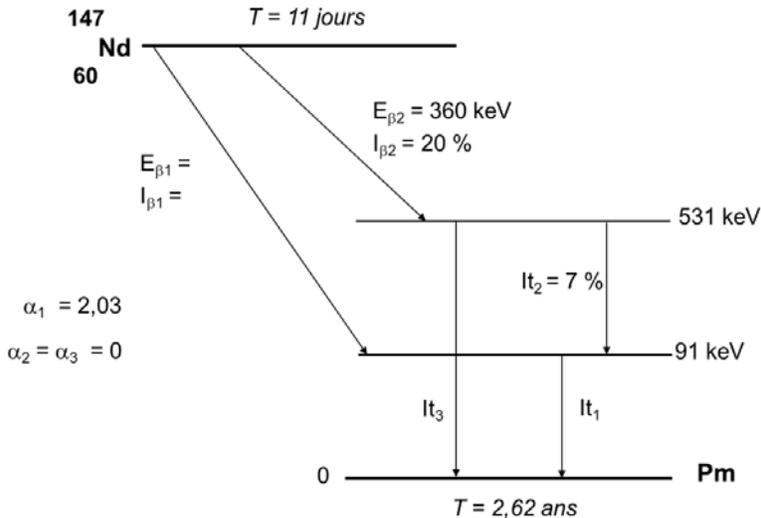
$M$  étant la masse molaire assimilable au nombre de masse et  $N_A$  le nombre d'Avogadro.

Un produit radioactif peut donner aussi par décroissance un autre produit radioactif. C'est le processus de filiation radioactive.

L'activation neutronique fait qu'un produit qui était stable devient radioactif.

### Exercice n° 1

Afin de fabriquer des sources de prométhéum-147 qui sont utilisés dans certains chromatographes, on prend du néodyme-147. On se propose d'étudier le schéma de désintégration simplifié de ce corps radioactif.

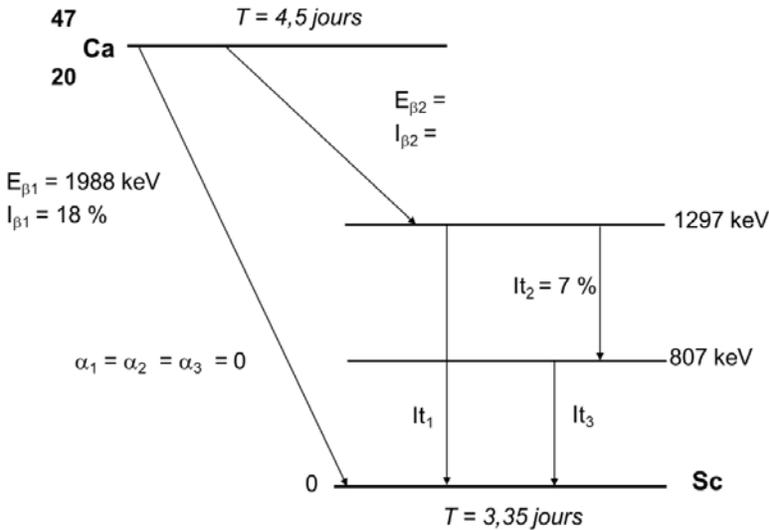


Energie de liaison de l'électron du prométhéum = 45 keV

- Écrire la relation de désintégration du néodyme-147.
- Calculer l'énergie et l'intensité d'émission du rayonnement bêta 1.
- Le niveau excité de 91 keV se désexcite, soit par conversion interne, soit par émission gamma. Sachant que le coefficient de conversion interne a pour valeur :  
 $\alpha_1 = 2,03$ , calculer l'intensité du rayonnement  $\gamma_1$ . Calculer également son énergie.
- L'énergie de liaison des électrons du prométhéum étant de 45 keV, calculer l'énergie des électrons de conversion interne. Donner leur intensité d'émission.
- Calculer les énergies et les intensités d'émission des rayonnements  $\gamma_2$  et  $\gamma_3$ .
- Quelle est la masse nécessaire de néodyme à utiliser pour avoir une activité initiale de 100 MBq ?
- Quelle est la valeur de l'activité en néodyme-147 au bout de 100 jours ?

## Exercice n° 2

Pour évaluer la teneur en calcium-46 dans des ossements, on a procédé à une activation neutronique d'un petit flacon contenant la matière à analyser. On a donc produit du calcium-47 radioactif qui a les caractéristiques suivantes :



- Écrire la relation de désintégration du calcium-47.
- Donner les énergies et les intensités d'émission des rayonnements bêta.

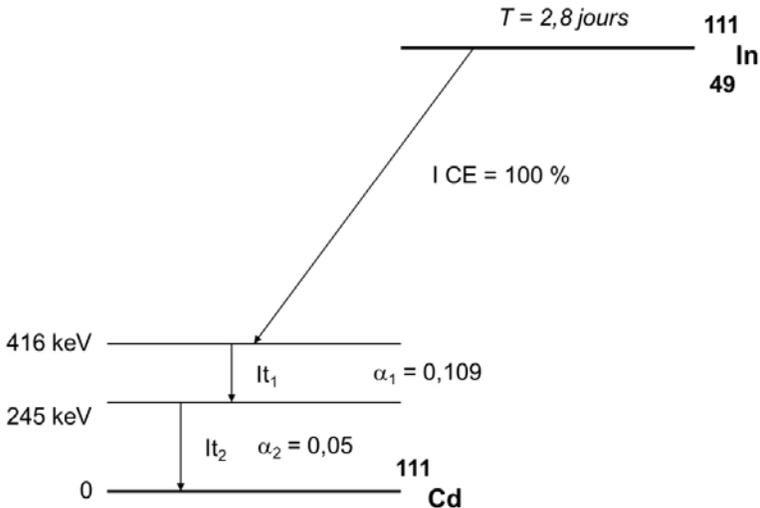
- c) Sachant qu'il n'y a pas de conversion interne, donner les énergies et les intensités d'émission des rayonnements gamma.
- d) À l'instant initial, moment où l'on a sorti le flacon, l'activité en calcium-47 est de 50 mCi. Quel est alors le taux d'émission des rayonnements gamma ?
- e) Quelle est la valeur de l'activité 20 jours après l'instant initial ?
- f) Quel temps doit-on attendre pour que la source de calcium-47 ait une activité de 3,7 MBq ?
- g) Quelle est la masse de calcium-47 formée à l'instant initial ?
- h) Sachant que le calcium-46 représente 0,0033 % de masse totale de calcium, quelle est la masse de calcium qui a été exposée ? On suppose que tout le calcium-46 s'est transformé en calcium-47.
- i) Le scandium-47 étant lui-même radioactif, à quel moment l'activité des deux produits est-elle égale ?

**Exercice n° 3**

On utilise l'indium sous forme d'oxyde pour recouvrir certaines fibres optiques. En effet l'oxyde d'indium est transparent.

Pour vérifier l'homogénéité du dépôt de l'oxyde d'indium sur les fibres, on marque celui-ci avec un traceur radioactif qui se trouve être de l'indium-111.

Ce produit radioactif a les caractéristiques suivantes :



Energie de liaison des électrons du cadmium  $E_l = 27 \text{ keV}$

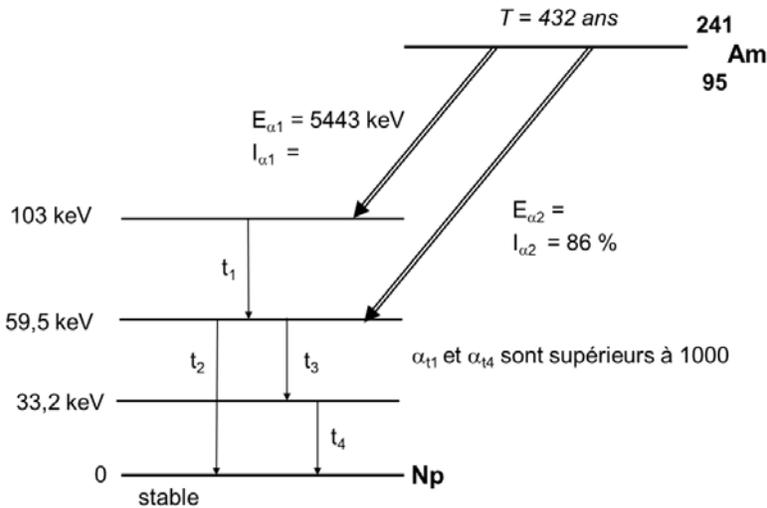
- a) Écrire la relation de désintégration de l'indium-111. Quel phénomène et quels types de rayonnements accompagnent la capture électronique ?
- b) Donner les énergies et les intensités d'émission des rayonnements gamma, ainsi que les énergies et l'intensité d'émission des électrons de conversion interne.
- c) À l'instant initial, on incorpore le traceur qui est sous forme liquide en solution à l'oxyde d'indium. Pour le test d'homogénéité, on va utiliser 222 grammes d'oxyde qui sont déposés sur des fibres optiques. En supposant que le produit radioactif ait une activité de 345 MBq, quelle est la proportion de la masse de produit radioactif par rapport à la masse totale ?
- d) Exprimer l'activité initiale en millicuries.
- e) Quelle est la valeur de l'activité de l'indium-111, 13,45 heures après l'instant initial ?
- f) Même question 14 jours après l'instant initial.
- g) On dépose les 222 grammes d'oxyde d'indium (comprenant le produit radioactif) sur 22,2 mètres de fibres. On coupe ensuite sur cette fibre, pour effectuer une première analyse, 13,45 heures après l'instant initial (mélange des produits), cinq tronçons de 10 cm de longueur. Quelle est l'activité d'un tronçon de 10 cm ?
- h) Quel sera le temps nécessaire pour qu'un tronçon ait une activité inférieure à 10 Bq ?

#### Exercice n° 4

On utilisait l'américium-241 dans les détecteurs incendie. Ils étaient installés dans de nombreux bâtiments, notamment tous les établissements qui recevaient du public. C'était donc un système extrêmement répandu qui ressemblait aux produits ci-dessous :



Voici un schéma de désintégration simplifié de l'américium-241. Ce produit se désintègre par émission alpha.



- Écrire la relation de désintégration de l'américium-241.
- Calculer l'énergie du rayonnement alpha 2 et l'intensité d'émission du rayonnement alpha 1.
- Expliquer pourquoi il n'y a que des électrons de conversion interne pour les transitions t1 et t4.
- L'intensité de la transition t2 est égale à 76 %. Donner les énergies et les intensités d'émission du rayonnement gamma, ainsi que l'énergie et l'intensité d'émission des électrons de conversion interne. On a :  $\alpha_{t2} = 1,12$ .

On donne les énergies de liaisons des électrons du neptunium :

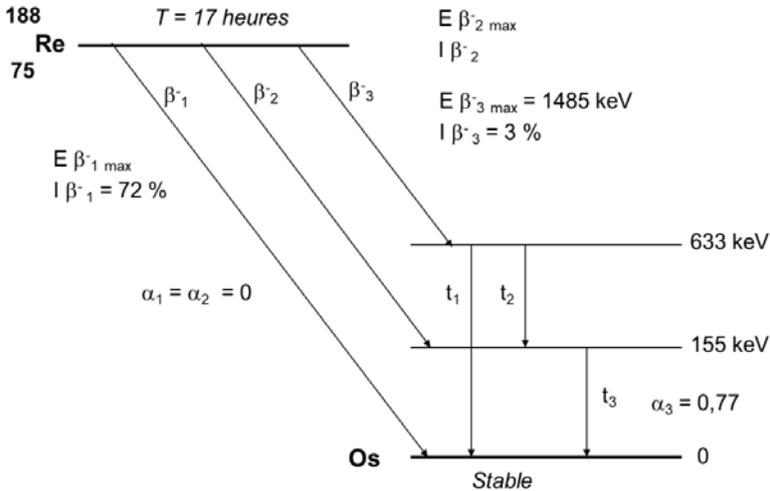
1<sup>re</sup> couche électronique  $E_{L_K} = 118,7$  keV, 2<sup>e</sup> couche électronique  $E_{L_L} = 19,8$  keV.

- L'intensité d'émission du rayonnement gamma 3 est égale à 2,5 %. L'intensité d'émission des électrons de conversion interne pour cette même transition est égale à 21,5 %. Calculer alors  $\alpha_{t3}$ .
- Donner la valeur de l'énergie du rayonnement gamma 3 et des électrons de conversion interne.
- La période de l'américium-241 est égale à 432 ans. Sachant que l'on déposait en moyenne 0,15  $\mu\text{g}$  d'américium sur chaque source incluse dans les détecteurs incendie, quelle activité cela représentait-il ?

Vous donnerez l'activité en Bq et en  $\mu\text{Ci}$ .

## Exercice n° 5

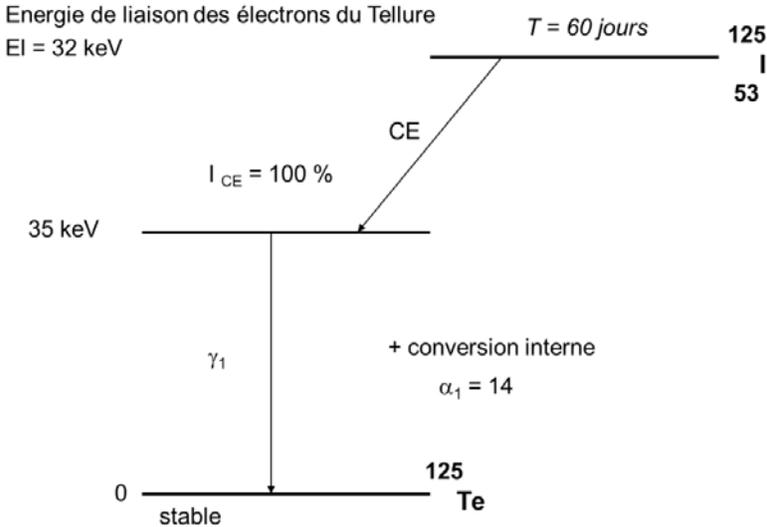
Lors d'une opération de démantèlement d'une boucle d'essai dans un réacteur, une pièce a été activée. Le produit radioactif principal contenu à l'intérieur de la pièce en question est du rhénium-188. Ce produit radioactif a les caractéristiques suivantes :



- Écrire la relation de désintégration du rhénium-188 et donner les énergies et intensités d'émission des rayonnements bêta.
- Donner les énergies et les intensités d'émission des rayonnements gamma.
- Sachant que l'énergie de liaison de l'électron le plus lié de l'osmium est égale à 74 keV, donner l'énergie et l'intensité d'émission des électrons de conversion interne pour la transition 3.
- À l'instant initial, moment où l'on a sorti la pièce de la boucle d'essai, le taux d'émission du rayonnement gamma 1 est de  $3,3 \cdot 10^8 \text{ } \gamma \cdot \text{s}^{-1}$ , quelle est l'activité de cette pièce ?
- Quel est alors le taux d'émission du rayonnement bêta 2 ?
- Quelle est la valeur de l'activité 34 heures après l'instant initial ?
- Même question 4 jours après l'instant initial ?
- Quelle est la masse d'osmium formée au bout de ces quatre jours ?
- L'osmium a une masse volumique de  $22\,900 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Quel volume, la masse d'osmium formée au bout de 4 jours, cela représente-t-il ?

**Exercice n° 6**

On utilise l'iode-125 pour faire du marquage de molécules dans les laboratoires de biologie ou du diagnostic dans les services de médecine nucléaire. C'est donc un produit relativement répandu qui a les caractéristiques suivantes :



- Écrire la relation de désintégration de l'iode-125. Quel phénomène et quels types de rayonnements accompagnent la capture électronique ?
- Donner l'énergie et l'intensité d'émission du rayonnement gamma, ainsi que l'énergie et l'intensité d'émission des électrons de conversion interne.
- Avec une source radioactive liquide (volume 10 ml), on veut pouvoir effectuer deux analyses à des temps différents. La première a lieu 30 jours après l'instant initial de fabrication de la source. La seconde a lieu 90 jours après l'instant initial et on injecte, dans le cas de celle-ci, un volume maximal de 5 ml et une activité maximale de 740 MBq. Quelle sera l'activité initiale de la source liquide ?
- Quel sera le volume injecté lors de la première analyse sachant que l'on veut injecter la même activité ?
- À quelle masse d'iode correspond l'activité initiale de la seringue ?
- Quelle est l'activité résiduelle dans le flacon, 120 jours après l'instant initial ?
- Quelle est la valeur de l'activité volumique en  $\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-3}$  ?
- Calculer alors le taux d'émission du rayonnement  $\gamma$ , 120 jours après l'instant initial.

- b) La définition et à la mise en œuvre des dispositions relatives aux mesures et moyens de prévention, notamment celles concernant la définition des contraintes de dose, l'identification et la délimitation des zones ;
- c) La définition et à la mise en œuvre des dispositions relatives aux conditions d'emploi des travailleurs, notamment celles concernant l'évaluation individuelle du risque lié aux rayonnements ionisants, les mesures de protection individuelle et l'information et la formation à la sécurité des travailleurs ;
- d) La définition et à la mise en œuvre des dispositions relatives à la surveillance de l'exposition individuelle des travailleurs prévue à la section 9 du présent chapitre en liaison avec le médecin du travail ;
- e) La coordination des mesures de prévention relatives à la radioprotection ;
- f) L'élaboration des procédures et moyens pour la décontamination des lieux de travail susceptibles de l'être ;
- g) L'enquête et l'analyse des événements significatifs ;

**3°) Exécute ou supervise :**

- a) Les mesurages ;
- b) Les vérifications de l'efficacité des moyens de prévention à l'exception des vérifications initiales.

**Exercice n° 10**

Le dossier médical individuel est constitué par :

- 1) L'évaluation individuelle de l'exposition aux rayonnements ionisants transmise par l'employeur.
- 2) Les résultats du suivi dosimétrique individuel, ainsi que la dose efficace.
- 3) Le cas échéant, les expositions ayant conduit à un dépassement des valeurs ainsi que la dose reçue au cours de ces expositions.
- 4) Les résultats des examens complémentaires prescrits par le médecin du travail.

En cas d'événement significatif ou de dépassement des valeurs limites, le médecin du travail qui estime que l'exposition d'un travailleur peut constituer un événement significatif, en informe :

L'employeur et le conseiller en radioprotection sous une forme nominative excluant toute notion quantitative de dose.

La visite médicale pour un travailleur classé en catégorie A est renouvelée :

- ② Tous les ans

La visite médicale pour un travailleur classé en catégorie B est en principe renouvelée :

- ③ Tous les deux ans

# Exercices de radioprotection

## ② Niveau initial en radioprotection

**Marc Ammerich**

**C**e livre est adapté pour les étudiants de niveaux bac, BT, BTS et licence, licence pro. Les exercices proposés reprennent les mêmes thèmes en fonction des chapitres (radioactivité, protection externe, protection interne). Seule la réglementation est traitée à part.

Les étudiants ou ceux voulant approfondir leurs connaissances (comme les médecins du travail, les spécialistes en sécurité conventionnelle) trouveront dans les problèmes proposés, ce qu'un radioprotectionniste est sensé savoir-faire.

Ce sont près de trente ans d'enseignement et de conception d'exercices et de problèmes qui me permettent de vous proposer ce livre.

*Écrit par **Marc Ammerich**, ancien inspecteur nucléaire au commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, travaillant dans le domaine de la radioprotection depuis plus de trente ans. Il est également membre du groupe permanent d'experts radioprotection de l'ASN (GPRADE), membre de la SFRP dans la commission PCR, la commission enseignement et le club histoire. Il est co-fondateur du site Internet « radioprotection cirкус » ([www.rpcirkus.org](http://www.rpcirkus.org)). Il est co-auteur de la série des livres de formation à destination des PCR (4 tomes) et auteur de l'ouvrage grand public « la radioactivité sous surveillance et autres notions en radioprotection ».*

ISBN : 978-2-7598-2325-3

