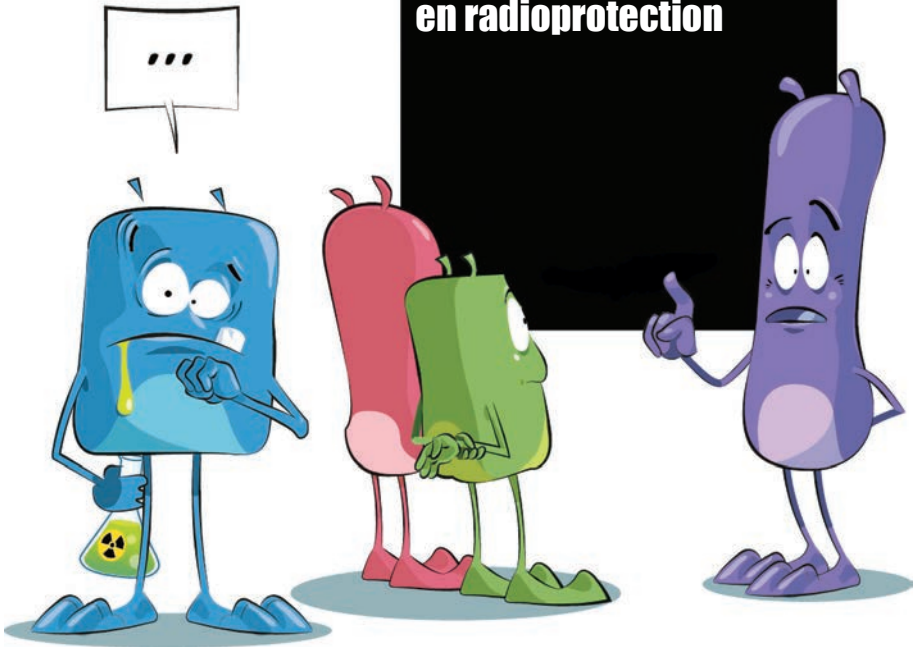


**Marc Ammerich**

# Exercices de radioprotection

**3**

**Niveau supérieur  
en radioprotection**





# **Exercices de radioprotection**

**Tome 3 : Niveau supérieur  
en radioprotection**



# **Exercices de radioprotection**

**Tome 3 : Niveau supérieur  
en radioprotection**

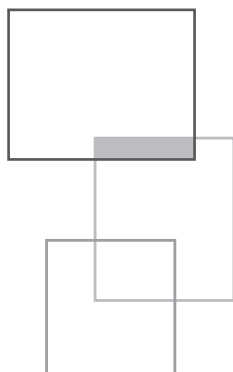
**Marc Ammerich**

*Imprimé en France*

ISBN (papier) : 978-2-7598-2326-0 - ISBN (ebook) : 978-2-7598-2348-2

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



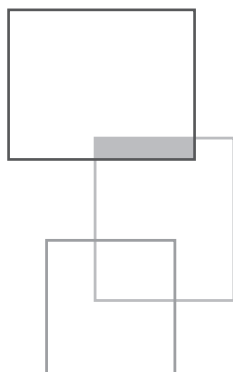
# Table des matières

---

<b>Introduction générale</b> .....	7
<b>ÉNONCÉS</b>	9
<b>Problème n° 1</b> .....	11
<b>Problème n° 2</b> .....	19
<b>Problème n° 3</b> .....	25
<b>Problème n° 4</b> .....	37
<b>Problème n° 5</b> .....	49
<b>Problème n° 6</b> .....	59
<b>Problème n° 7</b> .....	69
<b>Problème n° 8</b> .....	81
<b>Problème n° 9</b> .....	91
<b>RÉPONSES</b>	97
<b>Problème n° 1</b> .....	99
<b>Problème n° 2</b> .....	111
<b>Problème n° 3</b> .....	121

<b>Problème n° 4</b> .....	133
<b>Problème n° 5</b> .....	145
<b>Problème n° 6</b> .....	157
<b>Problème n° 7</b> .....	173
<b>Problème n° 8</b> .....	189
<b>Problème n° 9</b> .....	203
 <b>ANNEXES</b>	 217





# 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 – niveau supérieur***

Ce livret est adapté aux étudiants en master Radioprotection. Beaucoup des sujets abordés sont traités en filière Radioprotection BTS RP, licence pro, master, école d'ingénieur.

C'est un ouvrage pour les spécialistes en radioprotection qui permet de voir tout le programme.

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

Il est vrai qu'il y a un gap entre ce livre et le livre de 1<sup>er</sup> niveau ! Mais si les exercices sont intéressants, ils me semblent un tout petit peu moins accessibles à des BTS d'autres filières (environnement nucléaire) ou des licences pro plus généralistes (comme hygiène et sécurité).

J'ai beaucoup aimé l'ouvrage. Il balaie tous les champs de connaissance que doit avoir un radioprotectionniste, dans les domaines de l'industrie, du transport, de la recherche et médical.

J'ai particulièrement aimé l'exercice sur Fukushima avec l'impact sur l'environnement et sur la chaîne alimentaire.

D'un exercice à l'autre, les thèmes sont variés, et chacun pourra y trouver son compte, ingénieur, technicien, conseiller en RP, médecin du travail, etc.

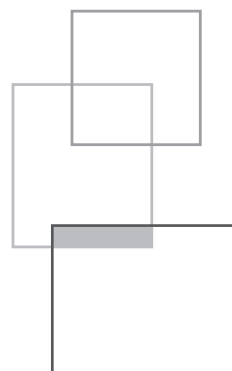
# ÉNONCÉS

Nous allons vous proposer plusieurs problèmes où tous les thèmes de la radioprotection seront abordés.

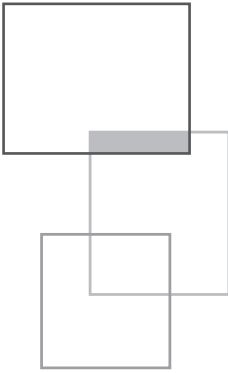
Chaque problème sera découpé en plusieurs parties que nous essayerons de rendre indépendantes.

Nous ne ferons pas de rappels de cours sachant qu'ils seraient vraiment trop volumineux à inclure dans l'ouvrage.

Nous allons mettre en annexe, un certain nombre de courbes dont vous aurez besoin, vous évitant d'aller les chercher par ailleurs.







# Problème n° 1

Entre les réacteurs de puissance d'EDF et l'usine de retraitement ORANO de La Hague, le combustible irradié est transporté par rail et par route. Les assemblages sont enfermés à l'intérieur de châteaux de transport de type B pouvant résister aux chocs, aux fortes températures, etc.

Voici un schéma présentant l'emballage (modèle TN12).

Dans le présent problème on considère du combustible  $UO_2$  classique.

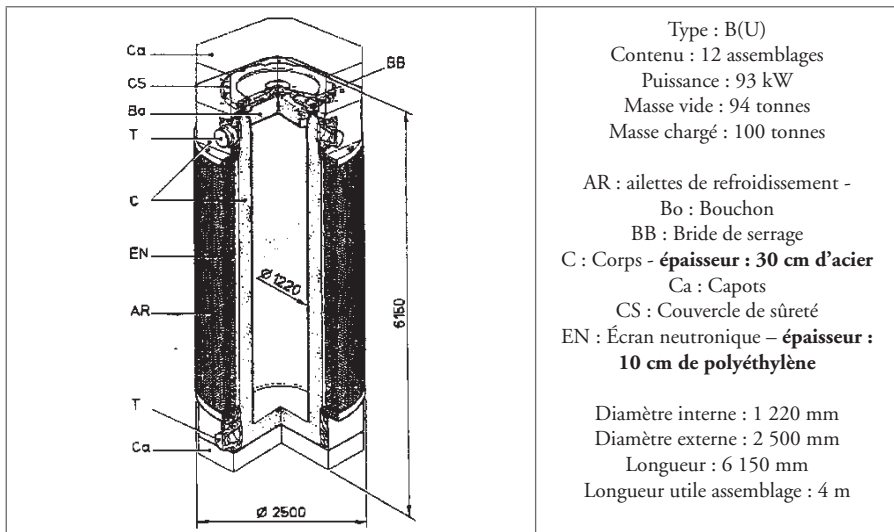


Figure 1 Données sur le château TN12

## I. Équipements - Contrôles

- 1) Quels types de rayonnements sont émis par le combustible et quels sont ceux qui peuvent être détectés à l'extérieur du château de transport ? Justifiez votre réponse.
- 2) Sachant que le débit d'équivalent de dose à 1 mètre de l'emballage est égal à la valeur réglementaire, quelle dose efficace annuelle reçoit un opérateur affecté à cette opération ? Il reste à cette distance 6 minutes pour chaque conteneur, en contrôle deux par semaine pendant 40 semaines dans l'année.
- 3) Sachant qu'il a d'autres activités au sein de l'établissement et que son cumul de dose annuel pour les autres opérations est de 2 mSv, quel classement doit-il avoir ?
- 4) Du point de vue d'un suivi médical, quelle sera la fréquence des examens et des visites ?
- 5) La zone du parking dans laquelle il évolue s'apparente à une zone contrôlée. Quels sont les systèmes de mesures de la dose équivalente et débit d'équivalent de dose nécessaire pour cet opérateur ? Est-ce que ces valeurs devront être comptabilisées dans SISERI ?
- 6) Quels sont les appareils de radioprotection (mesure du débit de dose, mesure de la contamination surfacique) qui vous semblent indispensables pour effectuer ces contrôles ?
- 7) Quelles formations devraient avoir reçues les opérateurs affectés à ce poste de travail ? Quels documents devrait-on leur avoir remis ?
- 8) Quels sont les contrôles de radioprotection qu'il est impératif d'effectuer au départ et à l'arrivée du château ? Indiquer les valeurs réglementaires devant figurer en annexe de la déclaration d'expédition.

## II. Physique nucléaire - Radioactivité

Le combustible est irradié pendant **quatre ans et demi**. Puis il reste **un an** en décroissance dans une piscine de l'installation avant d'être expédié à l'usine de retraitement.

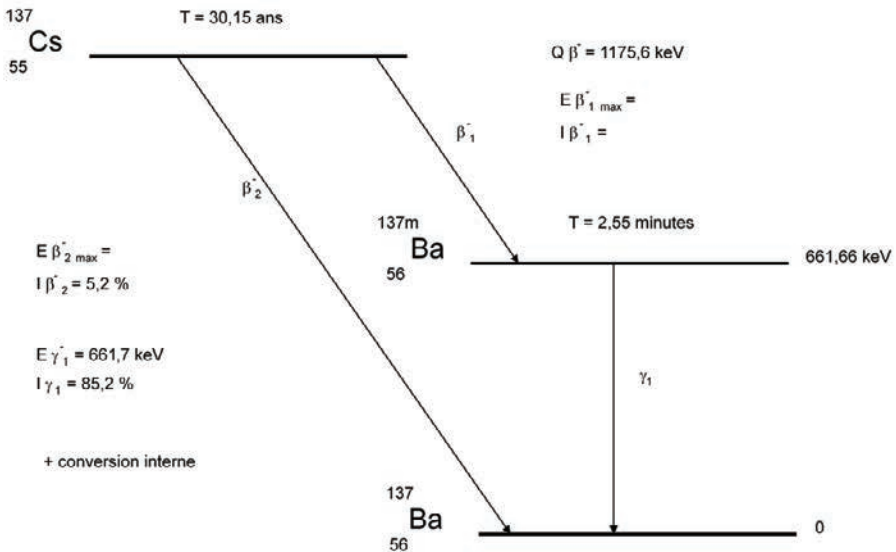
Ce combustible a délivré une énergie de  $33\,500 \text{ MWj} \cdot \tau^{-1}$  (Mégawatt jour par tonne). C'est ce que l'on nomme le taux de combustion moyen au déchargement. On rappelle que l'énergie dégagée par fission est d'environ 200 MeV.

- 1) Calculer le nombre de fission par seconde et par tonne, sachant que ce nombre de fission (que l'on nomme taux de fission) est resté constant.
- 2) Dans un réacteur il y a environ 79,6 tonnes de combustible sous forme d' $\text{UO}_2$  sachant que la densité réelle de l' $\text{UO}_2$  par rapport à la densité théorique est de 96 %.

Le combustible est réparti dans 157 assemblages. Calculer la masse d'uranium-235 qui a disparu au bout des quatre ans et demi. Calculer alors le taux d'enrichissement moyen du combustible, rapport entre la masse perdue et la masse totale. Que pensez-vous du résultat ?

3) Le césium-137 qui a une période  $T$  de 30 ans est l'un des produits de fission les plus courants. Calculer le nombre d'atomes d'uranium par assemblage qui ont subi la fission. Calculer ensuite l'activité du césium-137 dans un assemblage combustible, lors de son déchargement dans la piscine combustible du réacteur sachant que le rendement de fission pour le césium-137 est égal à  $R_f = 6,15 \%$ .

4) Ce radionucléide a le schéma de désintégration suivant :



Compléter l'ensemble de ce schéma. Vous indiquerez quelles sont les énergies et les intensités des rayonnements bêta moins.

5) Les énergies de liaison des électrons du baryum ont les valeurs suivantes :

- énergie de liaison de la couche K : 35,44 keV ;
- énergie de liaison de la couche L : 5,99 keV.

Vous calculerez le coefficient alpha pour la conversion interne.

Vous donnerez l'énergie des électrons de conversion interne (sur la couche K) et l'intensité d'émission.

Vous donnerez les énergies et les intensités d'émission des rayonnements produits lors du réarrangement du cortège électronique (on tiendra compte des interactions sur la couche K).

On donne le rendement de fluorescence :  $R_K = 0,863$ .

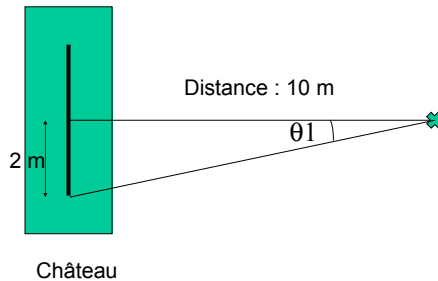
6) Le tableau en annexe 1 (Répartition des produits de fission dans un assemblage combustible après un an de refroidissement) donne l'activité des produits de fission pour un combustible en **Becquerel par tonne**. La valeur calculée à la 3<sup>e</sup> question confirme-t-elle la valeur du tableau, sachant que la masse d'un assemblage peut être calculée avec les données du tableau n° 1.

### III. Exposition externe – Interaction rayonnements matière – Protection contre la contamination externe

La répartition des produits de fission pour le combustible mentionné précédemment est la suivante après un an de refroidissement dans la piscine combustible du réacteur.

1) Calculer le débit de kerma dans l'air, dû à certains produits de fission d'un élément combustible qui se trouverait à l'intérieur du château de transport, par rapport au schéma ci-dessous.

Le schéma est le suivant :



On rappelle :

C : Corps - **épaisseur : 30 cm d'acier**

EN : Écran neutronique - **épaisseur : 10 cm de polyéthylène**

On donne la formule pour le débit de fluence :

$$\dot{\phi} = \frac{A \cdot I}{l \cdot 2\pi \cdot d} \cdot B \cdot F(\theta_1, \mu x)$$

Où : A représente l'activité en becquerels pour le nucléide considéré

I représente l'intensité du rayonnement en %

l représente la distance source - point de mesure

d représente **la longueur de la source**

B correspond à la valeur de Build up dans l'acier

$F(\theta_1, \mu x)$  représente la fonction d'atténuation en fonction de l'angle  $\theta_1$  et de  $\mu x$



Dans l'annexe 2, vous trouverez les coefficients d'absorption massique en énergie pour différents matériaux. Pour l'acier vous prendrez les valeurs du fer.

Dans l'annexe 3, vous trouverez les coefficients d'atténuation massique pour différents matériaux. Pour l'acier, vous prendrez les valeurs du fer.

Dans l'annexe 4, vous trouverez les valeurs du facteur d'augmentation en dose (Build up) pour différentes énergies et différents matériaux.

Dans l'annexe 5, vous trouverez les courbes donnant la fonction d'atténuation en fonction de l'angle  $\theta_1$  et de  $\mu x$ .

En ce qui concerne les masses volumiques, on donne :

$$\rho_{\text{acier}} = 7,8 \text{ g.cm}^{-3}$$

$$\rho_{\text{polyéthylène}} = 1,2 \text{ g.cm}^{-3}$$

On négligera le rayonnement de freinage.

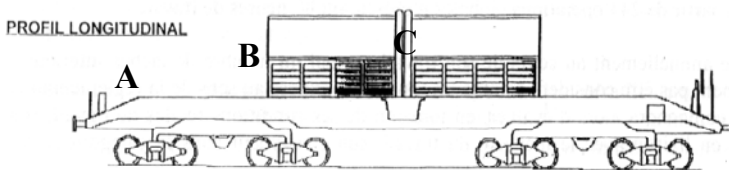
On négligera l'atténuation et le facteur d'augmentation en dose dans l'air.

On négligera le facteur d'augmentation en dose dans le polyéthylène.

Pour éviter des calculs trop longs, on retiendra :

Radionucléide	Énergie $\gamma$ keV	Intensité $\gamma$ %	Activité
yttrium-91	555	95	$2,2 \cdot 10^{14}$ Bq
rhodium-106	511	20	$10^{16}$ Bq
niobium-95	765	100	$10^{15}$ Bq
césium-137	662	85	$2 \cdot 10^{15}$ Bq

2) Lors d'une vérification sur un wagon, les mesures suivantes ont été relevées.



**Bout du wagon (pause personnel) à 4 mètres du Château**

**Point A : Débit de dose gamma  $2,4 \mu\text{Sv/h}$   
Débit de dose neutron  $2,3 \mu\text{Sv/h}$**

**Milieu de la porte à 50 cm du château**

**Point B : Débit de dose gamma  $4,5 \mu\text{Sv/h}$   
Débit de dose neutron  $2 \mu\text{Sv/h}$**

**Milieu du wagon à 1 m de celui-ci**

**Point C : Débit de dose gamma  $19 \mu\text{Sv/h}$**

Le conteneur se trouve à l'intérieur du capot de protection en tôle. Il y a une porte (point B) pour rentrer à l'intérieur de ce capot. Le point C se trouvant à 1 m du wagon se trouve à pratiquement 2 m du château. Le point A qui est en bout de wagon sert souvent aux agents comme point de repos.

Compte tenu des valeurs d'exposition trouvées dans la question précédente, les valeurs des points A, B, C vous apparaissent-elles possibles ? Justifier votre réponse.

3) D'après la liste des radionucléides donnée dans l'annexe 1, d'où provient l'émission des neutrons ?

4) Les châteaux de transport à la sortie de la piscine de chargement sont contaminés notamment avec du cobalt-60. Expliquer la présence de cet élément en tant que contaminant. Par quelle méthode peut-on évaluer l'activité des taches de contamination ? Quels sont les paramètres qui influencent le résultat ?

5) Le cobalt-60 qui a une période T de 5,27 ans a les caractéristiques suivantes :

Radionucléide	Énergie $\beta$ maximum keV	Intensité $\beta$ %	Énergie $\gamma$ keV	Intensité $\gamma$ %
$^{60}\text{Co}$	$E_{\beta\text{max}} = 318$	$I_{\beta\text{max}} = 100$	$E_{\gamma 1} = 1\ 173$ $E_{\gamma 2} = 1\ 332$	$I_{\gamma 1} = 100$ $I_{\gamma 2} = 100$

Quelle est la principale interaction des rayonnements électromagnétiques avec la matière. À l'aide des tableaux en annexe donnant le coefficient d'absorption massique en énergie dans les tissus mous et le coefficient d'atténuation massique dans les tissus mous, calculer l'énergie maximum et l'énergie moyenne des électrons mis en mouvement après interaction dans les tissus mous (on néglige le rayonnement de freinage).

On rappelle que la portée des électrons est donnée par la formule :

$$P(\text{cm}) = \frac{0,412 \cdot E^n}{\rho(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})}$$

Et avec  $n = 1,265 - 0,0954 \ln E$

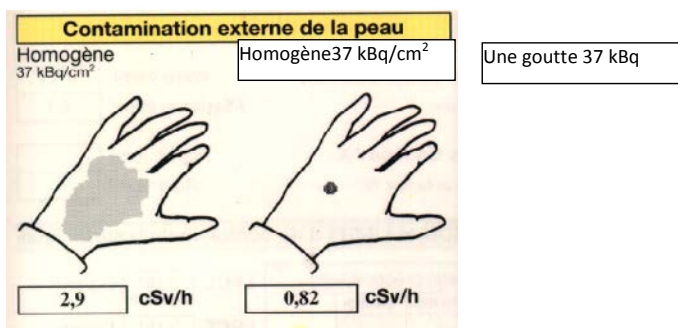
E est en MeV dans les formules.

6) Calculer l'épaisseur massique à partir de laquelle il y a un équilibre des particules chargées.

On donne  $\rho_{\text{tissus mous}} = 1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .

## IV. Protection contre la contamination et l'exposition interne

1) On a mesuré sur le wagon une tache de contamination ayant une activité surfacique de  $2\,000\text{ Bq}\cdot\text{cm}^{-2}$  sur une surface de  $10\text{ cm}^2$ . On suppose qu'un agent SNCF chargé de l'entretien des wagons se contamine pour la première fois une main de manière homogène en enlevant la totalité de l'activité de la tache. Compte tenu des schémas suivants, au bout de combien de temps l'agent dépassera-t-il les limites d'exposition des extrémités pour un travailleur ?



Existe-t-il dans la réglementation **en vigueur actuellement** une limite d'exposition pour le public au niveau des extrémités ?

2) Lors de la pause déjeuner (prise au bout du wagon au point A), l'agent en mangeant un sandwich ingère la totalité de l'activité à l'intérieur de son organisme (il aurait dû se laver les mains). Le cobalt-60 a une forme physico-chimique telle qu'il passe la barrière digestive avec un facteur  $f_1$  égal à 0,1. Calculer l'activité incorporée dans l'organisme.

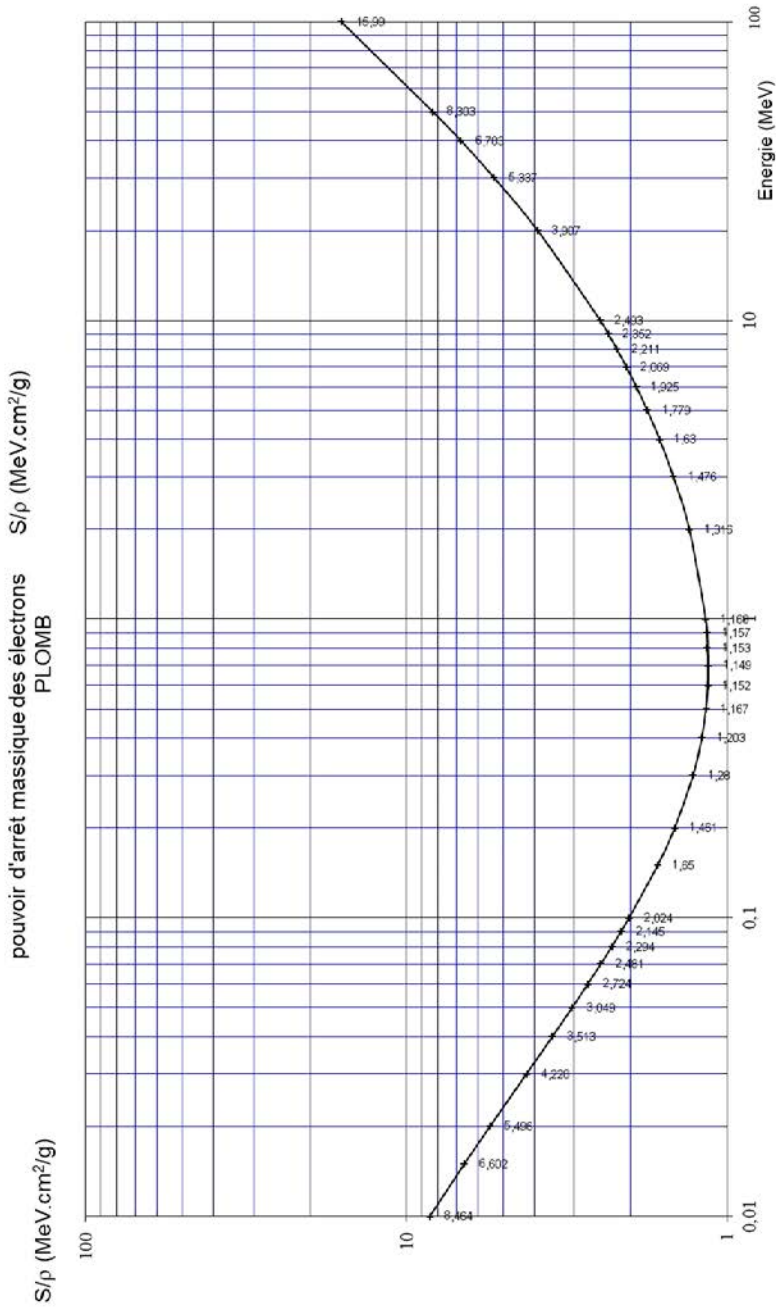
3) Si la dose par unité d'incorporation (DPUI) est égale à  $3,4\cdot 10^{-9}\text{ Sv}\cdot\text{Bq}^{-1}$ , quelle sera la dose efficace liée à cet incident ?

Quelle fraction de la limite d'exposition publique cela représente-t-il ?

4) Le seuil de détection par anthroporadiométrie corps entier étant de 20 Bq, calculer à quel moment il est inutile de procéder à cet examen pour l'agent contaminé. On donne la valeur de 6 jours pour la période effective pour la forme physico-chimique du cobalt radioactif en cause.

5) À l'aide d'une échelle de comptage équipée d'une sonde gamma, on mesure la contamination. En tant qu'analyste vous disposez de vingt minutes pour trouver l'incertitude minimum correspondant au taux de comptage brut et au taux de comptage du bruit de fond. Le taux de comptage brut étant de  $400\text{ imp}\cdot\text{s}^{-1}$  et le bruit de fond étant de  $50\text{ imp}\cdot\text{s}^{-1}$ , calculer les temps optimum pour chaque mesure.

- 6) Calculer ensuite le taux de comptage net, l'incertitude absolue et l'incertitude relative associés au taux de comptage net. On prendra un intervalle de confiance de 99,7 %.
- 7) Compte tenu du temps de mesure réservé au bruit de fond, calculer la limite de détection, toujours avec le même intervalle de confiance.



# Exercices de radioprotection

## 3 Niveau supérieur en radioprotection

**Marc Ammerich**

**C**e livre est adapté aux étudiants en master radioprotection, école d'ingénieur mais aussi aux étudiants spécialisés en BTS ou licence radioprotection. Son but est d'apprendre à savoir maîtriser les différents cas proposés. Les problèmes abordent tous les thèmes allant de la radioactivité en passant par la dosimétrie physique, les expositions externes et internes, les effets biologiques, la détection, jusqu'aux aspects réglementaires.

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 : 978-2-7598-2326-0

