

# Radioprotection et ingénierie nucléaire



**Henri Métivier,**  
*Coordinateur*



# Radioprotection et ingénierie nucléaire



GÉNIE ATOMIQUE

# Radioprotection et ingénierie nucléaire

Coordonné par Henri Métivier



17, avenue du Hoggar  
Parc d'activités de Courtabœuf, BP 112  
91944 Les Ulis Cedex A, France

Illustration de couverture : Portique de contrôle de la contamination  $\alpha / \beta / \gamma$ .

© Rados Technology.

Publié avec le concours du ministère chargé de l'enseignement supérieur et de la recherche.

ISBN : 2-86883-769-7

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 1<sup>er</sup> 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 2006

# Introduction

---

*Henri Métivier*

Cet ouvrage, « Radioprotection et ingénierie nucléaire » s'inscrit dans le cadre de l'enseignement de Génie Atomique que dispense l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires. Il recouvre plusieurs aspects de la radioprotection pour répondre aux besoins des ingénieurs qui feront carrière dans l'électronucléaire ou dans la propulsion nucléaire, en particulier au niveau des réacteurs.

Cet ouvrage comme son titre l'indique, n'est pas un manuel exhaustif de radioprotection mais apporte aux élèves ingénieurs l'essentiel de ce qu'ils doivent connaître pour mener à bien leur carrière dans ce domaine.

C'est un ouvrage collectif, dans lequel chaque enseignant reprend de manière assez libre la structure de son cours. L'étudiant ne devra donc pas être étonné de voir ici des développements non abordés lors des cours, mais qui leur apporteront un complément utile. Nous espérons également que cet ouvrage sera aussi utile à des professionnels souhaitant actualiser leurs connaissances.

Pour accroître sa lisibilité et permettre aux ingénieurs, une lecture en « libre service », s'ils le souhaitent, nous l'avons structuré en plusieurs parties et annexes.

Il commence par un rappel des bases de la radioprotection car il est indispensable de savoir comment sont bâties les réglementations qui soit contraindront, soit protégeront les ingénieurs et techniciens dans leur vie professionnelle. De plus les activités nucléaires sont en permanence sous le regard critique de nos concitoyens. Un ingénieur qui ne connaîtrait pas la genèse de la radioprotection et son vocabulaire particulier ne serait pas considéré comme crédible lors de ses explications : *le sievert doit lui être familier*. Enfin l'ingénieur doit savoir que si le système de radioprotection se fonde sur des bases scientifiques, la science n'est pas son seul aspect, il intègre de plus en plus la demande sociétale, qui dans ce domaine, est particulièrement exigeante. Cette intégration, depuis son origine, a permis au système de radioprotection radiologique de prendre en compte le principe de précaution, voire le créer, sans entraver outre mesure le développement de l'électronucléaire qui apparaît de plus en plus comme indispensable pour couvrir les besoins futurs d'énergie.

La première partie de l'ouvrage traite des grandeurs dosimétriques et de la surveillance des travailleurs. C'est un choix que nous avons fait. Il nous paraît plus clair de traiter en premier les grandeurs, la manière de les mesurer et comment surveiller l'exposition des travailleurs. Un autre choix aurait été possible, nous en sommes conscient. Nous avons séparé la dosimétrie et la surveillance pour l'exposition externe de celle pour l'exposition interne. Les méthodes sont différentes, la première est l'œuvre de physiciens, la seconde

associe physiciens, chimistes, biologistes et médecins. Mais si la surveillance est traitée séparément, la protection radiologique ne fait aucune distinction et ne se préoccupe que de la somme des deux expositions.

La seconde partie, que nous aurions pu placer en premier, traite de la radioprotection lors de la conception du réacteur. Les métiers sont différents, les définitions aussi. Le lecteur ne devra pas s'en étonner. En séparant clairement ces deux premières parties, nous pensons que nous évitons ainsi certaines confusions. Certaines descriptions faisant appel à de nombreuses données, nous avons préféré les déplacer vers les annexes pour faciliter la lecture de ces chapitres 6 à 11.

La troisième partie traite des matériaux et des dispositifs de radioprotection. Selon les types de rayonnement et selon les contraintes de volume, il sera fait appel à différents matériaux. Pour éviter la dispersion des composés radioactifs, plusieurs techniques de confinement sont indispensables. Dans les ateliers, les lois physiques de la dispersion des aérosols sont essentielles à une bonne radioprotection. Toutes ces bases scientifiques et techniques sont rappelées dans cette partie.

Enfin la quatrième partie aborde la réglementation. Celle-ci évolue en permanence et nous avons voulu en expliquer plus la genèse que sa description littérale que les utilisateurs trouveront dans les textes des décrets. Dès sa création, le système de protection a mis en place le principe de précaution, sans que cela soit explicitement dit. Partant de l'idée que toute exposition peut avoir un effet, il devint nécessaire, pour obtenir les meilleurs résultats possible, de mettre en place l'optimisation de la radioprotection. Son importance est telle dans la vie de tous les jours que nous en avons fait un chapitre à lui seul.

Non directement enseigné, mais faisant toujours l'objet de questions, nous avons voulu décrire, dans l'annexe 1, les accidents qui ont émaillé cette technologie depuis la seconde guerre mondiale. Cet inventaire est planétaire, ce qui montre bien la bonne maîtrise de cette activité et le bien-fondé des règles de sûreté et de protection qui l'entourent. Dans l'annexe 2, le lecteur trouvera les méthodologies utilisées pour estimer l'impact des rejets radioactifs dans l'environnement. Les annexes 3 à 5 doivent permettre aux lecteurs de la seconde partie une lecture plus aérée des chapitres 6 à 11.

Ce livre est un ouvrage collectif, son aboutissement est l'effort de tout un groupe, je tiens à remercier tous les auteurs, cités en page 17, pour leur concours, nous avons croisé nos formations, nos points de vues, les réactions de nos étudiants. J'espère que le résultat montrera bien cet engagement de tous.

Je souhaite également remercier le Professeur Daniel Blanc qui a bien voulu nous conseiller au moment où la structuration de ce livre ne nous paraissait pas facile. Sa relecture critique nous a considérablement aidé.

Henri MÉTIVIER

# Table des matières

---

## **Chapitre 1 : Les bases de la protection radiologique**

Introduction .....	21
1.1. Radioactivité et exposition, quelques rappels .....	22
1.2. L'origine des règles de radioprotection, la CIPR .....	23
1.3. Effets des rayonnements ionisants .....	23
1.3.1. Altérations de l'ADN.....	24
1.3.2. Effets déterministes.....	26
1.3.3. Effets stochastiques .....	28
1.4. Notions de doses .....	29
1.4.1. La dose absorbée .....	30
1.4.2. La dose équivalente .....	30
1.4.3. La dose efficace .....	31
1.4.4. Le cas particulier de l'exposition interne, la notion d'engagement de dose	32
1.5. Bases du système de protection radiologique .....	34
1.5.1. Types d'activités .....	34
1.5.2. Les trois principes .....	35
1.5.3. Recommandations de la publication 60.....	36
1.6. Évolutions prévisibles des bases scientifiques et leurs répercussions potentielles sur le système de protection radiologique .....	37
1.6.1. Ce que la communauté scientifique sait.....	38
1.6.2. Mais restent des inconnues .....	39
1.6.3. Le choix de la CIPR pour la relation dose-effet.....	40
1.6.4. Un cas particulier qui mériterait plus ample réflexion, la gestion des déchets nucléaires à vie longue, la notion de radiotoxicité.....	42
1.6.5. Un cancer peut-il être attribué sûrement aux rayonnements ionisants ?....	43
1.6.6. Cancer radio-induit et prédisposition génétique .....	43
1.6.7. Effets combinés des rayonnements et d'autres polluants.....	44
1.7. La réflexion en cours à la CIPR pouvant modifier le système de protection radiologique .....	44
1.7.1. Pourquoi modifier le système ? .....	44
1.7.2. Que propose-t-elle de nouveau ? .....	45
1.8. Conclusions .....	47

## Partie I Grandeurs, dosimétrie et surveillance

### Chapitre 2 : Concepts de base

Introduction .....	51
2.1. Interaction des rayonnements avec la matière .....	52
2.1.1. Classification des rayonnements ionisants .....	52
2.1.2. Interaction des photons .....	52
2.1.3. Interaction des particules chargées avec la matière .....	61
2.1.4. Interactions des neutrons.....	69
2.2. Flux d'électrons secondaires dans un milieu irradié par un rayonnement électromagnétique .....	73
2.2.1. Notion d'équilibre électronique .....	73
2.2.2. Variation du flux électronique à la traversée de deux milieux différents ..	74

### Chapitre 3 : Grandeurs radiométriques et dosimétrie

Introduction .....	77
3.1. Grandeurs radiométriques .....	77
3.1.1. Quantités intégrales .....	77
3.1.2. Quantités globales en un point.....	78
3.2. Grandeurs dosimétriques .....	79
3.2.1. Rappel .....	79
3.2.2. Dose absorbée .....	79
3.2.3. Kerma (Kinetic Energy Released in Matter) .....	80
3.2.4. Débit de dose et débit de Kerma .....	81
3.2.5. Exposition (non reprise dans la CIPR 60) .....	81
3.2.6. Relation entre les différentes grandeurs dosimétriques et radiométriques.	82
3.2.7. Notions d'équivalent de dose en un point et de dose équivalente pour un organe ou un tissu .....	89
3.3. Notions de microdosimétrie .....	90
3.3.1. Distribution microscopique de l'énergie communiquée .....	90
3.3.2. Grandeurs microdosimétriques .....	91
3.3.3. Microdosimétrie et radioprotection .....	93

### Chapitre 4 : Dosimétrie et surveillance pour l'exposition externe

Introduction .....	99
4.1. Grandeurs opérationnelles .....	100
4.1.1. Grandeurs opérationnelles de l'ICRU pour la surveillance de l'environnement et de l'individu .....	100
4.1.2. Passage de la mesure à la dose absorbée (dosimétrie absolue et relative), à l'équivalent de dose et à la dose efficace .....	102
4.1.3. Caractéristiques des instruments de radioprotection requis en dosimétrie.....	104
4.1.4. L'étalonnage : grandeurs de référence et procédures associées.....	108
4.2. Dosimétrie absolue .....	108

4.2.1. Calorimétrie.....	109
4.2.2. Dosimétrie chimique de Fricke.....	110
4.2.3. Chambre d'ionisation et théorème de Bragg-Gray.....	110
4.3. Dosimétrie relative.....	112
4.3.1. Film photographique.....	113
4.3.2. Détecteur solide de traces.....	118
4.3.3. Thermoluminescence et photoluminescence.....	119
4.3.4. Dosimètres électroniques.....	128
4.4. Dosimétrie des neutrons.....	133
4.4.1. Problématique.....	133
4.4.2. Surveillance de l'environnement et dosimétrie individuelle.....	137
4.4.3. Étalonnage des dosimètres, spectrométrie des neutrons.....	140

## **Chapitre 5 : Dosimétrie et surveillance pour l'exposition interne**

Introduction.....	145
5.1. Modèles de la CIPR.....	146
5.1.1. Modèles d'entrée.....	146
5.1.2. Modèles systémiques.....	148
5.2. Stratégie de surveillance.....	152
5.2.1. Moyens et objectifs d'un programme de surveillance.....	152
5.2.2. Choix d'un programme de surveillance.....	152
5.3. Mesures directes par anthroporadiamétrie.....	155
5.3.1. Principe.....	155
5.3.2. Anthroporadiamétrie haute énergie (> 200 keV).....	156
5.3.3. Anthroporadiamétrie basse énergie (< 200 keV).....	158
5.3.4. Mesure de l'iode dans la thyroïde.....	159
5.3.5. Orientations futures.....	160
5.3.6. Cas particulier de la mesure des plaies contaminées.....	161
5.4. Mesures « in vitro » : analyses des radioéléments dans les excréta.....	163
5.4.1. Principe de détection des rayonnements.....	163
5.4.2. Analyse des émetteurs $\gamma$ .....	163
5.4.3. Analyse des émetteurs $\beta$ .....	164
5.4.4. Analyse des émetteurs $\alpha$ .....	165
5.4.5. Conclusion.....	170
5.5. Calcul de la dose.....	170
5.5.1. Principe.....	170
5.5.2. Valeurs de référence et valeurs spécifiques.....	171
5.5.3. Procédure d'interprétation dosimétrique des mesures de surveillance.....	172

## **Partie II Ingénierie de la radioprotection**

### **Chapitre 6 : L'ingénierie de la radioprotection : généralités**

Introduction.....	179
6.1. L'ingénierie de la radioprotection : objectifs.....	180
6.2. Types de particules et gamme d'énergie.....	182

6.3. Gamme de temps .....	182
6.4. Grandeurs physiques d'intérêt.....	183
6.5. Exemples de grands domaines d'études et classes de problèmes .....	183

## **Chapitre 7 : Grandeurs physiques fondamentales et dérivées**

Introduction .....	189
7.1. Flux de particules et grandeurs dérivées .....	190
7.1.1. Flux de particules.....	190
7.1.2. Relation entre flux et courant de particules .....	192
7.1.3. Réponse d'un détecteur.....	194
7.2. La concentration des radionucléides et grandeurs dérivées .....	207

## **Chapitre 8 : Les sources de rayonnements**

Introduction .....	213
8.1. Les sources primaires de rayonnements.....	215
8.1.1. Neutrons prompts de fission.....	216
8.1.2. Neutrons retardés.....	216
8.1.3. Gamma prompts de fission.....	219
8.1.4. Gamma, les alpha et les bêta des produits de fission et des noyaux lourds .....	220
8.2. Sources secondaires .....	225
8.2.1. Gamma de capture radiative des neutrons ( $n, \gamma$ ).....	225
8.2.2. Gamma de diffusion inélastique ( $n, n'$ ).....	225
8.2.3. Particules chargées protons et alpha produites par les réactions de type ( $n, p$ ) et ( $n, \alpha$ ) .....	225
8.2.4. Particules $\alpha$ , $\beta$ et $\gamma$ des produits d'activation.....	225
8.2.5. Neutrons de fissions spontanées et des réactions ( $\alpha, n$ ) .....	230
8.2.6. Neutrons produits par les réactions photonucléaires .....	232
8.3. Inventaire radiologique et déchets radioactifs.....	233
8.3.1. Classement des déchets radioactifs.....	234
8.3.2. Formation du tritium .....	234
8.3.3. Formation du carbone 14.....	235
8.4. Les sources de rayonnements dans un tokamak.....	238
8.5. Les sources de rayonnements dans un accélérateur et dans un dispositif à spallation.....	239

## **Chapitre 9 : Méthodologie des études de protection**

Introduction .....	245
9.1. Démarche générale.....	246
9.2. Examen du problème/choix des objectifs .....	247
9.3. Identification des sources de rayonnements .....	248
9.4. Recherche des contraintes.....	250
9.5. Recensement des matériaux possibles et disposition .....	252
9.5.1. Types de matériaux .....	252

9.5.2. Disposition des écrans .....	253
9.6. Mise en œuvre des calculs.....	254
9.7. Choix de la solution.....	257
9.7.1. Cas de l'exploitation .....	257
9.7.2. Cas de la conception initiale.....	258
9.8. Vérification expérimentale et suivi .....	258
9.9. Notion d'incertitude et qualification .....	259
9.9.1. Construction d'une base de qualification .....	259
9.9.2. Justification de la qualification d'un calcul.....	260

## **Chapitre 10 : Propagation des rayonnements : méthodes et codes de calcul**

Introduction .....	263
10.1. Transport des particules chargées.....	271
10.2. Transport des particules neutres : neutrons et gamma .....	274
10.2.1. Forme intégrô-différentielle de l'équation du transport.....	275
10.2.2. Forme intégrale de l'équation du transport.....	276
10.2.3. Notion de flux adjoint – Équation adjointe du transport .....	278
10.3. Calculs paramétriques, calculs de sensibilité et propagation d'incertitudes ....	279
10.4. La méthode d'atténuation en ligne droite .....	280
10.4.1. Principe de la méthode.....	280
10.4.2. Cas d'une source ponctuelle isotrope.....	282
10.4.3. Cas d'une source polycinétique spatialement distribuée .....	282
10.4.4. Détermination des facteurs d'accumulation .....	284
10.4.5. Codes de calculs.....	291
10.4.6. Techniques de calcul « manuelles ».....	295
10.4.7. Propagation des neutrons rapides.....	301
10.4.8. Intérêt et limites de la méthode d'atténuation en ligne droite .....	302
10.5. La méthode aux ordonnées discrètes ( $S_N$ ).....	302
10.5.1. Principe de la méthode.....	302
10.5.2. Principe de la résolution en géométrie sphérique.....	303
10.5.3. Intérêt et limites de la méthode $S_N$ .....	307
10.6. La méthode de Monte Carlo.....	309
10.6.1. Principe de la méthode .....	311
10.6.2. Les lois de tirage des événements – Construction du processus statistique .....	313
10.6.3. Estimation d'une grandeur physique .....	319
10.6.4. Notion de facteur de qualité .....	322
10.6.5. Simulation non analogue ou biaisée .....	322
10.6.6. Intérêt et inconvénients de la méthode de Monte Carlo .....	326
10.7. La méthode de propagation par albédo.....	329
10.7.1. Principe de la méthode.....	331
10.7.2. Définitions de l'albédo.....	332
10.7.3. Méthodes de calcul de l'albédo .....	334
10.7.4. Intérêt de la méthode de propagation par albédo.....	338

## **Chapitre 11 : Évolution isotopique : méthodes et codes de calcul**

Introduction .....	345
11.1. Équations généralisées de Bateman .....	345
11.1.1. Évolution des produits de fission (PF) formés en réacteur.....	346
11.1.2. Évolution des noyaux lourds .....	347
11.1.3. Évolution des produits d'activation.....	348
11.2. Méthodes de résolution .....	348
11.2.1. Solution analytique pour une chaîne de filiation simple .....	349
11.2.2. Solution analytique des équations de Bateman généralisées.....	350
11.2.3. Résolution numérique des équations de Bateman généralisées.....	350
11.3. Codes de calcul .....	351
11.4. Calculs paramétriques, calculs de sensibilité et calcul d'incertitudes.....	352

## **Partie III Matériaux et dispositifs de radioprotection**

### **Chapitre 12 : Les matériaux de protection et leur utilisation**

Introduction .....	357
12.1. Interactions et atténuation des neutrons et des gamma dans la matière .....	357
12.1.1. Gamma .....	360
12.1.2. Neutrons .....	360
12.2. Matériaux.....	361
12.2.1. Eau (water) .....	362
12.2.2. Fer (iron) .....	366
12.2.3. Plomb (lead).....	372
12.2.4. Béton (concrete).....	374
12.2.5. Uranium .....	374
12.2.6. Un matériau organique : le polyéthylène .....	376
12.2.7. Air (20 °C, 1 bar).....	377

### **Chapitre 13 : Les dispositifs de protection contre la contamination interne**

Introduction .....	379
13.1. La méthode d'analyse de sûreté .....	379
13.1.1. Premier niveau, la prévention .....	379
13.1.2. Second niveau, la surveillance .....	379
13.1.3. Troisième niveau, l'action de sécurité .....	380
13.2. Système de confinement .....	380
13.3. Zonage des installations pour le travail et l'intervention .....	380
13.3.1. Le premier système de confinement dans les usines .....	381
13.3.2. Le deuxième système de confinement dans les usines .....	381
13.3.3. Le dispositif de confinement dynamique .....	382
13.4. Captage de contamination .....	386
13.4.1. Principe de captation .....	386
13.4.2. Principaux systèmes de captation.....	386
13.5. Prévention individuelle .....	389

13.5.1. Appareils de protection des voies respiratoires .....	389
13.6. Système de surveillance .....	395
13.7. Mesurage des aérosols au poste de travail .....	395
13.7.1. Inhalation, pénétration et dépôt des aérosols .....	396
13.7.2. Échantillonnage des aérosols .....	398

## Partie IV Gestion du risque radiologique

### Chapitre 14 : Réglementation, organisation

14.1. Élaboration du système de gestion du risque radiologique – Concepts de base	409
14.1.1. Des standards de radioprotection établis au niveau international .....	409
14.1.2. Trois principes pour une gestion responsable du risque radiologique.....	410
14.2. La réglementation communautaire .....	413
14.2.1. Le traité Euratom .....	413
14.2.2. La directive 96/29/Euratom fixant les normes de base .....	414
14.3. La réglementation nationale .....	419
14.3.1. Ordonnance n° 2001-270 du 28 mars 2001 .....	419
14.3.2. Décret n° 2002-460 du 4 avril 2002 .....	420
14.3.3. Décret n° 2003-296 du 31 mars 2003 .....	421
14.3.4. Décret n° 2003-295 du 31 mars 2003 .....	422
14.3.5. Nouvelle organisation des pouvoirs publics dans les domaines de la radioprotection et de la sûreté nucléaire (domaine civil) .....	423

### Chapitre 15 : Optimisation

15.1. La démarche ALARA : anticiper, suivre et analyser .....	425
15.2. Nécessité de l'engagement de tous les acteurs .....	426
15.2.1. Une culture commune ALARA .....	426
15.2.2. Engagement des autorités .....	426
15.2.3. Engagement de la hiérarchie .....	426
15.2.4. Engagement du personnel .....	427
15.2.5. Intégration dans les relations contractuelles .....	427
15.3. Des moyens adaptés .....	428
15.3.1. Des structures de décision et d'analyse .....	428
15.3.2. Des outils spécifiques .....	428
15.3.3. Des procédures adaptées .....	429
15.4. La démarche ALARA : un exemple .....	429
15.4.1. Étapes de la démarche en phase de préparation .....	429
15.4.2. Un exemple d'application : contrôle d'une vanne .....	431
15.5. Valeur monétaire de l'homme-sievert .....	439
15.5.1. Le concept .....	439
15.5.2. Détermination des valeurs monétaires de référence de l'homme-sievert	440
15.5.3. Présentation analytique du modèle .....	441
15.5.4. Systèmes existants .....	441
15.6. Conclusion .....	445

<b>Annexe 1 - Les accidents radiologiques. Bilan de 50 ans d'accidents graves</b> .....	447
Introduction .....	447
A1.1. Accidents reconnus d'emblée .....	448
A1.1.1. Gestion simple.....	448
A1.1.2. Gestion délicate.....	450
A1.1.3. Catastrophes .....	451
A1.2. Accidents non reconnus d'emblée .....	451
A1.2.1. Nombre réduit de victimes .....	452
A1.2.2. Victimes en nombre important.....	454
A1.2.3. Conséquences graves pour la population et l'environnement.....	455
A1.3. Accidents gardés secrets .....	457
A1.4. Conclusions.....	458
A1.4.1. Diagnostic de l'accident .....	458
A1.4.2. Diagnostic de la maladie .....	459
A1.4.3. Gestion de l'accident.....	459
A1.4.4. Gestion médicale de l'accidenté.....	459
 <b>Annexe 2 - Introduction aux études d'incidence des rejets radioactifs</b> .....	 465
Introduction .....	465
A2.1. Les radionucléides et les voies de transfert.....	465
A2.2. Aperçu concernant la dispersion.....	466
A2.2.1. Dispersion dans l'atmosphère .....	466
A2.2.2. Dispersion dans les rivières.....	468
A2.3. Migration dans les sols.....	468
A2.3.1. Notions générales .....	468
A2.3.2. Modèles de type unicouche.....	469
A2.3.3. Modèles faisant appel aux équations de diffusion/dispersion .....	470
A2.4. Transferts aux plantes et aux animaux.....	471
A2.4.1. Transferts aux plantes .....	471
A2.4.2. Transferts aux produits d'origine animale.....	472
A2.4.3. Les formulations globales.....	474
A2.4.4. Transferts du tritium et du carbone 14 .....	475
A2.5. Le milieu aquatique .....	475
A2.5.1. Généralités .....	475
A2.5.2. Modèles simples .....	475
A2.6. Influence de la transformation des produits.....	476
A2.7. Calculs de doses .....	476
A2.7.1. Doses par immersion dans un nuage et par inhalation .....	477
A2.7.2. Doses par exposition aux dépôts.....	477
A2.7.3. Doses par ingestion .....	477
A2.8. Conclusion .....	478

---

<b>Annexe 3 - Données complémentaires sur les sources de rayonnements</b> .....	481
<b>Annexe 4 - Fonctions exponentielles intégrales</b> .....	491
<b>Annexe 5 - Rappels élémentaires de probabilités et statistique</b> .....	495
A5.1. Processus aléatoires et mesure.....	495
A5.1.1. Processus aléatoires.....	496
A5.1.2. Événements et famille d'événements .....	496
A5.2. Fonction de répartition, densité de probabilité.....	497
A5.3. Propriétés .....	498
A5.3.1. Espérance mathématique et variance.....	498
A5.3.2. Convergence stochastique .....	499
A5.3.3. Écart-type .....	500
A5.3.4. Estimation de la grandeur physique aléatoire.....	500
A5.4. Échantillonnage d'une densité de probabilité .....	500
A5.5. Générateurs de nombres aléatoires.....	502



# Auteurs

---

## **Isabelle AUBINEAU-LANIECE**

*Ingénieur chercheur en métrologie des rayonnements au département de Recherche et Technologie du CEA, docteur ès sciences, en dosimétrie interne, de l'université Paris XI spécialité « champs, particules, matières », elle enseigne au Génie Atomique.*

## **Éric BLANCHARDON**

*Ingénieur polytechnicien et docteur en biologie moléculaire de la cellule de l'université Paris XI, il travaille comme chercheur au sein du Service de Dosimétrie Interne de l'IRSN. Ses domaines d'expertise sont le calcul de la dose aux organes, la modélisation biocinétique et l'interprétation dosimétrique des mesures de surveillance de la contamination.*

## **Céline BOUVIER-CAPELY**

*Docteur de chimie analytique de l'université Paris VI et en poste au Service de Dosimétrie Interne de l'IRSN. Ses activités de recherche concernent le développement et la mise au point de nouveaux protocoles de purification chimique des échantillons biologiques et l'utilisation de l'ICP-MS pour la mesure des actinides dans ces échantillons.*

## **Michel BOYARD**

*Ingénieur en conception de réacteurs nucléaires et d'installations de soutien à AREVA-Technicatome principalement dans les domaines de la radioprotection et de la neutronique, il enseigne parallèlement la radioprotection au Génie Atomique au CEA/Cadarache dans le cadre de l'Institut National des Techniques Nucléaires.*

## **Maurice CHIRON**

*Ingénieur-chercheur au CEA et spécialiste des études de radioprotection, il contribue également à la R&D dans ce domaine. Son expérience professionnelle dans l'industrie du nucléaire lui a valu d'être membre du groupe de travail qui a élaboré les catalogues « PMDS » relatifs aux écrans de protection contre les rayonnements gamma et neutron. Il enseigne la radioprotection à la Formation Nucléaire de Base au CEA et assure des formations sur l'utilisation de logiciels de radioprotection.*

## **Cheikh M'Backé DIOP**

*Docteur ès Sciences de l'Université Paris XI, il est ingénieur-chercheur au CEA où il dirige le Laboratoire d'Études de Protection et de Probabilités. Il est co-responsable CEA du Master Spécialité Énergie et Rayonnements organisé conjointement par l'Université*

Paris XI et le CEA/INSTN. Il enseigne dans la filière nucléaire de diverses formations d'ingénieur et universitaires dont le Génie Atomique de l'Institut National des Techniques Nucléaires.

### **Loïc de CARLAN**

Docteur ès sciences de l'Université Paris XI, Rayonnement et imagerie en médecine, il est ingénieur chercheur à l'IRSN en dosimétrie interne dans le domaine de l'anthroporadiométrie.

### **Didier FRANCK**

Docteur ès sciences, spécialité chimie nucléaire et radiochimie, de l'université Paris XI, il est actuellement responsable du laboratoire d'Évaluation de la Dose à l'IRSN. Ses travaux de recherche concernent actuellement le développement de nouveaux systèmes de mesure in vivo destinés à la mesure des actinides ainsi que le développement de nouvelles techniques de reconstruction de fantômes numériques voxélisés en vue de leur application à l'étalonnage réaliste des systèmes de mesure d'anthroporadiométrie et de spectrométrie gamma.

### **Tan Dat HUYNH**

Docteur en Sciences de l'Université Paris XI, ingénieur-chercheur au CEA, il mène en particulier des travaux de R&D sur les sources de rayonnements induites par l'irradiation neutronique. Il contribue parallèlement à la qualification des logiciels de calcul dans le domaine de la physique des réacteurs nucléaires et participe à la constitution des bibliothèques de données nucléaires de base associées, au sein de groupes de travail de l'AEN/OCDE.

### **Bruno LAUWERS**

Consultant en Sûreté nucléaire – AXILYA (conseil et ingénierie des systèmes sûrs), ancien officier spécialisé de la Marine, il enseigne la radioprotection à l'École des applications militaires de l'énergie atomique (EAMEA).

### **Jean-François LECOMTE**

Ancien fonctionnaire au ministère de l'Industrie, où il a occupé des postes successivement à la Direction chargée de la sûreté nucléaire puis à celle chargée de l'énergie, il a été ensuite affecté au comité technique interministériel pour l'Euratom au moment de la négociation de la directive 96/29 sur les normes de base en radioprotection, puis a rejoint l'IRSN, où il a continué à suivre les questions de doctrine et de réglementation en radioprotection, au niveau national et international. Il est membre du Comité 4 (application des recommandations) de la CIPR. Il enseigne au Génie Atomique.

### **Christian LEFAURE**

Docteur d'État ès science économiques, Directeur adjoint du CEPN, il a participé au développement de la méthodologie ALARA avec le NRPB dans les années 1980, puis à sa mise en œuvre à EDF. Depuis 1996, il est coordinateur du réseau ALARA européen à la demande de la Commission européenne et responsable du Centre européen du système ISOE pour le compte de l'AIEA et de l'AEN de l'OCDE. Il a enseigné au Génie Atomique.

### **Corinne MAGE**

Titulaire d'un DESS « Analyse économique et gestion du risque » de l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN) et d'une maîtrise de physique (Université de Versailles-Saint-Quentin-En-Yvelines). Après 4 années passées au Centre d'étude sur l'Évaluation de la protection dans le domaine nucléaire (CEPN), elle a rejoint le CEA en

- 
- Reuillon R., Hill D.R.C. (2005) Optimization of Quasi RandomNumber Generators, *5th IMACS Seminar on Monte Carlo Methods: MCM'2005*, May 16-20, 2005, (Florida State University, Tallahassee, Florida, USA).
- Rubinstein R.Y. (1981) *Simulation and the Monte Carlo Method* (New York, Wiley).
- Saporta G. (1990) *Probabilités et analyse des données et statistique* (Paris, Éditions Technip).

