

# Personne Compétente en Radioprotection

## Radioprotection pratique pour l'industrie et la recherche

### Sources non scellées



Hugues Bruchet, coordonnateur

cea

instn

EDP  
SCIENCES

# **Personne compétente en radioprotection**

**Radioprotection pratique pour l'industrie  
et la recherche – Sources non scellées**

**Coordonné par Hugues Bruchet**



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

Illustrations de couverture : Marquage radioactif d'une sonde ADN  
(CEA – Studio Pons).

Imprimé en France

ISBN : 978-2-86883-951-0

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 2009

# Préface

---

*Henri Métivier*

Après un premier ouvrage consacré aux « Principes de radioprotection-réglementation », puis un second relatif aux installations nucléaires de base (INB) et aux installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) soumises à autorisation, nous poursuivons notre effort pédagogique auprès des personnes compétentes en radioprotection. Cette nouvelle publication s'adresse aux PCR concernées par la problématique des sources non scellées de rayonnements ionisants dans les secteurs de l'industrie et de la recherche. Notons que cet effort n'est pas terminé puisqu'un quatrième volume consacré aux sources scellées et générateurs de rayonnements X dans ces mêmes secteurs est en préparation.

Une fois de plus, je rappellerai le rôle fondamental de la PCR dans les laboratoires, usines et dans toutes les installations où sont manipulées des sources de rayonnements ionisants. En effet, les autorités fondent beaucoup d'espoir sur l'action des PCR et étudient l'opportunité de faire évoluer leurs missions en intégrant l'idée d'harmonisation au sein des pays de l'Union européenne. Par ailleurs, les PCR se montrent de plus en plus exigeantes en matière d'information, s'organisent en groupes et réseaux, échangent leurs expériences lors de congrès organisés par différentes sociétés savantes. Un tel ouvrage de référence s'intègre donc dans cette logique en faisant le lien entre les différents acteurs de la radioprotection : autorités, employeurs, PCR, opérateurs et utilisateurs de sources...

Ce livre est conforme aux exigences réglementaires décrites dans l'arrêté du 26 octobre 2005 relatif aux modalités de formation de la personne compétente en radioprotection et de certification du formateur. Il se focalise sur la radioprotection pratique liée à l'utilisation de sources non scellées et de sources scellées nécessaires à leur contrôle, dans les secteurs de l'industrie et de la recherche. Le sujet n'est pas aisément accessible car les transferts de contaminations radioactives sont potentiellement multiples. De fait, une certaine appréhension associée à cet aspect transparaît chez bon nombre de travailleurs. Cette perception négative est de plus renforcée par la difficulté d'évaluer le risque : autant il est relativement simple de procéder à la lecture ou l'analyse d'un dosimètre, autant l'estimation des doses reçues dans le cas d'une exposition interne aux rayonnements ionisants fait appel à un grand nombre de paramètres et d'outils (examens médicaux, outils de calcul, modélisation...). Outre l'objectif de formation des PCR, la lecture de cet ouvrage pourra apporter un éclaircissement aux personnes désireuses de renforcer leurs connaissances dans ce domaine.

Ce besoin d'information et de méthodologie est particulièrement manifeste quand la PCR est confrontée à la mise en œuvre des analyses de postes de travail, pivot essentiel autour duquel s'articulent toutes ses autres missions de gestion du risque radiologique. Il va sans dire que cette thématique est traitée en détail, et qu'elle constitue même un point fort de l'ouvrage, bénéficiant d'un chapitre tant étoffé dans son contenu qu'innovant dans sa façon d'appréhender cette difficile question.

Support pédagogique à la formation, ce livre propose une méthode d'apprentissage interactive, en particulier pour trois chapitres traitant de l'utilisation des appareils de détection et de l'évaluation indirecte de la contamination surfacique, ainsi que de l'évaluation des doses résultant de l'exposition externe. Le lecteur endosse donc le rôle d'acteur de façon à progresser dans les situations concrètes de travail qui lui sont proposées, des corrigés détaillés étant proposés en fin de chapitre.

En complément à cette pédagogie, les autres chapitres de cet ouvrage sont clôturés par des parties « Faîtes le point » permettant au lecteur de réaliser son auto-évaluation et ainsi de mesurer sa progression. Par ailleurs, des parties « Pour en savoir plus » émaillent l'ouvrage de façon à approfondir certaines thématiques.

Une fois de plus, on ne peut que se féliciter qu'autour de Christine Jimonet, coordonnatrice de cette série, un groupe de pédagogues compétents et dynamiques issus du monde de la radioprotection aient répondu présents à ce besoin de documents de référence.

Aussi je souhaiterai conclure en félicitant l'ensemble des auteurs de cet ouvrage, et plus particulièrement Hugues Bruchet. Son implication dans l'ensemble du volume a conduit à cet excellent ouvrage marqué par la précision des informations données, la qualité de l'écriture et la clarté du texte.

Gageons que ce nouveau livre sera un outil indispensable pour les PCR concernées par la problématique des sources non scellées de rayonnements et qu'il ne pourra qu'être bénéfique pour la réalisation de leurs missions quotidiennes de radioprotection.

Henri METIVIER  
Professeur émérite à l'INSTN  
Ancien membre de la Commission internationale de protection radiologique

# Table des matières

---

<b>Auteurs .....</b>	ix
<b>Contributeurs .....</b>	xiii
<b>Chapitre 1 : Radioprotection dans les laboratoires</b>	
1.1. Utilisation des sources dans l'industrie et la recherche et risques associés .....	2
1.1.1. Sources non scellées .....	2
1.1.2. Sources scellées dans les laboratoires où sont manipulées des sources non scellées .....	7
1.2. Aménagement des laboratoires où sont manipulées des sources non scellées .....	9
1.2.1. Dispositions administratives et techniques relatives à l'achat et à l'utilisation de sources non scellées .....	9
1.2.2. Règles techniques d'aménagement des locaux de travail .....	19
1.2.3. Équipements de laboratoire .....	28
1.2.4. Petit matériel de laboratoire .....	30
1.2.5. Radioprotection pratique lors de la manipulation de sources .....	32
1.3. Évaluation de l'exposition .....	35
1.3.1. Rappels sur les grandeurs de protection .....	35
1.3.2. Règles de calcul de la dose efficace résultant d'une exposition externe et interne aux rayonnements ionisants .....	36
1.3.3. Estimation des doses résultant de l'exposition externe .....	37
1.3.4. Estimation des doses résultant de l'exposition interne .....	43
1.4. Contrôles de radioprotection .....	51
1.4.1. Données générales .....	51
1.4.2. Contrôles techniques des sources (cas des sources non scellées) ..	52
1.4.3. Contrôles de la gestion des sources radioactives non scellées ...	53
1.4.4. Contrôle des moyens et des conditions d'évacuation des effluents, de tri, de stockage et d'élimination des déchets ...	54
1.4.5. Contrôles des instruments de mesure .....	54
1.4.6. Contrôles d'ambiance .....	55

1.5.	Faites le point .....	65
1.6.	Annexe .....	69

## ***Chapitre 2 : Technologies des équipements de protection dans un laboratoire utilisant des sources non scellées***

Introduction .....	71
2.1. Équipements de protection collective contre la contamination atmosphérique .....	72
2.1.1. Le rideau d'air .....	72
2.1.2. La hotte ventilée .....	72
2.1.3. La hotte ventilée à flux dirigé .....	74
2.1.4. La hotte ventilée à flux laminaire .....	76
2.1.5. La boîte à gants .....	76
2.2. Enceintes de confinement – paramètres caractéristiques, dispositifs de contrôle et de filtration .....	77
2.2.1. Paramètres caractéristiques .....	77
2.2.2. Les dispositifs de contrôle et de sécurité .....	79
2.3. Propagation de la contamination atmosphérique .....	84
2.3.1. La ventilation des locaux .....	84
2.3.2. Évolution du niveau de contamination atmosphérique suite à un rejet accidentel à l'intérieur d'un local .....	85
2.3.3. Modes de prélèvement des aérosols .....	91
2.4. Faites le point .....	93

## ***Chapitre 3 : Utilisation d'un appareil de détection de contamination surfacique, détermination de la nature d'une source inconnue et calcul de rendement pratique de mesure***

3.1. Objectifs et démarche pédagogique .....	95
3.2. Utiliser une sonde associée à un contaminamètre .....	96
3.2.1. Le contaminamètre .....	96
3.2.2. Les sondes .....	97
3.2.3. Utilisation .....	99
3.3. Réaliser des mesures de contamination surfacique et déterminer le type de rayonnement ionisant .....	100
3.3.1. Détermination du bruit de fond .....	100
3.3.2. Réponse des différentes sondes en fonction des rayonnements ..	105
3.3.3. Influence des écrans .....	111
3.4. Évaluer vos acquis : déterminer la nature des rayonnements émis par une source inconnue .....	113
3.5. Calculer le rendement de mesure d'une sonde .....	115
3.5.1. Principe de calcul du « rendement de mesure » .....	115
3.5.2. Exemple du calcul du rendement de mesure avec le cobalt-60, émetteur $\beta/\gamma$ .....	117
3.5.3. Estimation de l'activité surfacique .....	118
3.5.4. Exercice d'application .....	120
3.6. Réponses aux questions .....	121

## ***Chapitre 4 : Évaluation indirecte de la contamination surfacique et décontamination***

4.1.	Objectifs .....	133
4.2.	Évaluation indirecte de la contamination surfacique : règles générales .....	134
4.2.1.	Généralités .....	134
4.2.2.	Limites de détection pour les instruments de mesure .....	135
4.2.3.	Règles relatives au prélèvement .....	136
4.2.4.	Évaluation de l'activité surfacique .....	137
4.3.	Partie pratique .....	142
4.3.1.	Repérer, identifier et évaluer une contamination surfacique .....	142
4.3.2.	Décontaminer .....	142
4.3.3.	Évaluer les résultats de la décontamination .....	142
4.4.	Réponses aux questions .....	144

## ***Chapitre 5 : Estimation de l'exposition externe : mesure et calcul***

5.1.	Objectifs et démarche pédagogique .....	151
5.2.	Préparation du poste de travail .....	152
5.3.	Mise en œuvre d'un contrôle de contamination .....	155
5.4.	Préparation des échantillons .....	156
5.5.	Évaluer les doses d'exposition externe par la mesure .....	158
5.5.1.	Cadre général .....	158
5.5.2.	Interprétation des résultats .....	164
5.6.	Évaluer les doses d'exposition externe par calcul .....	165
5.6.1.	Retour sur la manipulation précédente .....	165
5.6.2.	Exemples d'autres manipulations .....	170
5.7.	Réponses aux questions .....	172

## ***Chapitre 6 : Gestion des déchets et des effluents radioactifs***

	Introduction .....	181
6.1.	Déchets et effluents, quelques définitions .....	182
6.2.	Les producteurs de déchets du nucléaire diffus .....	183
6.3.	Classification des déchets radioactifs .....	184
6.4.	Règles de gestion des déchets et effluents radioactifs .....	186
6.4.1.	Mise en œuvre d'un zonage déchets .....	186
6.4.2.	Identification, caractérisation et tri .....	187
6.4.3.	Collecte .....	187
6.4.4.	Gestion par décroissance radioactive .....	188
6.4.5.	Gestion par filières autorisées .....	189
6.4.6.	Contrôle .....	190
6.4.7.	Entreposage .....	191
6.4.8.	Conditionnement, étiquetage et évacuation .....	196
6.4.9.	Règles de gestion des effluents liquides radioactifs .....	200
6.4.10.	Règles de gestion des effluents gazeux radioactifs .....	201
6.5.	Encadrement réglementaire de la gestion des déchets et effluents radioactifs .....	201

---

6.5.1.	Généralités .....	201
6.5.2.	Plan de gestion interne des effluents et des déchets .....	204
6.5.3.	Bilan annuel .....	205
6.6.	Parcours de chasse aux risques .....	205
6.6.1.	Situations « dégradées » .....	205
6.6.2.	Réponses aux questions .....	208

## ***Chapitre 7 : Gestion des situations incidentielles et dégradées***

Introduction .....	213	
7.1.	Qu'est-ce qu'un incident radiologique ? .....	214
7.1.1.	Généralités .....	214
7.1.2.	Accident ou incident : que dit l'échelle INES ? .....	214
7.2.	Incident radiologique et réglementation .....	216
7.2.1.	Champ d'application de la déclaration des incidents radiologiques .....	216
7.2.2.	Déclarations d'incident et ses critères .....	216
7.2.3.	Délais de déclaration .....	217
7.2.4.	Modalités de déclaration .....	217
7.2.5.	Information au public .....	217
7.2.6.	Nature des événements significatifs en radioprotection .....	220
7.3.	Le comportement en cas d'incident radiologique .....	221
7.3.1.	Généralités .....	221
7.3.2.	En cas d'exposition externe .....	222
7.3.3.	En cas de contamination .....	225
7.4.	Faites le point .....	231
7.5.	Annexes .....	234

## ***Chapitre 8 : Analyses de postes de travail***

Introduction .....	247	
8.1.	Contexte et objectifs .....	248
8.1.1.	Objectifs d'une analyse de poste de travail .....	248
8.1.2.	Cadre réglementaire .....	248
8.2.	Préparation : caractérisation des postes de travail .....	250
8.2.1.	Généralités .....	251
8.2.2.	Caractérisation des termes sources .....	251
8.2.3.	Tâches à réaliser .....	252
8.2.4.	Risques radiologiques pour chaque tâche .....	255
8.2.5.	Risques conventionnels associés .....	256
8.2.6.	Perception des risques par les acteurs .....	257
8.3.	Évaluation des doses .....	257
8.3.1.	Généralités .....	257
8.3.2.	Doses associées à chaque tâche .....	258
8.4.	Exploitation des résultats et retour d'expérience .....	260
8.4.1.	Classification du personnel .....	260
8.4.2.	Délimitation des zones de travail .....	261

8.4.3.	Optimisation de la radioprotection . . . . .	262
8.5.	Exemples . . . . .	262
8.5.1.	Évaluation de doses . . . . .	262
8.5.2.	Exploitation des résultats et classement des travailleurs . . . . .	283
8.5.3.	Exploitation des résultats et délimitation des zones . . . . .	283
8.5.4.	Faites le point . . . . .	283
8.6.	Annexes . . . . .	301
<b>Références bibliographiques</b> . . . . .		311
<b>Index</b> . . . . .		315



# Auteurs

---

## **Marc AMMERICH**

Technicien supérieur en Radioprotection, ingénieur CNAM en Physique nucléaire et titulaire d'un DESS en Sciences des aérosols. Après un début de carrière au Service de protection radiologique du CEA de Saclay, il rejoint le Groupe des enseignements de radioprotection de l'INSTN en 1991 et en prend la direction en 1996. Mis à disposition de l'Autorité de sûreté nucléaire en 2001, il exerce entre autres la fonction d'inspecteur avec la spécialité « radioprotection ». Il est revenu en 2006 à la Direction de la Protection et de la Sûreté nucléaire du CEA (MR/DPSN) et vient d'être nommé inspecteur nucléaire au pôle Maîtrise des risques (MR/IGN). Prix SFEN 1989 pour la réalisation du banc ICARE.

## **Séverine BALMAIN**

Diplômée de l'Institut des sciences et techniques de Grenoble (Polytech'Grenoble), elle est ingénieur en prévention des risques industriels. Elle travaille depuis 2000 chez Sanofi-Aventis R&D et est actuellement responsable du Pôle Santé du Centre de recherche de Montpellier. Elle y assure notamment les fonctions de PCR et de conseiller sécurité pour le transport des marchandises dangereuses. Elle a également en charge la coordination de la radioprotection pour les centres de recherche français du groupe.

## **Hugues BRUCHET**

Titulaire du DESS Radioprotection de l'université Joseph Fourier de Grenoble, il est ingénieur-chercheur au CEA et responsable du Groupe des enseignements de radioprotection au sein de l'unité d'enseignement en radioprotection, biologie et médecine (CEA/INSTN Saclay). En outre, il est responsable pédagogique et formateur certifié pour les formations de la personne compétente en radioprotection sur le site de l'INSTN Saclay et siège au sein du Comité de certification des formateurs de la PCR au CEFRI.

## **Joël COTTON**

Ingénieur CNAM en biochimie industrielle et agroalimentaire, il a commencé sa carrière en biologie médicale au service médical du travail du CEA de Fontenay-aux-Roses. En 1990, il a rejoint le monde de la recherche biomédicale dans le département

d'ingénierie et d'études des protéines au CEA de Saclay. Depuis 2002, il est responsable pédagogique au sein de l'unité d'enseignement de radioprotection, biologie et médecine de l'INSTN de Saclay et intervient régulièrement dans les formations de personnes compétentes en radioprotection.

**Christine JIMONET**

Docteur ès sciences en Biochimie de l'université Paris XI. Adjointe du chef de l'unité d'enseignement en radioprotection, biologie et médecine au CEA/INSTN de Saclay. Elle est en outre responsable pédagogique et a plus spécialement en charge l'enseignement des effets biologiques des rayonnements ionisants dans différentes formations dont les formations « personne compétente en radioprotection ». Elle est également responsable pour l'INSTN de l'enseignement du diplôme d'enseignement spécialisé de Médecine nucléaire.

**Sandrine LAUGLE**

Technicienne supérieure en Radioprotection au CEA de Saclay. Après une expérience de 3 ans dans un centre de lutte contre le cancer en tant que technicienne supérieure en génie biomédical, elle travaille actuellement au Service de protection radiologique du CEA de Saclay (laboratoires de faibles et moyennes activités). Par ailleurs, elle enseigne pour la formation de la personne compétente en Radioprotection à l'INSTN de Saclay.

**Philippe MASSIOT**

Ingénieur CNAM en Sciences et Technologies Nucléaires, il a commencé sa carrière en tant que chercheur au CEA auprès des accélérateurs de particules dans le domaine des matériaux puis celui de la radiobiologie. Il s'est ensuite spécialisé dans le domaine de la radiotoxicologie des actinides. Il poursuit son parcours à l'INSTN où il est chargé de mettre en place la certification ISO de la formation continue. Après 5 ans passés à l'ASN en tant que responsable de la formation et inspecteur de la radioprotection, il est maintenant responsable pédagogique à l'INSTN et chargé d'enseignement dans le domaine de la radioprotection et des transports de matières radioactives. Impliqué dans un projet européen d'harmonisation de la formation française personne compétente en radioprotection, il est également formateur certifié PCR.

**Amélie ROUE**

Docteur en physique médicale de l'université de Toulouse et titulaire du diplôme de qualification en physique radiologique et médicale, elle a exercé pendant 6 ans comme radiophysicienne dans un service de radiothérapie de l'AP-HP puis dans une société de contrôle de qualité. Elle a intégré depuis 2007 le groupe des enseignements de radioprotection au sein de l'unité d'enseignement en radioprotection, biologie et médecine où elle assure la coordination du diplôme de qualification en physique radiologique et médicale. Elle est également en charge de formations de radioprotection dans le domaine médical.

**Céline VIVARELLI-PETITGAND**

Titulaire du Master « Ingénierie des technologies en santé » à l'UTC de Compiègne, elle a intégré le CEA/INISTN de Saclay en qualité de responsable pédagogique de formations continues en radioprotection. Elle a rejoint l'APAVE en tant que formatrice PCR, assurant aussi la fonction d'inspectrice en radioprotection en centre de recherche, en milieu médical et industriel. Aujourd'hui responsable de groupe (Centre-Est CETE-APAVE Sud Europe), elle est également impliquée dans l'assistance technique pour la PCR et les cabinets d'étude intervenant dans le secteur médical.



# Contributeurs

---

Ce livre a bénéficié de la contribution à des titres divers des personnes nommées ci-dessous. Chacun reconnaîtra son implication dans les différentes étapes de réalisation de cet ouvrage, qu'il s'agisse de conseils à la rédaction, d'iconographie ou de relecture du manuscrit. Qu'ils en soient sincèrement remerciés.

<b>Pierre BARBEY</b>	Université de Caen Basse-Normandie
<b>Jean-Christophe BODINEAU</b>	Commissariat à l'énergie atomique, Institut national des sciences et techniques nucléaires
<b>Gilbert BRUHL</b>	Commissariat à l'énergie atomique, Pôle maîtrise des risques
<b>Pierre DUBOIS</b>	Institut de recherche et de développement
<b>Cécile ETARD</b>	Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, Direction de la radioprotection de l'homme
<b>Laurence FUSIL</b>	Commissariat à l'énergie atomique, Cellule de contrôle de sécurité des INB et des matières nucléaires
<b>Bernard HOCDE</b>	Commissariat à l'énergie atomique, Institut national des sciences et techniques nucléaires
<b>Sandrine JOURDE</b>	Commissariat à l'énergie atomique, Service de protection radiologique du CEA Valduc
<b>Yann KERGADALLAN</b>	Commissariat à l'énergie atomique, Institut national des sciences et techniques nucléaires
<b>Thierry LAHAYE</b>	Direction générale du travail
<b>Sylvie LOURS</b>	Commissariat à l'énergie atomique, Direction des Sciences du Vivant
<b>Henri METIVIER</b>	Professeur émérite à l'Institut national des sciences et techniques nucléaires

**Alain PIN**

Commissariat à l'énergie atomique, Institut national des sciences et techniques nucléaires

**Benoît QUESNE**

AREVA NC

**François THOMAS**

Commissariat à l'énergie atomique, Service de protection radiologique du CEA Saclay

**Claire TRONEL**

Autorité de sûreté nucléaire

**Alain VIVIER**

Commissariat à l'énergie atomique, Institut national des sciences et techniques nucléaires

# 1

# Radioprotection dans les laboratoires

---

Hugues Bruchet

L'objectif de ce chapitre est de rassembler les données utiles à la personne compétente en radioprotection (PCR) pour gérer le risque radiologique dans un laboratoire utilisant des sources radioactives non scellées dans le secteur de l'industrie et la recherche.

Ainsi, un grand nombre de thématiques seront présentées dans cette partie puis complétées et approfondies dans d'autres chapitres de cet ouvrage, en partie sous des aspects plus appliqués et pratiques. Nous conseillerons donc le lecteur de s'y rapporter le moment venu.

Pour acquérir ces connaissances, le lecteur aura donc le choix entre une lecture intégrale de cette partie puis des chapitres pratiques suivants (conseillé lors d'une première lecture) ou bien de traiter les grandes thématiques de façon différenciée (lectures suivantes).

Dans un premier temps, nous décrirons l'utilisation des sources non scellées au laboratoire, ainsi que les risques associés. Le manipulateur habitué à travailler avec ce genre de sources étant souvent confronté à d'autres types de sources de rayonnements, scellées cette fois-ci, nous présenterons également les manipulations de ces sources et les risques associés.

Dans la deuxième partie, nous étudierons l'aménagement des laboratoires où sont utilisées des sources non scellées (laboratoires de faible et moyenne activités). Nous commencerons par décrire les dispositions administratives et techniques relatives à l'achat et à l'utilisation de sources non scellées (autorisations, commande, réception, gestion et entreposage), puis nous aborderons les règles techniques d'aménagement, les équipements de laboratoire en incluant le petit matériel. Nous terminerons cette partie en énonçant des conseils de radioprotection pratique relatifs à la manipulation de sources non scellées.

Ensuite, nous répondrons à la question suivante : comment évaluer l'exposition des personnels aux rayonnements ionisants ? Les deux cas de l'exposition externe et de l'exposition interne seront pris en compte. Cette partie servira de base de réflexion pour la mise en œuvre des études de poste de travail. D'autre part, nous définirons les grandeurs opérationnelles relatives à l'incorporation de substances radioactives qui pourront être utilisées pour estimer la dose efficace engagée ou établir le zonage radiologique des locaux.

Enfin nous terminerons ce chapitre par une partie non moins importante : les contrôles à effectuer dans le laboratoire, au sens de la réglementation en radioprotection. Nous développerons les différents aspects abordés dans l'arrêté du 26 octobre 2005 en nous limitant au cas des sources non scellées : contrôle technique des sources, contrôle de gestion des sources, contrôles d'ambiance, contrôles des conditions d'élimination des

effluents et déchets associés à l'utilisation des sources non scellées et contrôles des instruments de mesure et dispositifs de protection et d'alarme.

## 1.1. Utilisation des sources dans l'industrie et la recherche et risques associés

### 1.1.1. Sources non scellées

« Nous saurons la physiologie, lorsque nous pourrons suivre pas à pas une molécule de carbone ou d'azote, faire son histoire, raconter son voyage dans le corps d'un chien depuis son entrée jusqu'à sa sortie... »

Claude Bernard, physiologiste français, 1813-1878

L'utilisation des sources non scellées dans les domaines de l'industrie et de la recherche est très variée. Historiquement, c'est avec la découverte de la radioactivité naturelle par Henri Becquerel en 1896, puis par Pierre et Marie Curie en 1898 que le principe de base du marquage moléculaire a été établi : il devint envisageable de suivre une molécule à la trace sans perturber le système étudié.

Dès 1913, Georges de Hevesy, jeune chimiste suédois d'origine hongroise, utilisa un isotope radioactif naturel du plomb pour étudier les propriétés physico-chimiques de ce métal. Une vingtaine d'année plus tard, Harold Urey réussissait à obtenir de l'eau « lourde » en enrichissant légèrement la molécule d'eau en deutérium, ce qui permit en particulier à Georges de Hevesy de mesurer précisément le volume hydrique chez l'homme.

Néanmoins, il fallut attendre la découverte de la radioactivité artificielle par Irène et Frédéric Joliot-Curie en 1934 pour que de nombreuses applications se développent, en particulier dans le domaine de la recherche en biologie et en médecine. De nombreux isotopes radioactifs artificiels furent produits, et servirent d'indicateurs à la plupart des éléments chimiques constituant les organismes vivants. L'ère des « traceurs isotopiques » commençait et il n'est pas exagéré de dire que ces molécules marquées ont joué un rôle décisif dans le développement de la biologie dite moléculaire.

#### 1.1.1.1. Applications dans la recherche biologique et médicale

Les isotopes utilisés permettent de comprendre et d'analyser, à l'échelle moléculaire, le fonctionnement des systèmes biologiques. La sensibilité de détection de ces isotopes radioactifs va permettre d'apporter un certain nombre d'informations sur la molécule biologique à étudier : suivi, détermination de la durée de vie, biocinétique, localisation, répartition et mesure de la concentration dans les conditions physiologiques.

Il convient néanmoins de distinguer le terme **traceur** du terme **anologue radioactif**, lequel ne désigne pas au sens strict la même chose.

Obtenir un traceur consiste à remplacer un ou plusieurs atomes constitutifs d'une molécule par l'un de ses isotopes radioactifs. Le composé obtenu possède la même structure chimique et, à l'effet isotopique près, les mêmes propriétés que la molécule parentale. L'une et l'autre sont en principe indiscernables, la molécule radioactive servant à tracer le cheminement métabolique de la molécule considérée.

En ajoutant l'isotope radioactif en sus des atomes constituants normalement la molécule parentale, on obtient un analogue radioactif de la molécule considérée, lequel se distingue par un grand nombre de propriétés (propriétés physiques, taille, masse, solubilité, résistance à la dégradation enzymatique...). Un tel analogue sera utilisable pour l'examen de processus mettant en jeu des mécanismes de fixation ou de reconnaissance entre molécules (liaison entre une hormone et son récepteur par exemple). Par contre, il sera difficilement utilisable en tant que traceur dans la plupart des investigations à caractère métabolique.

Dans le domaine de la recherche biologique et médicale, les traceurs utilisés sont principalement des émetteurs bêta moins purs, bien que certains émetteurs X ou gamma puissent également être employés. À titre d'exemple, nous citerons les applications suivantes :

- le marquage des glucides (carbone-14) ;
- le marquage des acides aminés, des peptides et des protéines (soufre-35) ;
- le marquage des acides nucléiques (phosphore-32, phosphore-33, tritium, soufre-35) ;
- le marquage de protéines iodées telles que les hormones thyroïdiennes (iode-125 et iode-131) ;
- l'enzymologie (calcium-45) ;
- les tests radioimmunologiques (tritium, carbone-14, iode-125) ;
- le développement de radiopharmaceutiques (technécium-99m, fluor-18 et tous les autres isotopes utilisés en médecine nucléaire) ;
- les tests d'évaluation de cytotoxicité (chrome-51), par mesure du relargage du chrome par des cellules cibles marquées ;
- le marquage de globules rouges (chrome-51) ;
- la microscopie électronique (sels d'uranium) ;
- les études sur le transport et l'accumulation des ions dans les systèmes membranaires ou en neurobiologie (sodium-22, calcium-45, fer-59, potassium-40...) ;
- la datation des objets ou des échantillons biologiques par le carbone-14 et le potassium-40.

Nous avons rassemblé dans le tableau 1.1 quelques exemples de radionucléides utilisés en biologie avec leur période, leurs émissions prépondérantes ainsi que la réaction nucléaire permettant leur production.

### **1.1.1.2. Applications dans l'industrie**

Des traceurs radioactifs, sous forme liquide ou gazeuse, permettent l'étude des transferts de masse dans les milieux naturels ou industriels par des mesures spatiales et quantitatives

- registre (gestion des sources non scellées)  
  15, 18-19, **63**, 210-211  
sources scellées 7-9, 14, 26, 105  
sûreté nucléaire 215

**T**

tâche **250**-252, 255, 259, 261, 263, 269, 272,  
  277, 280  
taux de fuite **79**

taux de renouvellement de l'air **77**, 92  
temps de résolution 110  
terme source 5, 7, 250-252, 263, 271-272,  
  286  
traceurs radioactifs / traceurs isotopiques 3, 5  
transports 13

**V**

ventilation **84**-85, 92