

Alain Fausso

Dosimétrie externe

APPLICATIONS À LA RADIOPROTECTION



Editions
TEC
& **DOC**

Lavoisier

Dosimétrie externe

Applications à la radioprotection

Alain Faussot



11, rue Lavoisier
75008 Paris

Chez le même éditeur

Toxicologie nucléaire environnementale et humaine

M.-T. Ménager, J. Garnier-Laplace, M. Goyffon, 2009

Manuel pratique de radioprotection

D.-J. Gambini, R. Granier, 3^e édition, 2007

Risques industriels – Complexité, incertitude et décision : une approche interdisciplinaire

Collection EDF R&D

L. Magne, D. Vasseur, coord., 2006

Cadre méthodologique pour évaluer l'impact des rayonnements ionisants sur les espèces non humaines

Collection « Lignes directrices » de l'IRSN

IRSN, 2005

Le risque nucléaire

H. de Choudens, 2001

Radioprotection dans les installations nucléaires

H. de Choudens, G. Troesch, 1997



© LAVOISIER, 2011

ISBN : 978-2-7430-1395-0

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (20 rue des Grands Augustins – 75006 Paris), est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, d'autre part les analyses et courtes citations justifiées dans le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (Loi du 1^{er} juillet 1992 – art. L. 122-4 et L. 122-5 et Code pénal art. 425).

Remerciements

Je dédie ce livre à ma femme.

Je remercie tout particulièrement mes amis Fabienne et Pierre pour m'avoir toujours soutenu et encouragé à écrire cet ouvrage.

Je remercie Rodolphe Antoni qui m'a incité à publier.

J'exprime ma reconnaissance à Jean-Pierre Simoën et Michel Buxerolle pour m'avoir fait découvrir et maîtriser la dosimétrie.

Abréviations et sigles

D.I. : directement ionisant

DSE : dose seuil de l'érythème

ICRP : Commission internationale de protection radiologique

ICRU : Commission internationale des unités radiologiques

ISO : Organisation nationale de standardisation

KERMA: Kinetic Energy Released in MATter

NDI : non directement ionisant

PLC : particules lourdes chargées

TEL : transfert linéique d'énergie

RTL : détecteur thermoluminescent

RPL : détecteur photoluminescent

Sommaire

Remerciements	III
Abréviations et sigles	V
Introduction.	1

Partie 1

Dosimétrie fondamentale

Chapitre 1

Grandeurs et unités fondamentales

1. Grandeurs et unités radiométriques	7
1.1. Champ de rayonnement	7
1.2. Grandeurs radiométriques relatives au comptage des particules	9
1.2.1. Nombre de particules	9
1.2.2. Flux de particules	9
1.2.3. Fluence et débit de fluence de particules	9
1.3. Grandeurs radiométriques relatives à l'énergie	10
1.3.1. Énergie radiante (ou rayonnante)	10
1.3.2. Flux d'énergie radiante (ou rayonnante)	10
1.3.3. Fluence et débit de fluence énergétique.	11
1.4. Distribution en énergie	11
1.4.1. Fluence différentielle en énergie	11
1.4.2. Distribution spectrale	12
1.4.3. Expression de la fluence énergétique en fonction de la fluence différentielle	12
1.4.4. Applications à la distribution en énergie.	13
1.5. Rappels sur l'angle solide	15
1.6. Calcul de la fluence d'une source ponctuelle isotrope	16
2. Grandeurs et unités dosimétriques.	17
2.1. Énergie communiquée.	17
2.2. Énergie spécifique communiquée.	18

2.3. Dose et débit de dose absorbée	18
2.4. KERMA et débit de KERMA	19
2.5. Exposition et débit d'exposition	19

Chapitre 2

Les rayonnements électroniques

1. Interactions avec la matière	21
1.1. Généralités	21
1.2. Pouvoir d'arrêt	23
1.3. Parcours des électrons monoénergétiques	25
1.4. Cas des spectres β	29
1.5. Énergie moyenne absorbée par paires d'ions formés.	30
2. Détermination de la dose absorbée	31
2.1. Relation fluence-dose absorbée	31
2.2. Changement de milieu	34

Chapitre 3

Les rayonnements électromagnétiques

1. Interactions avec la matière	41
1.1. Introduction	41
1.2. Lois générales concernant le faisceau de photons	41
1.2.1. Section efficace d'interaction	41
1.2.2. Coefficient d'interaction	43
1.2.3. Loi d'atténuation	43
1.3. Effet Compton	44
1.3.1. Étude du diagramme de Compton	46
1.3.2. Énergie moyenne des électrons compton et des photons diffusés	47
1.3.3. Détermination des coefficients Compton	49
1.4. Effet photoélectrique	51
1.5. Effet de création de paires ou matérialisation	53
2. Coefficients de transfert massique en énergie	54
3. Définitions des coefficients d'interaction	54
3.1. Coefficient linéique d'interaction	54
3.2. Coefficient d'atténuation massique	55
3.3. Coefficient de transfert massique en énergie	56
3.4. Coefficient d'absorption massique en énergie	57
4. Relation fluence-KERMA	61
5. Équilibre électronique ; énergie transférée et énergie absorbée localement	64
5.1. La trajectoire des électrons secondaires est négligeable	64
5.2. La trajectoire des électrons secondaires n'est pas négligeable	64
6. Relation fluence – dose absorbée	67
7. Énergie moyenne des particules secondaires chargées	68
8. Évolution du KERMA et de la dose absorbée en profondeur	74

8.1. Changement de milieu	74
8.2. Étude de la variation de la fluence d'électrons secondaires et de la dose absorbée dans l'intervalle $x_0 \rightarrow R_{M2}$	75
8.3. Étude des variations des grandeurs dosimétriques dose absorbée et KERMA ainsi que des fluences de photons et d'électrons secondaires dans le milieu M2 à partir de la profondeur $x = R_{M2}$	76

Chapitre 4

Les neutrons

1. Interactions avec la matière	83
1.1. La collision élastique	84
1.2. La collision ou diffusion inélastique	85
1.3. Les captures	85
2. Transferts d'énergie au milieu	86
3. KERMA de première collision	86
3.1. Préambule	86
3.2. Calcul du KERMA de première collision	87
3.3. Application à l'interaction des neutrons avec les tissus	89
4. KERMA de multicollision	90

Chapitre 5

Théorie de la mesure de la dose absorbée

1. Relation exposition-dose absorbée : cas des photons dans l'air	97
2. Relation exposition-dose absorbée dans un autre milieu	99
3. Notion de paroi équivalente	100
4. Théorie de la cavité – Relation de Bragg-Gray	100
4.1. Problème fondamental	100
4.2. Relation de Bragg-Gray. Cas de la cavité étroite	101
4.3. Cas de la cavité large	103
4.4. Cas de la cavité intermédiaire	105
5. Mesures de l'exposition et de la dose absorbée	106
5.1. Chambre à paroi d'air	106
5.2. Chambre à paroi équivalente à l'air	107
5.3. Chambre équivalent-tissus – Chambre à paroi équivalent-tissus	107
6. Étude du type de cavité en fonction de l'énergie des photons	111

Partie 2

Dosimétrie de radioprotection

Chapitre 6

Action biologique des rayonnements ionisants

1. Structure et fonction biologique de la cellule	119
2. Dommages de l'ADN et réparations	119

3. Effets déterministes. Mort cellulaire.	120
4. Effets stochastiques	120

Chapitre 7

Les grandeurs de protection

1. Publication n° 26 (1977) de l'ICRP	121
2. Publication n° 60 (1990) de l'ICRP	123
2.1. Dose équivalente dans un tissu ou un organe	124
2.2. Dose efficace relative à l'ensemble du corps	125

Chapitre 8

Évaluation du risque dans le cas des effets stochastiques

1. Limites recommandées.	127
1.1. Exposition professionnelle	127
1.2. Exposition du public.	128
2. Tableau récapitulatif des limites d'exposition	128

Chapitre 9

Détermination par le calcul des grandeurs de protection

1. Géométries d'irradiation	129
2. Coefficients de conversion.	130
3. Détermination de la dose absorbée moyenne à l'organe ou au tissu	130
4. Détermination des grandeurs de protection : dose équivalente à l'organe H_T et dose efficace E	131
5. Étude de la valeur des coefficients de conversion en fonction des géométries d'irradiation	132

Partie 3

Métrologie des rayonnements ionisants

Préambule	136
---------------------	-----

Chapitre 10

Les grandeurs opérationnelles

Introduction	137
1. Caractéristiques de ces grandeurs.	137
2. La surveillance individuelle	138
3. La surveillance de zone ou d'ambiance	138
4. Conventions de simplification des champs de rayonnements.	139
5. Comparaison entre les grandeurs opérationnelles et les grandeurs de protection	139

Chapitre 11

Généralités sur les opérations d'étalonnage

1. Obligations réglementaires	141
2. Contrôle du matériel de radioprotection	142
2.1. Contrôle de bon fonctionnement.	142
2.2. Contrôle périodique avec une source radioactive.	142
2.3. Contrôle périodique de l'étalonnage.	142
2.4. Périodicité des contrôles	142
3. Organisation de la chaîne d'étalonnage	142
3.1. Définition de l'étalonnage	142
3.2. Grandeurs physiques générales	143
3.3. Rayonnements de référence	144
3.4. Opération de raccordement	145
3.5. Facteurs de conversion	146
3.6. La chaîne de métrologie	147

Chapitre 12

Procédures d'étalonnage

1. Positionnement du dosimètre	149
2. Réponse en énergie	150
3. Réponse angulaire	151
4. Réponse en débit	151
5. Expression des incertitudes	152

Chapitre 13

Matériel utilisé en radioprotection

1. Généralités sur les mesures dosimétriques.	155
2. Détecteurs à ionisation	157
2.1. Ionisation des gaz	157
2.1.1. Influence du champ électrique.	157
2.1.2. Recombinaisons	159
2.2. Les dosimètres basés sur l'ionisation des gaz	159
2.2.1. Les chambres d'ionisation	159
2.2.2. Les compteurs proportionnels	161
2.2.3. Les compteurs de Geiger-Müller.	162
2.3. L'ionisation des solides : les détecteurs à semi-conducteur	162
3. Le phénomène d'excitation des atomes et des molécules	163
3.1. Principe	163
3.2. Les scintillateurs	165
4. Détecteurs basés sur la luminescence	166
4.1. Les détecteurs thermoluminescents (RTL)	166
4.2. Les détecteurs photoluminescents (RPL)	169
5. Détecteurs basés sur l'élévation de température.	169
6. Détecteurs basés sur des réactions chimiques	170

7. Détecteurs basés sur les défauts dans les solides et détecteurs solides de traces	171
8. Détecteurs à activation	171
9. La spectrométrie des neutrons en dosimétrie de radioprotection.	173
9.1. Par construction du dosimètre	174
9.2. Le système à modérateurs variables et les sphères de Bonner.	176
Conclusion	179
Bibliographie.	181
Index	183

Introduction

Pour progresser dans la connaissance d'un phénomène il est nécessaire d'avoir un point de vue quantitatif sur les grandeurs mises en jeu.

La radiobiologie

À la suite des découvertes des rayons X (Roentgen, 1895), de la radioactivité naturelle (Becquerel, 1896) et des travaux de Pierre et Marie Curie sur le radium (1898), on constate rapidement que les radiations provoquent trois types d'effets biologiques :

- la mort cellulaire : la première radiodermite fut signalée quatre mois après la découverte des rayons X ;
- un effet cancérogène : le premier radio-cancer fut identifié en 1902 ;
- un effet mutagène : démontré par Muller en 1927.

Il apparut donc nécessaire de quantifier les effets biologiques des rayonnements par l'utilisation d'une grandeur physique représentative.

L'étymologie du terme « dose »

Les physiciens radiologues souhaitaient contrôler et estimer la quantité de radiations émises par les générateurs de rayons X. Cette opération était délicate car les premiers tubes à rayons X étaient instables.

Leur appartenance au milieu médical les a conduit à proposer le concept de « dose » : **expression d'une quantité de produit pharmaceutique administré et produisant un certain effet.**

Jusqu'en 1928, les doses délivrées en radiothérapie étaient déterminées par référence à un signe clinique bien précis, l'érythème cutané, véritable « coup de soleil » provoqué par les rayons X.

L'unité biologique adoptée s'appelait « dose seuil de l'érythème » ou DSE et se définissant comme étant la dose unique de rayons X nécessaire pour provoquer une rougeur de la peau. Elle était définie par référence à certaines caractéristiques techniques de l'irradiation :

- dimensions du champ de rayons X ;

courant et tension du générateur X ;
 distance source-malade ;
 moment d'apparition de la rougeur.

Le grand nombre de facteurs biologiques qui interviennent dans une réaction de la peau ne permettait pas une évaluation précise de la dose qui pouvait présenter des écarts de 200 à 300 % d'un observateur à l'autre.

Cette « grandeur » présentait les défauts suivants :

absence de sensibilité due à la faible variation des réactions biologiques ;
 absence de fidélité en rapport avec l'ampleur des variations individuelles de radiosensibilité ;
 imprécision de la mesure liée à la difficulté d'évaluation quantitative ;
 non additivité ;
 effet différé et impossibilité d'une dosimétrie immédiate.

Or, choisir une grandeur et définir son unité implique que cette grandeur corresponde à un concept simple, ne prêtant à aucune ambiguïté, et qu'il existe une instrumentation appropriée capable de comparer la quantité étudiée à un étalon.

C'est pour ces raisons qu'à l'occasion du premier congrès international de radiologie qui s'est tenu en 1925 la communauté internationale décida de créer une commission ayant pour objectifs d'élaborer des recommandations concernant :

l'organisation des systèmes de grandeurs et d'unités en dosimétrie et en radioactivité ;
 les méthodes appropriées pour mesurer ces grandeurs ;
 les données physiques nécessaires.

Cette commission fut dénommée ICRU : **International Commission on Radiological Units and Measurements.**

En 1928, l'ICRU proposa une unité en relation avec l'effet provoqué par le rayonnement X dans un certain volume d'air. En effet, on savait mesurer le courant d'ionisation produit par le rayonnement dans une chambre d'ionisation. Cette unité fut dénommée « roentgen ». Cette quantité détermine le champ de rayonnement au point de mesure mais ne prend pas en compte l'action du rayonnement dans le milieu matériel.

C'est en 1953 qu'un concept fondamental fut proposé par l'ICRU : afin de pouvoir relier quantitativement le champ de rayonnement à son action sur le milieu matériel qu'il irradie, l'ICRU recommande que la dose soit exprimée en termes d'énergie absorbée par masse unitaire de milieu irradié.

La dose absorbée est la quantité d'énergie cédée à la matière par des radiations ionisantes et par masse unitaire de matériau irradié au point d'intérêt fixé.

C'est la définition moderne utilisée actuellement.

Il est nécessaire de préciser ce vocable de **radiations¹ ionisantes** : elles sont généralement définies comme pouvant ioniser la matière, soit directement, ce

1. Radiation : émission de particules ou d'un rayonnement monochromatique.

sont les **rayonnements**² directement ionisants (**particules**³ chargées : électron, alpha, proton), soit par l'action de particules secondaires mises en mouvement au cours d'interactions de particules neutres avec la matière, ce sont les rayonnements indirectement ionisants (rayonnements électromagnétiques, neutron).

Dans le cas des rayonnements indirectement ionisants, il faut pouvoir quantifier l'énergie cinétique emportée par la particule chargée mise en mouvement. La grandeur dosimétrique utile pour cette caractérisation se nomme KERMA (Kinetic Energy Released in MAtter).

Le processus d'ionisation se produit lorsqu'une quantité d'énergie suffisante, **de la forme correcte**, est transmise à un milieu afin de libérer les électrons des atomes de ce milieu. L'expression « **forme correcte** » est essentielle pour expliquer pourquoi les rayonnements ionisants sont étudiés séparément des autres modes de dépôt d'énergie.

En effet, l'énergie déposée par les rayonnements ionisants est concentrée sur un nombre réduit d'atomes et est suffisante pour rompre les liaisons énergétiques entre les atomes et les molécules. La présence de ces altérations dans un milieu biologique peut avoir des conséquences très importantes.

La première partie de l'ouvrage est consacrée à la dosimétrie fondamentale qui permet d'obtenir, par une approche rigoureuse, les formalismes mathématiques qui détermineront les **grandeurs dose absorbée et KERMA** pour les différents types de rayonnements concernés.

Pour pouvoir déterminer l'énergie déposée localement dans un milieu matériel il faut connaître les caractéristiques du champ de rayonnement et étudier les interactions des rayonnements composant ce champ avec le milieu.

Le problème fondamental est de décrire et de quantifier le champ de rayonnement, région de l'espace où ces rayonnements sont présents. La description de ce champ nécessite de recenser la nature et l'énergie de toutes les particules composantes ainsi que leurs distributions énergétiques et angulaires.

La détermination des caractéristiques physiques des champs de rayonnements fait l'objet de la **radiométrie**.

Il est possible, ensuite, d'étudier les interactions des composants de ces champs avec la matière. C'est à partir de l'étude des **interactions rayonnements matière** que l'on pourra définir un certain nombre de coefficients caractéristiques qui permettront de calculer la dose absorbée. Cette étude sera nécessairement conduite pour chaque type de rayonnement pris individuellement.

Pour accéder à ces grandeurs, il est nécessaire de s'appuyer sur un ensemble cohérent d'unités et de grandeurs caractéristiques nommées grandeurs radiométriques et grandeurs dosimétriques et qui ont fait l'objet d'une publication intitulée *Radiation quantities and units*, ICRU rapport n° 33 (1980).

2. Rayonnement : mode de propagation de l'énergie sous forme d'ondes ou de particules.

3. Particule : constituant fondamental de la matière (électron) ou de la lumière (photon).

Dans cette première partie, nous traiterons également de la théorie de la mesure de la dose absorbée, à partir de la relation de Bragg Gray, qui permet l'utilisation, dans le domaine de la mesure des rayonnements ionisants, de la chambre d'ionisation.

La radioprotection des individus est basée sur un système de **limites de doses**, objet d'un consensus international, et qui impose, par la loi, l'application et le respect de ces limites.

Les conséquences radiobiologiques de l'exposition de la matière vivante aux rayonnements ionisants ont conduit, en 1928, le Congrès international de radiologie médicale à créer une commission spécialisée dont la mission était d'élaborer un système de protection vis-à-vis du risque induit par les générateurs de rayons X.

La **Commission internationale de protection radiologique (ICRP)** a poursuivi sa mission et a élaboré de nombreuses recommandations en s'appuyant sur les travaux les plus récents sur les effets biologiques des rayonnements ionisants.

En 1977, l'ICRP, dans sa publication n° 26, recommande de baser les limites de dose, pour les effets stochastiques (c'est-à-dire aléatoires), sur une grandeur de protection appelée « **équivalent de dose, de symbole H_E** ».

En 1990, l'ICRP, dans sa publication n° 60, propose de nouvelles recommandations en s'appuyant sur les résultats les plus récents obtenus en biologie. La nouvelle grandeur de protection estimant le risque biologique relatif à l'ensemble du corps s'appelle « **dose efficace, de symbole E** ».

Les grandeurs de protection utilisées en dosimétrie de radioprotection sont destinées à estimer un risque biologique. Ce sont des grandeurs particulières qui ne sont pas des grandeurs physiques et par conséquent non mesurables.

La deuxième partie de l'ouvrage est consacrée à l'étude des effets biologiques des rayonnements ionisants sur la matière vivante, et à la détermination d'un ensemble de grandeurs spécifiques à la radioprotection qui vont exprimer, non pas un dépôt d'énergie, mais un risque ou une probabilité de développer une tumeur radio-induite.

Les calculs sont développés à partir de la grandeur fondamentale « **dose absorbée** » mais prennent en compte d'autres paramètres (type de rayonnement, énergie du rayonnement, organe radiosensible).

Ces grandeurs de protection ne sont pas mesurables mais, le système de protection radiologique étant basé sur des limites de dose et imposé par la législation, il faut néanmoins pouvoir « mesurer ou estimer » ces grandeurs.

L'ICRU a, par conséquent, conçu un ensemble de grandeurs expérimentales, appelées **grandeurs opérationnelles**, qui sont mesurables et qui sont des estimateurs des grandeurs de protection.

La troisième partie de l'ouvrage étudie cet ensemble de grandeurs opérationnelles qui sont essentiellement destinées à l'étalonnage du matériel de radioprotection de manière à pouvoir disposer d'un ensemble opérationnel étalonné selon ces grandeurs.

Les obligations réglementaires et les procédures d'étalonnage seront étudiées et un dernier chapitre sera consacré à une étude des différentes familles de détecteurs utilisés pour la métrologie des rayonnements ionisants.

La dosimétrie, composante essentielle de la radioprotection, permet de déterminer par le calcul et la mesure, la grandeur dose absorbée, à savoir les quantités d'énergie déposées dans la matière par les rayonnements ionisants. Elle étudie également les effets de l'irradiation sur les milieux vivants et les conséquences biologiques qui en découlent.

Cet ouvrage de référence rassemble toutes les informations nécessaires pour comprendre et maîtriser la dosimétrie externe et la métrologie des rayonnements ionisants, depuis les effets des rayonnements jusqu'à l'étalonnage du matériel de radioprotection.

La première partie est consacrée à la dosimétrie physique et permet d'obtenir, par une approche rigoureuse, les formalismes mathématiques donnant la dose absorbée pour les différents champs de rayonnements ionisants étudiés. La deuxième partie étudie les effets biologiques des rayonnements ionisants sur la matière vivante et la détermination d'un ensemble de concepts et de grandeurs spécifiques à la radioprotection exprimant « le risque » de développer un cancer radio-induit. La métrologie des rayonnements ionisants fait l'objet de la troisième partie à travers l'étude normative des méthodes utilisées pour étalonner le matériel de radioprotection.

Des exercices d'application accompagnés de leur corrigé sont proposés à la fin de chaque chapitre.

Dosimétrie externe est destiné aux étudiants en BTS de radioprotection, Licence technique, Masters 1 et 2, écoles d'ingénieurs mais aussi aux professionnels travaillant dans les domaines de la recherche ou de l'industrie nucléaire désireux d'actualiser ou de compléter leurs connaissances ainsi qu'aux physiciens d'hôpitaux et d'une façon générale aux professionnels de santé concernés par l'utilisation des rayonnements ionisants (oncologie, radiothérapie, services de médecine nucléaire).

Diplômé du Conservatoire national des Arts et Métiers, spécialisé en physique, **Alain Faussot** est ingénieur. Il a effectué l'essentiel de sa carrière au sein du Commissariat à l'énergie atomique (CEA) et en particulier au CEA de Cadarache où il a été responsable du laboratoire de métrologie des rayonnements ionisants puis chef de la section de radioprotection des installations du Service de protection contre les rayonnements ionisants (SPR) du Centre d'études nucléaires. Il fut également président de la Commission permanente d'agrément de la chaîne rayonnements ionisants du COFRAC (Comité français d'accréditation). Il a enseigné la dosimétrie dans le cadre du BTS de Radioprotection piloté par l'antenne de Cadarache de l'Institut national des sciences et techniques nucléaires (INSTN) et du master de Radioprotection à l'université Joseph Fourier de Grenoble.



978-2-7430-1395-0