

# 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<br>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<br>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<br>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<br>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<br>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<br>de l'environnement et de l'individu .....                           | 100 |
| 4.1.2. Passage de la mesure à la dose absorbée (dosimétrie absolue et relative),<br>à l'équivalent de dose et à la dose efficace ..... | 102 |
| 4.1.3. Caractéristiques des instruments de radioprotection requises<br>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 anthroporadiométrie.....                               | 155 |
| 5.3.1. Principe .....  | 155 |
| 5.3.2. Anthroporadiométrie haute énergie (> 200 keV).....                        | 156 |
| 5.3.3. Anthroporadiométrie 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<br>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<br>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<br>dans un accélérateur<br>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 intégral-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<br>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     |
| <br><b>Annexe 2 - Introduction aux études d'incidence des rejets radioactifs</b> .....  | <br>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 |