



**PROfil**

# Physique nucléaire et radioprotection

à l'usage de l'environnement  
nucléaire

**Arnaud Boquet**



# **Physique nucléaire et radioprotection**

**à l'usage de l'environnement  
nucléaire**



# Physique nucléaire et radioprotection

à l'usage de l'environnement  
nucléaire

Arnaud BOQUET

*Imprimé en France*

ISBN (papier) : 978-2-7598-2313-0 – ISBN (ebook) : 978-2-7598-2314-7

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.

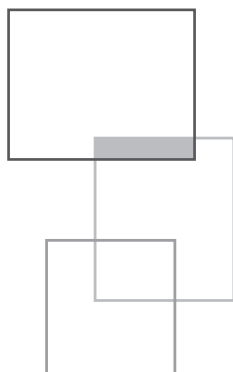
© EDP Sciences, 2019

*À Marie, à mes parents, pour leur soutien inconditionnel.*

*Je dédie ce livre à tous les titulaires du BTS CRIATP, qui, depuis 1962, ont contribué à amener la radioprotection française à son niveau d'exigence et de qualité actuels.*







# Table des matières

---

<b>Remerciements</b>	19
<b>Introduction</b>	21
<b>Chapitre 1 • Les constituants de la matière</b>	23
I – Structure simplifiée de l'atome	23
II – Nomenclature – Isotopes	28
III – Le tableau périodique	30
IV – Calcul des masses molaires	32
Exercices du chapitre 1	34
Corrigés des exercices du chapitre 1	35
<b>Chapitre 2 • Historique de la radioactivité</b>	37
I – Les découvertes sur les phénomènes liés à la radioactivité	37
1 – La découverte des rayons X	37
2 – La découverte de la radioactivité	38
3 – La découverte du polonium et du radium	39
4 – La découverte de la loi de la décroissance radioactive	40
5 – La découverte de la radioactivité artificielle	40
6 – La découverte de la fission nucléaire	42
7 – La découverte de la fusion nucléaire	42
II – Les découvertes en physique atomique et en physique nucléaire	43
1 – Les différents modèles de l'atome	43

2 – L'expérience de Chadwick	44
3 – La théorie de Fermi	45
4 – La découverte des éléments artificiels	47
5 – Un pas vers la physique des particules et la physique moderne	47
III – Le développement du nucléaire	52
1 – L'essor du nucléaire au début du XX <sup>e</sup> siècle	52
2 – La création de l'ICRU et de la CIPR	52
3 – La seconde guerre mondiale	53
4 – Le développement de l'armement nucléaire	55
5 – Le développement des centrales nucléaires	56
<b>Chapitre 3 • Énergie au cœur de la matière</b>	61
I – Les unités usuelles de la physique nucléaire	61
1 – Unité de masse	61
2 – Unité d'énergie	62
3 – Relation masse-énergie	63
II – Origine de l'énergie nucléaire	64
1 – Défaut de masse	64
2 – Énergie de liaison	65
3 – Excès de masse	67
4 – Courbe d'Aston	68
III – Bilan énergétique d'une réaction nucléaire	69
1 – Réaction nucléaire et lois de conservation	69
2 – Énergie dans une réaction nucléaire	70
3 – Énergie de séparation du dernier neutron	71
Exercices du chapitre 3	71
Corrigé des exercices du chapitre 3	73
<b>Chapitre 4 • La radioactivité</b>	77
I – Activité d'une source radioactive	77
1 – Définitions	77
2 – Forme mathématique	78
II – Étude systématique des transitions radioactives	80
1 – Définitions	80
2 – La désintégration $\alpha$	82
3 – La désintégration $\beta^-$	85
4 – La désintégration $\beta^+$	87
5 – La désintégration par capture électronique $\varepsilon$	90
6 – La désexcitation $\gamma$	93

7 – La désexcitation par conversion interne <i>e.c.</i>	94
8 – Phénomènes secondaires accompagnant les transitions nucléaires	95
III – Stabilité et instabilité dans le noyau	98
1 – Le noyau stable	98
2 – Le noyau instable	99
Exercices du chapitre 4	103
Corrigés des exercices du chapitre 4	107
<b>Chapitre 5 • Décroissance radioactive et comptage nucléaire</b>	117
I – Loi de décroissance radioactive	117
II – Les filiations radioactives	120
1 – Problème à 2 corps	120
2 – Équilibres radioactifs	123
3 – Problème à $n$ corps	125
III – Activation neutronique	126
1 – Définition de l'activation neutronique	126
2 – Mise en équation de l'activation neutronique	126
3 – Période d'activation suivie d'une période de décroissance	129
IV – Caractère aléatoire d'un comptage radioactif	129
Exercices du chapitre 5	134
Corrigé des exercices du chapitre 5	138
<b>Chapitre 6 • Interaction rayonnement-matière</b>	145
I – Généralités sur l'interaction rayonnement-matière	145
II – Interaction des ondes électromagnétiques avec la matière	147
1 – La diffusion Thompson	147
2 – La diffusion Rayleigh	148
3 – L'effet photoélectrique	148
4 – L'effet Compton	149
5 – Production de paires ou matérialisation	150
6 – L'effet photonucléaire	151
7 – Importance relative des processus d'interaction photoniques	152
III – Interaction des particules avec la matière	152
1 – Cas des particules chargées lourdes	153
2 – Cas des particules chargées légères	156
3 – Cas des neutrons	159
4 – Effet Tcherenkov	161
5 – Fabrication d'une source neutronique	161
Exercices du chapitre 6	162
Corrigé des exercices du chapitre 6	164

<b>Chapitre 7 • Introduction à la dosimétrie externe</b>	169
I – Généralités sur la dosimétrie	169
1 – Effets des rayonnements ionisants	169
2 – Définition de la dosimétrie	170
II – Grandeurs physiques	171
1 – Quantités intégrales	171
2 – Quantités dérivées	172
3 – Quantités globales	172
III – Grandeurs dosimétriques	173
1 – Dose absorbée et débit de dose absorbée	173
2 – KERMA et débit de KERMA	174
3 – Exposition et débit d'exposition	175
IV – Calculs de débits de dose absorbée pour les particules chargées légères	176
1 – Comportement des particules chargées légères dans la matière	176
2 – Relation entre dose et fluence pour des électrons monoénergétiques	178
3 – Relation entre dose et fluence pour des électrons polyénergétiques (spectre $\beta$ )	181
V – Calculs de débits de dose absorbée pour les photons	183
1 – Comportement des photons dans la matière	183
2 – Relation entre fluence et KERMA pour des photons	186
3 – Relation entre KERMA et dose absorbée pour des photons	187
4 – Énergie moyenne des électrons secondaires	191
5 – Méthode de calcul de la dose absorbée pour des photons	192
6 – Calcul du débit de KERMA	192
7 – Calcul du débit de dose	192
VI – Évaluation du KERMA pour les neutrons	193
1 – Comportement des neutrons dans la matière	193
2 – KERMA de première collision	193
3 – KERMA de multi-collisions	194
VII – Grandeurs de protections et grandeurs opérationnelles	195
1 – Les grandeurs de protection	195
2 – Grandeurs opérationnelles	198
Exercices du chapitre 7	201
Corrigé des exercices du chapitre 7	204

<b>Chapitre 8 • Détection</b>	213
I – Les différents types de détecteurs	213
1 – Modélisation d'un détecteur	213
2 – Caractérisation des détecteurs	215
3 – Les familles de détecteur	217
II – La spectrométrie gamma	221
1 – Objectif de la spectrométrie	221
2 – Chaîne de comptage en spectrométrie	222
3 – Forme générale des spectres de photons	222
4 – Exemple d'un spectre réel	225
III – Les limites de détection	226
1 – Principe	226
2 – Le seuil de décision	227
3 – La limite de détection	228
4 – Activité minimum détectable	229
Exercices du chapitre 8	229
Corrigé des exercices du chapitre 8	231
<b>Chapitre 9 • Moyens de protection contre l'exposition externe</b>	237
I – Moyens de protection contre l'exposition externe aux rayonnements	238
1 – La distance	238
2 – L'activité	239
3 – Le temps	240
4 – Les écrans	240
II – Protection contre les électrons	241
1 – Arrêt des électrons dans la matière	241
2 – Cas d'une exposition externe avec contact	242
III – Protection contre les neutrons	243
1 – Origine des neutrons dans une installation	243
2 – Moyens mis en œuvre pour la protection contre les neutrons	244
IV – Calcul d'écrans pour la protection contre les rayonnements électromagnétiques	245
1 – Sources ponctuelles canalisées	245
2 – Sources ponctuelles monoénergétiques non canalisées	248
V – Surveillance de l'exposition externe dans les installations nucléaires	251
1 – Appareils de mesure	251
2 – Surveillance de l'installation	252
3 – Surveillance des travailleurs	253
Exercices du chapitre 9	254
Corrigé des exercices du chapitre 9	257

<b>Chapitre 10 • Moyens de protection contre l'exposition interne</b>	263
I – Physique des aérosols et contamination	263
1 – Définition	263
2 – Diamètre des aérosols	264
3 – Voies de pénétration dans l'organisme	265
4 – Durée de séjour dans l'organisme	266
5 – Modèle du tractus respiratoire	267
6 – Modèle du tractus digestif	269
II – Grandeurs liées à l'évaluation de l'exposition interne	270
1 – Activité surfacique	270
2 – Activité volumique	270
3 – La dose par unité d'incorporation (DPUI)	271
4 – La limite dérivée de concentration dans l'air (LDCA)	272
5 – Le repère de concentration dans l'air (RCA)	273
6 – La dose efficace engagée	274
III – Mesures et évaluation de la contamination	274
1 – Contamination surfacique	274
2 – Contamination volumique	277
IV – Techniques de confinement et d'élimination de la contamination dans les installations nucléaires	281
1 – La défense en profondeur	281
2 – Ventilation et filtration dans une installation	283
3 – Surveillance continue de l'installation	289
V – Protection des travailleurs	289
1 – Protections collectives	289
2 – Protections individuelles	291
3 – Contrôles et décontamination	293
VI – Décontamination des surfaces	295
1 – Définition	295
2 – Approche de la décontamination	295
3 – Procédés de décontamination	296
Exercices du chapitre 10	298
Corrigé des exercices du chapitre 10	304
<b>Chapitre 11 • Les effets biologiques des rayonnements ionisants</b>	315
I – Les effets moléculaires et cellulaires	315
1 – Effets moléculaires	316
2 – Effets cellulaires	317
II – Les effets déterministes	319

1 – Causes des effets déterministes	319
2 – Propriétés des effets déterministes	320
3 – Seuils des effets déterministes	321
III – Les effets stochastiques	323
1 – Propriétés des effets stochastiques	323
2 – Effets cancérogènes	324
3 – Effets génétiques et héréditaires	327
Conclusion	328
<b>Chapitre 12 • Bases de la réglementation</b>	329
I – Grands principes de réglementation en radioprotection	329
1 – But de la radioprotection	329
2 – Les instances internationales et nationales	330
3 – Classement des installations	332
II – Réglementation en radioprotection dans le droit français	334
1 – Réglementation des travailleurs	335
2 – Zonage radioprotection	343
3 – Principe ALARA	348
4 – Rôles du conseiller en radioprotection	350
5 – Régimes administratifs	354
6 – Contrôles réglementaires des sources et des appareils	356
7 – Situations anormales de travail	359
8 – Situations d'urgence radiologique	361
9 – Expositions médicales	363
III – Réglementation transport	364
1 – Cadre réglementaire	364
2 – Transport par route	366
3 – Classe 7	367
4 – Emballage et étiquetage des colis	369
5 – Contrôles et limites réglementaires	372
Exercices du chapitre 12	372
Corrigé des exercices du chapitre 12	373
<b>Chapitre 13 • La fission nucléaire et la fusion nucléaire</b>	377
I – Principe de la fission nucléaire	377
1 – Principe	377
2 – La fission spontanée	378
3 – La fission induite	378
4 – La réaction de fission en chaîne	380

II – Principe de la fusion nucléaire	381
1 – Principe	381
2 – Énergétique de la fusion nucléaire	381
Exercices du chapitre 13	383
Corrigé des exercices du chapitre 13	385
<b>Chapitre 14 • Les différentes formes de l'énergie</b>	389
I – Définition de l'énergie	389
1 – Quelques exemples	389
2 – Définition	390
II – Les différentes formes de l'énergie	390
1 – Les sources d'énergie	390
2 – Les différentes formes de l'énergie	390
III – Principe de conservation de l'énergie	391
1 – Un exemple de mécanique	391
2 – Énoncé du théorème	392
IV – Inventaire des énergies mises en jeu dans une centrale nucléaire	393
1 – Transformation de l'énergie dans une centrale nucléaire	393
2 – Puissance d'une centrale nucléaire	393
Exercices du chapitre 14	394
Corrigé des exercices du chapitre 14	395
<b>Chapitre 15 • Fonctionnement d'une centrale nucléaire et gestion des déchets nucléaires</b>	397
I – Présentation du parc électronucléaire français	397
1 – Développement du parc français	397
2 – Le parc électronucléaire français en exploitation	398
II – Principe de fonctionnement d'un REP	399
1 – Rôle des trois circuits	399
2 – Rôles de l'eau dans les circuits	402
3 – Pilotage et domaine de fonctionnement d'un réacteur	402
III – La fission industrielle	404
1 – Le combustible utilisé pour la réaction en chaîne	404
2 – Criticité du réacteur	406
IV – Origine du risque radiologique et gestion des déchets nucléaires	407
1 – Origine du risque radiologique	407
2 – Gestion des déchets radioactifs	410
3 – Contrôles environnementaux et entretien de l'installation	413
Exercices du chapitre 15	414
Corrigé des exercices du chapitre 15	417



<b>Chapitre 16 • Les évaluations dosimétriques prévisionnelles</b>	421
I – Principe des EDP	423
1 – Classement des activités	423
2 – Grandeurs utilisées pour les EDP	424
II – Mise en œuvre d'une EDP	425
1 – Description de l'intervention	425
2 – EDPI	425
3 – EDPO	426
Conclusion	427
Exercice du chapitre 16	428
Corrigé de l'exercice du chapitre 16	429
<b>Chapitre 17 • Diverses utilisations des rayonnements ionisants et des radionucléides</b>	431
I – Le domaine médical	431
1 – La radiologie	431
2 – La médecine nucléaire	433
3 – Le traitement des cancers	435
II – La stérilisation par irradiation	436
III – Les dispositifs de contrôle	438
1 – Les contrôleurs de bagages	438
2 – L'appareil gammagraphique	439
3 – Les jauges de niveau et d'épaisseur	439
4 – Les détecteurs de plomb par fluorescence X	440
5 – Radiotraceurs dans l'industrie	441
IV – Propulsion de véhicules	441
V – Les applications en sciences fondamentales	443
1 – Archéologie et objets d'art	443
2 – Géologie et hydrologie	445
3 – Aérospatial	445
4 – Recherche fondamentale	446
VI – Utilisations obsolètes des rayonnements ionisants et des radionucléides	447
<b>Chapitre 18 • La radioactivité naturelle et artificielle</b>	449
I – La radioactivité naturelle	449
1 – Exposition externe	449
2 – Exposition interne	453
II – La radioactivité artificielle	456
1 – Exposition liée à l'activité militaire et industrielle	456
2 – Exposition liée à l'activité médicale	457

III – L'exposition annuelle mondiale et française	459
Exercices du chapitre 18	462
Corrigé des exercices du chapitre 18	464
<b>Chapitre 19 • Quelques accidents liés à l'utilisation du nucléaire</b>	469
I – Classements des accidents	469
1 – Échelle INES	469
2 – Événements significatifs	471
II – Accidents liés à l'industrie	471
1 – Liste des accidents classés dans le monde et en France	471
2 – L'accident de Tchernobyl	473
3 – L'accident de Tokai-Mura	474
4 – L'accident de Fukushima	475
III – Accidents liés au médical	476
1 – L'accident de Goiânia	476
2 – Les surirradiations d'Épinal et Toulouse	477
<b>Conclusion</b>	479
<b>Annexes</b>	481
Annexe 1 : Alphabet grec utilisé en sciences	481
Annexe 2 : Dimensions et unités des grandeurs en physique (Système international)	482
Annexe 3 : Multiples et sous-multiples des unités du Système international	483
Annexe 4 : Constantes fondamentales en physique et facteurs de conversion	483
Annexe 5 : Perte d'énergie par ionisation pour les électrons en $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$	484
Annexe 6 : Valeurs des coefficients d'absorption massique en énergie $\frac{\mu_{en}}{\rho}$ en $\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$ dans l'eau, l'air, l'os compact et les tissus mous	485
Annexe 7 : Valeurs des coefficients d'absorption massique en énergie $\frac{\mu_{en}}{\rho}$ en $\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$ dans des milieux monoatomiques	486
Annexe 8 : Coefficients d'atténuation massique $\mu/\rho$ ( $\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$ ) pour différents matériaux	486
Annexe 9 : Coefficients d'atténuation linéique $\mu_l$ ( $\text{cm}^{-1}$ ) pour différents matériaux	487

Annexe 10 : Facteur d'accumulation de dose ( <i>Build-up</i> ) pour une source ponctuelle dans l'eau	488
Annexe 11 : Facteur d'accumulation de dose ( <i>Build-up</i> ) pour une source ponctuelle dans le plomb	488
Annexe 12 : Facteur d'accumulation de dose ( <i>Build-up</i> ) pour une source ponctuelle dans le béton ordinaire	489
Annexe 13 : Affections provoquées par les rayonnements ionisants prises en charge par le Régime général en France	489
Annexe 14 : Valeurs d'exemption pour les radionucléides ou substances radioactives, et niveaux définissant une source scellée de haute activité (annexe 13-8 du code de la santé publique)	490
Annexe 15 : Limites réglementaires retenues par la réglementation transport	492
Annexe 16 : Codes ONU pour la classe 7	493
Annexe 17 : DPUI (en Sv/Bq) pour différents nucléides publiés par le <i>Journal officiel</i> de la République française	494
Annexe 18 : Liste des principales installations nucléaires du parc nucléaire français	495
Annexe 19 : Appareils gammagraphiques	496
Annexe 20 : Principe de fonctionnement des générateurs de rayons X	498
Annexe 21 : Tableau périodique des éléments chimiques	499
<b>Bibliographie</b>	501



*Manuel de radioactivité - Tome 2 : Les désintégrations radioactives – Les interactions rayonnements-matière – Les applications de la radioactivité.* Jacques FOOS – Formasciences – ISBN : 2-909336-04-2

*Manuel de radioactivité - Tome 3 : Les effets biologiques des rayonnements – Éléments de radioprotection.* Guy LEMAIRE et Jacques FOOS – Formasciences – ISBN : 2-909336-06-9

*Mémento de la radioprotection en exploitation.* EDF

*Mémento de la sûreté nucléaire en exploitation.* EDF – ISBN 2-7240-0087-0

*Physique appliquée à l'exposition externe – Dosimétrie et radioprotection.* Rodolphe ANTONI et Laurent BOURGEOIS – Springer – ISBN : 978-8178-0310-4

*Dosimétrie externe – Applications à la radioprotection.* Alain FAUSSOT – *Technique et documentation* – ISBN : 978-2-7430-1395-0

*Guide pratique – Radionucléides et radioprotection.* D. DELACROIX, J.P. GUERRE, P. LEBLANC – *EDP Sciences* – ISBN : 2-86883-704-2

*Toute la physique.* Horst STÖCKER, Francis JUNDT, Georges GUILLAUME – Dunod – ISBN : 2-10-003942-3

*The AME2003 atomic mass evaluation (II). Tables, graphs and references.* G. AUDI, A.H. WAPSTRA, C. THIBAUT – *Nuclear Physics A 729* : 337–676 (2003)

*Experimental Atomic Masses.* G. AUDI, A.H. WAPSTRA – *Nuclear Physics A 595* : 409 (1995)

*The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties.* G. AUDI, O. BERSILLON, J. BLACHOT, A.H. WAPSTRA – *Nuclear Physics A 729* : 3–128 (2003)

*La radiolyse de l'eau et des solutions aqueuses : historique et actualité.* C. FERRADINI, J.-P. JAY-GERIN – *Can. J. Chem.* 77 : 1542-1575 (1999)

Les données proviennent aussi des sites officiels :

<http://www.asn.fr>

<http://www.irsn.fr>

<http://www.nucleide.org>

<http://www.unscear.org>

<http://www.andra.fr>

<http://www.cea.fr>

<http://france.edf.com>

<http://icrp.org>

<http://rpcirkus.org>

<http://www.legifrance.gouv.fr>

<http://www.laradioactivite.com>

<http://www.inrs.fr>

PROfil

# Physique nucléaire et radioprotection

à l'usage de l'environnement nucléaire

**Arnaud Boquet**

**C**et ouvrage s'adresse aux étudiants se destinant à l'industrie du nucléaire, à la médecine nucléaire ou encore à la recherche. Les utilisateurs de rayonnements ionisants, opérateurs, techniciens, ingénieurs, personnes compétentes en radioprotection, médecins du travail, pourront également y trouver des informations utiles et actualisées. Plus largement, toute personne ayant un intérêt pour les sciences aura un point complet sur les phénomènes liés à la radioactivité et aux rayonnements ionisants.

Cet ouvrage propose des cours de physique nucléaire, allant des constituants de la matière aux interactions entre rayonnement et matière ; des cours de radioprotection, incluant la dosimétrie, la détection, les moyens de protection contre l'exposition aux rayonnements ionisants ; la réglementation liée à la radioprotection mise à jour. Un point complet sur la culture nucléaire est fait, allant de l'historique à l'utilisation de la radioactivité et des rayonnements ionisants, en passant par leurs effets biologiques ou encore les accidents et l'exposition de la population. À chaque chapitre, des exercices d'application et des corrigés sont proposés. Ils permettent d'appréhender l'aspect quantitatif de la radioprotection, en étudiant la contamination, l'exposition du personnel ou encore des calculs d'activité.

Ainsi, chaque lecteur y trouvera son compte... un lycéen en baccalauréat y trouvera des informations claires et actuelles ; un étudiant en BTS ou licence professionnelle aura toutes les bases pour ses cours dans un même ouvrage, avec des exercices d'entraînement ; un étudiant en école d'ingénieur ou master aura un point complet sur l'ensemble du spectre de la radioprotection et des méthodes de calculs associées ; un intervenant en nucléaire aura des informations précises sur le thème qui l'intéresse ; une PCR aura dans un seul ouvrage toutes les données et les formules nécessaires à ses missions, et un support de cours pour le passage des formations PCR.

*Arnaud Boquet enseigne depuis 2007 au CFA La Briquerie de Thionville, dont le site La Malgrange s'est spécialisé dans les formations pour les industries du nucléaire. Il encadre la formation BTS Contrôle des rayonnements ionisants et application des techniques de protection (CRIATP) et intervient en filière Environnement Nucléaire (EN). Il est également formateur pour les formations Radioprotection option Réacteur Nucléaire niveaux 1 et 2 (RP option RN 1 et 2).*

978-2-7598-2313-0



9 782759 823130

**edp sciences**  
www.edpsciences.org

Les ouvrages de la collection PROfil ont pour vocation la transmission des savoirs professionnels dans différentes disciplines. Ils sont rédigés par des experts reconnus dans leurs domaines et contribuent à la formation et l'information des professionnels.