

IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Guide pratique

Réalisation des études dosimétriques de poste de travail présentant un risque d'exposition aux rayonnements ionisants (version 2)

DRPH/DIR n° 2010-1
Avril 2010

DIRECTION DE LA RADIOPROTECTION DE L'HOMME

L. DONADILLE, J.L. REHEL, J.M. DELIGNE, F. QUEINNEC, B. AUBERT, J.F.
BOTTOLLIÉ-DEPOIS, I. CLAIRAND, J.R. JOURDAIN, A. RANNOU

RESUME

CE GUIDE PROPOSE UNE APPROCHE METHODOLOGIQUE D'AIDE A LA REALISATION D'ETUDES DOSIMETRIQUES DE POSTE DE TRAVAIL NECESSAIRES POUR BIEN IDENTIFIER LES RISQUES D'EXPOSITION AUX RAYONNEMENTS IONISANTS, METTRE EN ŒUVRE LE PROCESSUS D'OPTIMISATION DE LA RADIOPROTECTION, CLASSER LES TRAVAILLEURS ET DELIMITER LES ZONES DE TRAVAIL. IL EST COMPLETE PAR DES RAPPELS SUR LES PRINCIPAUX OBJECTIFS ASSOCIES A L'ETUDE DE POSTE, LE CONTEXTE REGLEMENTAIRE, LES SOURCES ET MODES D'EXPOSITION ET LES GRANDEURS DOSIMETRIQUES UTILES. DES RECOMMANDATIONS RELATIVES AU CHOIX ET A L'UTILISATION DES INSTRUMENTS DE MESURE ET DES METHODES DE CALCUL SONT EGALEMENT FOURNIES. L'APPROCHE METHODOLOGIQUE GENERALE EST APPLIQUEE ET DEVELOPPEE DANS DES FICHES SPECIFIQUES, CHACUNE DEDIEE A UN DOMAINE D'ACTIVITE PARTICULIER.

ABSTRACT

THIS GUIDE PROPOSES A METHODOLOGICAL APPROACH TO HELP CARRY OUT DOSIMETRIC WORKPLACE STUDIES COMPLYING WITH THE FRENCH REGULATION, AND NECESSARY TO IDENTIFY RISKS OF RADIOLOGICAL EXPOSURE, OPTIMIZE RADIATION PROTECTION, CLASSIFY THE WORKERS INTO DIFFERENT CATEGORIES AND THE WORKPLACES INTO DIFFERENT AREAS. ADDITIONAL INFORMATION IS PROVIDED RELATING THE MAIN OBJECTIVES OF A WORKPLACE STUDY, THE FRENCH REGULATORY CONTEXT, MAIN SOURCES AND PATHWAYS OF EXPOSURE TO IONIZING RADIATION. RADIATION PROTECTION AND OPERATIONAL QUANTITIES ARE REMINDED. RECOMMENDATIONS ABOUT THE SELECTION AND USE OF DETECTORS AND ABOUT THE IMPLEMENTATION OF CALCULATION METHODS ARE ALSO PROVIDED. THE GENERAL METHODOLOGICAL APPROACH IS APPLIED AND DEVELOPED INTO "WORKPLACE SHEETS", EACH ONE DEVOTED TO A PARTICULAR TYPE OF WORKPLACE.

MOTS-CLES

RADIOPROTECTION, ETUDE DE POSTE, GUIDE PRATIQUE, CLASSEMENT DU PERSONNEL, PREVISION DE DOSES, ZONES DE TRAVAIL, OPTIMISATION

SOMMAIRE

| | |
|---|-----------|
| AVANT-PROPOS | 5 |
| INTRODUCTION | 6 |
| 1 CONCEPTS ET OUTILS..... | 7 |
| 1.1 OBJECTIF D'UNE ETUDE DOSIMETRIQUE DE POSTE DE TRAVAIL | 7 |
| 1.2 CADRE REGLEMENTAIRE ET ENJEUX | 7 |
| 1.2.1 Pourquoi ? | 7 |
| 1.2.2 Quand ? | 8 |
| 1.2.3 Comment ?..... | 8 |
| 1.3 SOURCES ET EXPOSITIONS..... | 9 |
| 1.3.1 L'exposition externe | 9 |
| 1.3.2 L'exposition interne | 9 |
| 1.4 GRANDEURS DOSIMETRIQUES | 9 |
| 1.4.1 Grandeurs de protection | 9 |
| 1.4.2 Grandeurs opérationnelles pour l'exposition externe | 10 |
| 1.4.3 Grandeurs pour l'exposition interne | 11 |
| 1.5 LIMITES REGLEMENTAIRES ANNUELLES ET DELIMITATION DES ZONES DE TRAVAIL | 11 |
| 1.6 MOYENS DE MESURE..... | 13 |
| 1.6.1 Mesure de l'exposition externe | 13 |
| 1.6.2 Mesure de la contamination | 15 |
| 1.7 OUTILS DE CALCUL POUR L'EXPOSITION EXTERNE | 15 |
| 1.8 REFERENCES UTILES..... | 16 |
| 2 APPROCHE GENERALE D'UNE ETUDE DE POSTE | 17 |
| 2.1 PREPARATION | 17 |
| 2.1.1 Installations | 17 |
| 2.1.2 Tâches..... | 17 |
| 2.2 EVALUATION DES DOSES | 18 |
| 2.2.1 Cartographie des équivalents de dose de l'installation | 18 |
| 2.2.2 Détermination des niveaux de contamination | 18 |
| 2.2.3 Dose associée à chaque tâche | 19 |
| 2.3 EXPLOITATION DES RESULTATS..... | 19 |
| 2.3.1 Dosimétrie prévisionnelle et classification du personnel | 19 |
| 2.3.2 Délimitation des zones de travail..... | 20 |
| 2.3.3 Optimisation de la radioprotection..... | 21 |
| 3 FICHES SPECIFIQUES | 22 |
| FICHE A : ETUDE DE POSTE DE TRAVAIL EN RADIOLOGIE MEDICALE | |
| CONVENTIONNELLE..... | 23 |
| A.1 PREPARATION | 23 |
| A.1.1 Description de l'installation | 23 |
| A.1.2 Evaluation des procédures (ou tâches) réalisées dans l'installation..... | 23 |

| | |
|---|-----------|
| A.2 EVALUATION DES DOSES..... | 24 |
| A.2.1 Sélection des tâches..... | 24 |
| A.2.2 Acquisition des données dosimétriques..... | 24 |
| A.2.3 Instruments de mesure..... | 25 |
| A.3 EXPLOITATION DES RESULTATS | 26 |
| A.3.1 Dosimétrie prévisionnelle et classification du personnel | 26 |
| A.3.2 Délimitation des zones de travail..... | 26 |
| A.3.3 Optimisation de la radioprotection | 27 |
| FICHE B : ETUDE DE POSTE DE TRAVAIL EN RADIOLOGIE MEDICALE | |
| INTERVENTIONNELLE..... | 28 |
| B.1 PREPARATION | 28 |
| B.1.1 Description de l'installation | 28 |
| B.1.2 Evaluation des procédures (ou tâches) réalisées dans l'installation | 28 |
| B.2 EVALUATION DES DOSES..... | 29 |
| B.2.1 Sélection des tâches..... | 29 |
| B.2.2 Acquisition des données dosimétriques..... | 29 |
| B.2.3 Instruments de mesure..... | 30 |
| B.3 EXPLOITATION DES RESULTATS..... | 33 |
| B.3.1 Dosimétrie prévisionnelle et classification du personnel | 33 |
| B.3.2 Délimitation des zones de travail..... | 33 |
| B.3.3 Optimisation de la radioprotection..... | 34 |
| FICHE C : ETUDE DE POSTE DE TRAVAIL EN MEDECINE NUCLEAIRE..... | 35 |
| C.1 PREPARATION..... | 35 |
| C.1.1 Description de l'installation..... | 35 |
| C.1.2 Evaluation des procédures (ou tâches) réalisées dans l'installation | 37 |
| C.2 EVALUATION DES DOSES..... | 38 |
| C.2.1 Sélection des tâches..... | 38 |
| C.2.2 Acquisition des données dosimétriques..... | 39 |
| C.2.2.1 Exposition externe | 39 |
| C.2.2.2 Contamination atmosphérique | 39 |
| C.2.3 Instruments de mesure..... | 40 |
| C.3 EXPLOITATION DES RESULTATS | 43 |
| C.3.1 Dosimétrie prévisionnelle et classification du personnel | 43 |
| C.3.2 Délimitation des zones de travail..... | 44 |
| C.3.3 Optimisation de la radioprotection | 46 |
| RÉFÉRENCES | 47 |

AVANT-PROPOS

Le présent document constitue la version 2 du guide pratique pour la réalisation des études dosimétriques de poste de travail présentant un risque d'exposition aux rayonnements ionisants. Il annule et remplace la version précédente (IRSN, 2007). Les principales modifications et évolutions qui ont été apportées sont listées ci-dessous :

- La recodification du code du travail a été prise en compte par la modification de l'ensemble des références aux textes réglementaires ;
- Le tableau A.II de la fiche A relative à la radiologie conventionnelle (chapitre 3) a été simplifié ;
- La fiche C relative à la médecine nucléaire (chapitre 3) a été ajoutée ;
- Les références bibliographiques ont été mises à jour et leur mode de référencement a été modifié.

Nous attirons par ailleurs l'attention sur la prochaine publication de la circulaire DGT/ASN relative aux mesures de prévention des risques d'exposition aux rayonnements ionisants (Circulaire, 2010). Cette circulaire vise à apporter une vision précise de l'ensemble des dispositions concernant les travailleurs exposés aux rayonnements ionisants.

INTRODUCTION

Dans le cadre de ses missions de veille et de formation en matière de radioprotection, l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire propose, sur la base de son retour d'expérience, un guide pratique pour la réalisation des études dosimétriques de poste de travail. Il est destiné à l'ensemble des secteurs d'activité mettant en jeu des sources de rayonnements ionisants (industrie, médical, recherche, défense).

Conformément à la réglementation, l'employeur doit procéder à une analyse des postes de travail vis-à-vis de l'ensemble des conditions pouvant affecter la santé et la sécurité des travailleurs. Lorsque les travailleurs sont susceptibles d'être exposés à des rayonnements ionisants, cette analyse doit comprendre une étude dite *dosimétrique* des postes de travail.

La réalisation de telles études nécessite la connaissance préalable de différents concepts et informations, dont les plus significatifs sont rappelés dans le premier chapitre, à savoir : les principaux objectifs associés à l'étude de poste, le contexte réglementaire, les limites réglementaires, les différents modes d'exposition, les grandeurs dosimétriques utiles, des recommandations relatives au choix et à l'utilisation des instruments de mesure et des méthodes de calcul à mettre en œuvre, ainsi que des renvois vers quelques références utiles.

Dans le deuxième chapitre, une approche méthodologique générale, développée pour être applicable à la plupart des cas, est proposée. Dans cette approche sont décrites en détail les étapes successives nécessaires à la réalisation d'une étude de poste, à savoir la phase de préparation, l'évaluation des doses et l'exploitation des résultats, avec pour objectifs principaux la classification des travailleurs, la délimitation des zones de travail et la mise en œuvre du processus d'optimisation de la radioprotection.

Le troisième chapitre du guide est organisé en une série de fiches, chacune consacrée à un domaine d'activité particulier et aux postes de travail associés. Cette partie sera complétée en fonction des besoins par l'ajout de nouvelles fiches. Chacune d'entre elles est structurée suivant l'approche méthodologique précédemment définie, les aspects spécifiques aux postes de travail considérés étant développés, et des valeurs de doses étant également présentées à titre indicatif. Pour ce qui concerne plus particulièrement la classification des travailleurs et la délimitation des zones de travail, les exemples donnés ont pour seul objectif d'illustrer la démarche présentée.

1 CONCEPTS ET OUTILS

1.1 OBJECTIF D'UNE ETUDE DOSIMETRIQUE DE POSTE DE TRAVAIL

L'objectif d'une étude de poste de travail¹ est d'évaluer, dans des conditions normales² de travail, les doses susceptibles d'être délivrées au personnel, consécutives à des expositions externes et internes aux rayonnements ionisants. L'étude permet d'identifier un danger et d'estimer un risque afin de mettre en œuvre les actions de prévention adaptées et d'apporter des éléments pour la gestion d'incidents éventuels.

Les doses liées à l'exposition externe délivrées aux travailleurs sont évaluées sur la base de la connaissance des caractéristiques des champs de rayonnements au poste de travail (nature, débit, énergie, caractéristiques spatiale et temporelle) ainsi que des tâches³ qui y sont réalisées.

L'étude de poste doit également permettre d'identifier l'existence d'un risque d'exposition interne, conséquence d'une incorporation de radionucléides dans l'organisme, afin de mettre en œuvre les actions de prévention adéquates et la détection de la contamination radioactive atmosphérique et surfacique.

L'étude de poste, par l'évaluation des doses interne et externe, vise à fournir à l'employeur et au médecin du travail les éléments nécessaires pour :

- mettre en place les équipements de protection collective et les consignes de sécurité,
- délimiter les zones réglementées (zones surveillée, contrôlée, spécialement réglementée, interdite),
- renseigner la fiche d'exposition associée au poste de travail,
- le cas échéant, définir les équipements de protection individuelle,
- déterminer le classement du personnel (A, B, non exposé),
- choisir les techniques dosimétriques adaptées aux conditions d'exposition et définir les modalités de surveillance dosimétrique individuelle et d'ambiance.

De manière plus générale, l'étude de poste apporte les données nécessaires à l'optimisation de la radioprotection.

1.2 CADRE REGLEMENTAIRE ET ENJEUX

1.2.1 POURQUOI ?

La réglementation en vigueur relative à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants intègre la transposition de la directive 96/29/Euratom (Directive, 1996) dans le droit français. Ces dispositions sont insérées dans le code du travail.

L'étude de poste est imposée par la réglementation et en est l'un des éléments principaux. La notion d'étude ou d'analyse de poste est introduite dans le code du travail, notamment par l'article R. 4451-11 : « *Dans le cadre de*

¹ Un poste de travail est, pour l'application de ce guide, défini comme un espace organisé et équipé en vue de l'exécution d'une ou de plusieurs tâches. Il peut être constitué d'un ou de plusieurs équipements, chacun pouvant contenir des sources de rayonnements ionisants de natures et débits différents. Les opérateurs travaillant à un même poste de travail et ayant des activités similaires sont donc supposés être soumis aux mêmes types de risques.

² Les conditions normales de travail concernent les conditions habituelles ou bien celles liées à un incident (voir Circulaire, 2010 pour des précisions sur la notion d'incident).

³ Une tâche correspond à un ensemble d'opérations effectuées dans un but précis, comme par exemple la fabrication de crayons de combustible dans l'industrie nucléaire, ou la réalisation d'un cliché derrière un équipement de protection collective en radiologie.

l'évaluation des risques, l'employeur [...] procède à une analyse des postes de travail qui est renouvelée périodiquement et à l'occasion de toute modification des conditions pouvant affecter la santé et la sécurité des travailleurs. [...] ».

L'étude de poste est un élément essentiel pour s'assurer du respect des limites réglementaires et du principe d'optimisation de la radioprotection (article R. 4451-10). Elle intervient pour définir la délimitation des zones (articles R. 4452-1 et R. 4452-3) et la classification des travailleurs (articles R. 4453-1 à R. 4453-3). Les choix faits permettent de statuer sur le suivi individuel par dosimétrie passive et, le cas échéant, par l'évaluation de l'exposition interne (article R. 4453-19), et sur le suivi par dosimétrie opérationnelle (article R. 4453-24). L'arrêté du 30 décembre 2004, pris en application de l'article R. 4454-11, relatif à la carte individuelle de suivi médical, prévue à l'article R. 4454-10, et aux informations individuelles de dosimétrie des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants (Arrêté, 2004), spécifie que les dosimètres individuels mis en œuvre, qu'ils soient passifs ou opérationnels, « *doivent permettre de mesurer [...] les rayonnements ionisants révélés par l'analyse des postes de travail et doivent être compatibles avec les conditions de travail envisagées* ».

L'étude de poste permet en outre de définir le programme des contrôles techniques d'ambiance comprenant les mesures continues ou périodiques des débits de dose externe, de la concentration de l'activité dans l'air et de la contamination des surfaces (article R. 4452-13).

L'étude de poste relève de la responsabilité de l'employeur, qui en confie la réalisation à la personne compétente en radioprotection (PCR) mentionnée à l'article R. 4456-1. En outre, conformément à l'article R. 4456-10, la PCR est également chargée de définir sur cette base « *les mesures de protection adaptées à mettre en œuvre* » ainsi que « *les moyens nécessaires requis en cas de situation anormale* ».

Enfin, les résultats de l'étude de poste interviennent pour renseigner la fiche d'exposition établie par l'employeur (article R. 4453-14) et utilisée par le médecin du travail (article R. 4454-1) qui statue sur l'aptitude médicale et les modalités de surveillance médicale de chaque travailleur.

1.2.2 QUAND ?

Une étude de poste doit être réalisée avant la mise en service de tout nouveau poste de travail, puis périodiquement, ainsi qu'à l'occasion de toute évolution notable d'un poste (article R. 4451-11).

1.2.3 COMMENT ?

Pour réaliser l'étude, l'employeur procède, avec l'appui de la PCR et du médecin du travail, à une évaluation des doses de rayonnements susceptibles d'être reçues au poste de travail.

Ces évaluations peuvent être réalisées à partir de mesures au poste de travail ou de calculs numériques. Afin de consolider les résultats de l'étude, l'employeur peut se référer à des études réalisées à des postes similaires, ainsi qu'au retour d'expérience sur la dosimétrie au poste de travail. Ce dernier est notamment constitué de l'historique des données dosimétriques individuelles externes (dosimétries passive et opérationnelle), internes (anthroporadiamétrie, radiotoxicologie) et d'ambiance, y compris les résultats de contrôles réglementaires.

Pour un poste de travail en phase de conception, les évaluations dosimétriques sont conduites à l'aide de calculs numériques et en s'appuyant, lorsque c'est possible, sur le retour d'expérience de postes équivalents.

1.3 SOURCES ET EXPOSITIONS

Selon les sources et les circonstances, le travailleur peut être exposé à des rayonnements ionisants par voies externe et interne.

1.3.1 L'EXPOSITION EXTERNE

Il y a *exposition externe* (ou *irradiation*) chaque fois qu'une personne se trouve placée sur le trajet de rayonnements ionisants émis par un appareil ou par des substances radioactives situés à l'extérieur du corps. Les rayonnements émis peuvent atteindre cette personne soit directement, soit indirectement après réflexion sur les parois du local, sur les objets qu'ils rencontrent, ou diffusion dans ces parois et objets. Selon les cas, une partie plus ou moins grande de l'organisme peut être atteinte par les rayonnements (irradiation globale ou partielle).

La contamination externe (substances radioactives déposées sur les vêtements ou sur la peau) peut également constituer une source d'exposition externe.

1.3.2 L'EXPOSITION INTERNE

Il y a *exposition interne* chaque fois que des substances radioactives pénètrent dans l'organisme d'une personne. Les substances radioactives peuvent pénétrer dans l'organisme d'une personne de diverses manières :

- par inhalation, lorsque les substances radioactives sont en suspension dans l'air respiré,
- par ingestion, lorsque des substances radioactives sont, par exemple, contenues dans des liquides ou des aliments absorbés, ou déposées sur un objet porté à la bouche,
- par blessure avec un objet contaminé, ou lorsque des substances radioactives viennent souiller une blessure déjà existante ; c'est pourquoi, en cas d'écorchures ou d'affections dermatologiques, il est interdit d'accéder à une zone où il existe un risque de contamination sans un avis médical,
- par absorption cutanée dont l'importance dépend du caractère lipophile de la substance radioactive.

Une fois incorporées, les substances radioactives se distribuent dans l'organisme. Selon leur nature physico-chimique, ces substances sont susceptibles de s'accumuler dans les organes ou les tissus pour lesquels elles présentent un tropisme particulier et qu'elles irradient lors de leur désintégration.

1.4 GRANDEURS DOSIMETRIQUES

En radioprotection, deux familles de grandeurs dosimétriques sont définies : les *grandeurs de protection* et les *grandeurs opérationnelles*. Elles sont définies dans les recommandations des publications 60 (ICRP, 1992) et 103 (ICRP, 2007) de la Commission internationale de protection radiologique (ICRP), et dans le rapport 57 (ICRU, 1996) de la Commission internationale des unités et mesures de rayonnements (ICRU). Ces grandeurs s'expriment en sievert (Sv).

1.4.1 GRANDEURS DE PROTECTION

Les grandeurs de protection, à savoir la *dose équivalente à l'organe* et la *dose efficace*, sont associées aux *doses absorbées* dans l'organisme résultant d'une exposition externe ou interne. Ces grandeurs ne sont pas directement mesurables, mais c'est à elles que s'appliquent les limites réglementaires, tant pour les doses reçues annuellement par les travailleurs que pour la délimitation des zones de travail.

Pour un organe exposé à des rayonnements ionisants de types et d'énergies différents, la *dose équivalente à l'organe* est une somme pondérée des doses absorbées, exprimées en gray (Gy), dans cet organe associées aux divers rayonnements. La dose absorbée associée à chaque rayonnement d'un type et d'une énergie donnée est multipliée par le facteur de pondération pour le rayonnement correspondant qui tient compte, aux faibles doses, de la différence d'effet que peut induire chaque type de rayonnement. La dose équivalente H_T à l'organe T s'écrit :

$$H_T = \sum_R w_R \times D_{T,R} , \quad (1)$$

où w_R est le facteur de pondération pour le rayonnement R et $D_{T,R}$ la dose absorbée dans l'organe ou tissu T exposé au rayonnement R .

La *dose efficace* est la somme des doses équivalentes aux différents organes et tissus du corps, multipliées par des facteurs de pondération pour les organes et tissus qui rendent compte de la radiosensibilité des organes et tissus considérés. La dose efficace E s'écrit :

$$E = \sum_T w_T \times H_T , \quad (2)$$

où w_T est le facteur de pondération pour l'organe ou tissu T .

1.4.2 GRANDEURS OPERATIONNELLES POUR L'EXPOSITION EXTERNE

Les grandeurs opérationnelles sont utilisées pour la surveillance de zone et la surveillance individuelle vis-à-vis de l'exposition externe aux rayonnements. Elles sont conçues pour être mesurables au poste de travail et sont des estimateurs des grandeurs de protection. Elles sont mesurées par des instruments étalonnés (dosimètres individuels, radiamètres, etc.) et peuvent être comparées aux limites réglementaires.

Pour la surveillance de zone, la grandeur opérationnelle appropriée est l'*équivalent de dose ambiant* $H^*(d)$, alors que pour la surveillance individuelle on définit l'*équivalent de dose individuel* $H_p(d)$, d étant la profondeur dans le corps (mm) à laquelle la dose absorbée est évaluée.

On utilise en pratique $H^*(10)$ et $H_p(10)$ pour respectivement la surveillance de zone et la surveillance individuelle en tant qu'estimateurs de la dose efficace E , ainsi que $H_p(0,07)$ et $H_p(3)$ en tant qu'estimateurs des doses équivalentes respectivement à la peau H_{peau} et au cristallin $H_{\text{cristallin}}$. La dose équivalente à la peau est la grandeur qu'il convient d'estimer dans le cas des extrémités (mains, avant-bras, pieds et chevilles).

Le tableau I résume les liens entre grandeurs opérationnelles et grandeurs de protection. Ont été ajoutées les grandeurs physiques K_a et ϕ , désignant respectivement le kerma dans l'air (Gy) et la fluence particulaire (m^{-2}). Ces dernières peuvent également être mesurées au poste de travail car elles permettent, via l'utilisation des coefficients de conversion appropriés, de déduire les grandeurs opérationnelles H^* et H_p , ainsi que les grandeurs de protection. La mesure de K_a est en général réalisée pour les champs photoniques, celle de ϕ pour les champs neutroniques, et ces grandeurs physiques sont utilisées pour l'évaluation de $H^*(10)$. Pour le lecteur intéressé, les valeurs des coefficients de conversion ont été publiées pour différents types de champs et d'énergies dans le rapport 57 de l'ICRU (ICRU, 1998), ainsi que dans la publication 74 de l'ICRP (ICRP, 1996).

Tableau I. Liens entre grandeurs opérationnelles et physiques mesurables pour l'exposition externe H^* , H_p , K_a , ϕ et grandeurs de protection E , H , et type de surveillance correspondant.

| Grandeurs opérationnelle et physique | Unité | Grandeur de protection estimée (Sv) | Type de surveillance |
|--------------------------------------|-----------------|--|---|
| $H^*(10)$ | Sv | E | de zone |
| $H_p(10)$ | Sv | E | individuelle |
| $H^*(0,07)$ | Sv | H_{peau} | de zone |
| $H_p(0,07)$ | Sv | H_{peau} | individuelle |
| $H_p(3)$ | Sv | $H_{\text{cristallin}}$ | individuelle |
| K_a | Gy | E , H_{peau} ou $H_{\text{cristallin}}$ selon le coefficient de conversion appliqué | de zone ou individuelle, suivant le cas |
| ϕ | m^{-2} | E , H_{peau} ou $H_{\text{cristallin}}$ selon le coefficient de conversion appliqué | de zone ou individuelle, suivant le cas |

1.4.3 GRANDEURS POUR L'EXPOSITION INTERNE

On définit la *dose équivalente engagée* et la *dose efficace engagée*. Ces deux grandeurs dosimétriques représentent respectivement les doses reçues au niveau d'un organe ou d'un tissu (H_{50}) et au niveau du corps entier (E_{50}), soit jusqu'à la décroissance totale du ou des radionucléides incorporés, soit jusqu'à 50 ans après l'incorporation pour les radionucléides de période longue.

Ces grandeurs sont évaluées en pratique sur la base d'une activité mesurée ou calculée au niveau du poste de travail (contamination surfacique et atmosphérique) ou à partir de mesures individuelles *in vitro* (radiotoxicologie) ou *in vivo* (anthroporadiométrie).

La dose efficace engagée qu'entraîne l'incorporation de 1 Bq est appelée *dose par unité d'incorporation (DPUI)* et s'exprime en $\text{Sv}\cdot\text{Bq}^{-1}$. Ces DPUI ont été publiées pour les différents radionucléides en fonction de la forme physico-chimique des particules contaminantes dans l'arrêté du 1^{er} septembre 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants (Arrêté, 2003).

En pratique, la dose efficace engagée en présence d'une contamination volumique de l'air s'obtient en multipliant l'activité inhalée par la DPUI correspondante. Cette activité inhalée est calculée à partir de l'activité volumique de l'air ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$), mesurée ou calculée, du débit respiratoire de l'individu ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$) et du temps d'exposition.

1.5 LIMITES REGLEMENTAIRES ANNUELLES ET DELIMITATION DES ZONES DE TRAVAIL

Les limites réglementaires de doses reçues par les travailleurs exposés⁴ sont spécifiées dans les articles R. 4451-12 et R. 4451-13 du code du travail, ainsi que dans les articles D. 4152-5, D. 4152-7 et D. 4153-34 respectivement pour les femmes enceintes, les femmes allaitant et les jeunes travailleurs âgés de 16 à 18 ans. Ces limites sont rappelées dans le tableau II. Ce sont des limites infractionnelles qui ne constituent pas une autorisation à délivrer

⁴ Est considéré comme travailleur exposé tout travailleur susceptible de dépasser, dans le cadre de son activité professionnelle, l'une des valeurs limites de dose fixées pour le public, quelles que soient les conditions de réalisation de l'opération ; habituelles ou bien liées à un incident (Circulaire, 2010).

ou à recevoir des doses jusqu'à ces valeurs. En tout état de cause, maintenir les doses en-deçà de ces limites ne dispense pas d'appliquer le principe d'optimisation énoncé à l'article L. 1333-1 du code de la santé publique et rappelé dans l'article R. 4451-10 du code du travail.

Tableau II. Limites réglementaires pour les travailleurs exposés (articles R. 4451-12, R. 4451-13, D. 4152-5, D. 4152-7 et D. 4153-34 du code du travail).

| Grandeur de protection | | Travailleur de catégorie A | Travailleur de catégorie B et jeune travailleur de 16 à 18 ans | Femme enceinte (grossesse déclarée) | Femme allaitant |
|-------------------------------|--|-------------------------------|--|---|--|
| | | (mSv sur 12 mois) | (mSv sur 12 mois) | | |
| Dose efficace ⁵ | | 20 | 6 | | |
| Dose équivalente ⁵ | mains, avant-bras, pieds et chevilles | 500 | 150 | l'exposition de l'enfant à naître doit rester inférieure à 1 mSv | ne doit pas être soumise à un risque d'exposition interne |
| | peau [#] | 500 | 150 | | |
| | cristallin | 150 | 45 | | |

⁵ Exposition externe et interne

[#] Applicable sur toute surface de 1 cm²

Les modalités de délimitation de zones sont fixées dans l'arrêté du 15 mai 2006 relatif aux conditions de délimitation et de signalisation des zones surveillées et contrôlées et des zones spécialement réglementées ou interdites compte tenu de l'exposition aux rayonnements ionisants, ainsi qu'aux règles d'hygiène, de sécurité et d'entretien qui y sont imposées (Arrêté, 2006). Cet arrêté est pris en application de l'article R. 4452-10 du code du travail. Des informations complémentaires pour la mise en œuvre de cet arrêté peuvent être trouvées dans la circulaire DGT/ASN n° 1 du 18 janvier 2008 (Circulaire, 2008).

La délimitation des zones de travail est déterminée en ne considérant pas le port, éventuel, d'équipements de protection individuelle⁵ (article 2), seuls les équipements de protection collective⁶ étant à prendre en compte.

Conformément aux articles 5 et 7, l'employeur délimite autour des sources de rayonnements ionisants, sur la base du résultat des évaluations dosimétriques, des zones contrôlées, surveillées et des zones spécialement réglementées ou interdites. Les valeurs limites de doses associées à ces zones sont rappelées dans le tableau IIIa.

Il est rappelé que la délimitation des zones de travail ainsi réalisée doit *in fine* satisfaire les dispositions prévues à l'article R. 4452-1 du code du travail (voir tableau IIIb) pour ce qui concerne les doses susceptibles d'être reçues par les travailleurs en une année.

⁵ Par équipement de protection individuelle on entend un équipement porté par le travailleur qu'il protège. A titre d'exemple on peut citer : tablier plombé, cache-thyroïde, gants, combinaison, masque respiratoire, etc.

⁶ Par équipement de protection collective on entend un équipement attaché à l'installation. A titre d'exemple on peut citer : murs, écran plombé fixe, bas-volet plombé, suspension plafonnrière plombée, protège-seringue, ventilation, etc.

Tableau IIIa. Limites réglementaires pour la délimitation des zones de travail (articles 5 et 7 de l'arrêté du 15 mai 2006 ; Arrêté, 2006).

| Zone | Unité | Limite de dose efficace [§] | Limite de dose équivalente [#] | Unité | Débit d'équivalent de dose au corps entier | |
|---------------------------|------------------|--------------------------------------|---|---------------------|--|-----|
| Attenante | mSv par mois | 0,08 | - | - | - | |
| Surveillée | mSv en une heure | 0,0075 | 0,2 | - | - | |
| Contrôlée verte | mSv en une heure | 0,025 | 0,65 | - | - | |
| Spécialement réglementée | contrôlée jaune | mSv en une heure | 2 | 50 | mSv.h ⁻¹ | 2 |
| | contrôlée orange | mSv en une heure | 100 | 2 500 | mSv.h ⁻¹ | 100 |
| Interdite, désignée rouge | mSv en une heure | ≥ 100 | ≥ 2 500 | mSv.h ⁻¹ | ≥ 100 | |

[§] Exposition externe et interne

[#] Exposition externe des extrémités (mains, avant-bras, pieds, chevilles)

Tableau IIIb. Limites réglementaires pour la délimitation des zones de travail (article R. 4452-1 du code du travail).

| Zone | Unité | Limite de dose efficace [§] | Limite de dose équivalente [§] | | |
|------------|-----------------|--------------------------------------|---|-------------------|------------|
| | | | mains, avant-bras, pieds, chevilles | peau [#] | cristallin |
| Attenante | mSv sur 12 mois | 1 | 50 | 50 | 15 |
| Surveillée | mSv sur 12 mois | 6 | 150 | 150 | 50 |

[§] Exposition externe et interne

[#] Applicable sur toute surface de 1 cm²

1.6 MOYENS DE MESURE

De façon générale, les instruments utilisés pour réaliser l'étude de poste doivent être adaptés aux modes d'exposition (externe ou interne), aux types de rayonnements rencontrés, à leur intensité (activité, débit de dose), à leurs caractéristiques énergétiques et directionnelles, aux caractéristiques des éventuels contaminants, ainsi qu'aux conditions environnementales (Arrêté, 2005). Les manuels fournis par les constructeurs permettent de connaître les caractéristiques techniques et les domaines d'utilisation des instruments. Les conditions dans lesquelles ces instruments ont été étalonnés doivent également figurer sur leur certificat d'étalonnage.

1.6.1 MESURE DE L'EXPOSITION EXTERNE

Les moyens de mesure des doses externes peuvent être classés en deux catégories, les détecteurs *passifs* comme par exemple les dosimètres individuels portés à la poitrine et les détecteurs *actifs* (ou *électroniques*) comme les dosimètres opérationnels et les radiamètres d'ambiance portatifs.

Les principaux détecteurs passifs fonctionnent sur le principe de l'émulsion photographique, de la thermoluminescence (TLD), de la photoluminescence stimulée optiquement (OSL), ou de la radiophotoluminescence (RPL). Pour les neutrons, il convient d'ajouter les détecteurs solides de traces (DST). Ces techniques sont couramment utilisées pour la dosimétrie individuelle des travailleurs. Outre leurs possibilités de mémorisation de la dose reçue, ils offrent l'avantage de ne pas être limités en termes de débit de dose instantané. Leur principal inconvénient réside dans la lecture et l'analyse en différé de la dose. Bien que permettant une lecture de la dose reçue en temps réel, le dosimètre à bulles utilisé pour la dosimétrie des neutrons peut être rangé dans cette catégorie.

Parmi les détecteurs actifs, peuvent être cités les compteurs constitués d'une chambre polarisée électriquement et remplie d'un gaz (chambre d'ionisation, compteur proportionnel, tube Geiger-Müller), les cristaux semi-

conducteurs (silicium, germanium, etc.), et les détecteurs à scintillation (iodure de sodium, plastiques, etc.). Les dosimètres basés sur ces détecteurs offrent l'avantage de permettre une lecture en temps réel de la dose et du débit de dose mesurés, et de disposer de fonctionnalités d'alarme sonore et, éventuellement, visuelle. Leur principal inconvénient réside dans la limitation de leur gamme de fonctionnement, notamment en termes de débit de dose instantané.

De manière générale, il est important de connaître les gammes de fonctionnement des instruments en dose intégrée et en débit de dose instantané, ainsi que les courbes de réponse en énergie, en dose et directionnelle.

Dans le cas de sources pulsées de rayonnements ionisants, ou associées à des temps d'exposition très courts (inférieurs à la dizaine de secondes), si un instrument actif est utilisé on privilégiera des mesures en dose intégrée plutôt qu'en débit car ces dernières nécessitent en général un temps au minimum de l'ordre de la dizaine de secondes pour se stabiliser. Par ailleurs, il est important de souligner que les débits de dose *crête*, c'est-à-dire ceux existant durant chacune des impulsions, peuvent, dans certains cas, être plus élevés que le débit maximal toléré par l'instrument, et ce bien que le débit de dose moyenné sur plusieurs impulsions (à l'échelle de la seconde par exemple) puisse rester dans la gamme de fonctionnement du détecteur. Ceci occasionne une sous-estimation, parfois très élevée, des doses réelles (et des débits de dose) : l'utilisation de détecteurs passifs doit alors être privilégiée.

Dans le cas de sources à émission continue, les mesures pourront être faites en débit de dose ou en dose intégrée.

Tableau IV. Principales caractéristiques des détecteurs utilisés pour la mesure des doses d'ambiance associées aux rayonnements X, γ et β .

| Type de détecteur | Chambre d'ionisation | Compteur proportionnel | Tube G.M. | Scintillateur |
|----------------------------|--|--|---|--|
| Rayonnements | X, γ , β | X, γ , β | X, γ , β | X, γ |
| Grandeurs | H*(10) ou H*(0,07) suivant l'épaisseur de la paroi | H*(10) | H*(10) | H*(10) |
| Equivalent de dose | quelques 10 μ Sv à quelques 10 Sv | quelques μ Sv à quelques Sv | quelques 10 nSv à quelques 100 mSv | quelques 10 nSv à quelques mSv |
| Débit d'équivalent de dose | quelques 10 μ Sv.h ⁻¹ à quelques 10 Sv.h ⁻¹ | quelques 10 nSv.h ⁻¹ à quelques 100 mSv.h ⁻¹ | quelques nSv.h ⁻¹ à quelques 10 mSv.h ⁻¹ | quelques 10 nSv.h ⁻¹ à quelques 10 mSv.h ⁻¹ |
| Energie | X, γ : > quelques keV β : > 100 keV | X, γ : > quelques 10 keV β : > 100 keV | X, γ : > quelques 10 keV β : > quelques 10 keV | X, γ : > quelques 10 keV |
| Utilisations | - surveillance, - mesure | - surveillance, - mesure | - balises, - recherche de sources, - mesures relatives | - balises, - recherche de sources, - mesures relatives |
| Avantages | - interprétation facile de la lecture (bonne "équivalence tissu"), - large gamme possible de doses et de débits de dose selon le volume | - interprétation facile de la lecture (bonne "équivalence tissu") | - sensibilité, - robustesse, - bonne stabilité vis-à-vis des conditions environnementales | - sensibilité, - bonne stabilité vis-à-vis des conditions environnementales |
| Inconvénients | - sensibilité aux chocs, - volumineux (volume fonction de la sensibilité attendue), - légèrement sensible aux conditions environnementales | - sensibilité aux chocs, - volumineux (volume fonction de la sensibilité attendue), - légèrement sensible aux conditions environnementales | - sensibilité fonction du type et de l'énergie du rayonnement, - possibilité de saturation (effet du temps mort) | - sensibilité fonction du type et de l'énergie du rayonnement |

Le tableau IV compare les principales caractéristiques des différents types d'instruments utilisés pour la surveillance de zone vis-à-vis des rayonnements X, γ et β . Il convient de préciser que les valeurs indiquées ne sont que des ordres de grandeur et que, pour un type de détecteur donné, les caractéristiques de détection fournies par les constructeurs peuvent varier de façon substantielle par rapport à celles présentées dans le tableau. Par exemple, la sensibilité des compteurs gazeux aux photons dépend fortement du volume de détection. De plus, en complément de radiamètres commercialisés, des sondes spécifiques sont fréquemment proposées pour en modifier certaines caractéristiques comme la gamme de mesure ou le type de particules détectées. On rappelle également

que chaque instrument doit être étalonné à une énergie compatible avec la gamme rencontrée au poste de travail. Dans le cas des neutrons, la surveillance de zone est généralement faite au moyen de compteurs proportionnels à ^3He ou BF_3 entourés d'un modérateur ou, pour des applications spécifiques, de compteurs proportionnels entourés d'un convertisseur dits *équivalent-tissu*.

Pour des informations plus détaillées sur l'instrumentation en radioprotection, le lecteur peut notamment se reporter aux livres de Knoll (1989) et de Gambini et Granier (2004) ainsi que, plus spécifiquement pour la dosimétrie individuelle, aux articles de Rannou *et al.* (1998), Thévenin (2003) et Bottollier-Depois *et al.* (2007). Relevons également quelques articles récents consacrés à l'évaluation de la réponse des dosimètres opérationnels pour les champs de rayonnements particuliers de la radiologie médicale (Clairand *et al.*, 2008 ; Bordy *et al.*, 2008 ; Ankerhold, Hupe, Ambrosi, 2009) et à la problématique de la dosimétrie des extrémités dans le secteur médical (Vanhavere *et al.*, 2008 ; Donadille *et al.*, 2008 ; Ginjaume *et al.*, 2008 ; Carinou *et al.*, 2008).

1.6.2 MESURE DE LA CONTAMINATION

La mesure de la contamination surfacique peut être réalisée de deux manières, soit directement par un contaminamètre donnant une lecture en $\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-2}$, soit indirectement par frottis suivi d'un comptage d'activité (Bq), en ayant pris soin de définir une surface standard (cm^2) et un rendement de frottis représentatif des conditions de prélèvement (ISO, 1988). Par ailleurs, des précautions particulières doivent être prises dans le cas des émetteurs alpha, compte tenu du faible parcours de ces particules dans l'air (des particules alpha de 5 MeV d'énergie ont un parcours dans l'air de 3,6 cm).

La contamination atmosphérique est mesurée à partir de prélèvements d'air sur un système de piégeage (filtre, cartouche à charbon actif dans le cas de l'iode) qui doit être adapté tant à la nature des contaminants (gaz, aérosols, poussières) qu'à la granulométrie des aérosols ou des poussières. Afin que l'échantillon prélevé soit représentatif du volume d'air inhalé, une attention particulière doit être notamment portée au débit et à la position de prélèvement, cette dernière devant être au plus près de celle(s) occupée(s) par les opérateurs.

Le lecteur intéressé par davantage d'informations sur les stratégies de surveillance et les techniques d'échantillonnage de l'atmosphère au poste de travail pourra utilement consulter l'ouvrage de Renoux et Boulaud (1998).

1.7 OUTILS DE CALCUL POUR L'EXPOSITION EXTERNE

La délimitation des zones de travail et l'évaluation des doses reçues par les travailleurs, doivent prendre en compte la configuration du poste de travail (géométrie, nature des matériaux) et la nature des rayonnements.

A cette fin, les méthodes de calcul mises en œuvre peuvent faire appel à des codes évolués (déterministes, stochastiques ou Monte Carlo), dont l'exploitation nécessite des compétences spécifiques et est donc à réserver à l'utilisateur averti. L'approche par calculs est mise en œuvre lors de la conception de nouveaux postes de travail et sert d'appui à la mesure pour des postes en opération. Dans tous les cas, les résultats de calculs doivent au final être comparés à des données mesurées au poste de travail.

On peut toutefois citer une technique fréquemment employée pour estimer les doses reçues et extrapoler des mesures de dose : la loi dite en $1/d^2$, dont l'intérêt et la popularité résident dans sa simplicité. Elle repose sur l'application de la diminution de l'intensité du rayonnement en proportion de l'inverse du carré de la distance à la

source émettrice. Elle est applicable pour les photons (X, γ) et les neutrons lorsque les caractéristiques de la source et du poste de travail sont simples : source ponctuelle (en pratique, source de petites dimensions par rapport à la distance à cette source), émission isotrope et faible rayonnement diffusé. Elle ne prend pas en compte l'atténuation des rayonnements dans la matière, ni la production éventuelle de rayonnements secondaires. En raison de ses limitations, les extrapolations qu'elle permet d'effectuer doivent être considérées en tant qu'approximation des doses. Notons enfin que la loi en $1/d^2$ n'est pas applicable pour les particules chargées, comme les rayonnements bêta (électrons, positons) et alpha.

1.8 REFERENCES UTILES

En complément des concepts et outils présentés dans ce chapitre, des informations utiles peuvent être plus particulièrement trouvées dans les documents et sites Internet listés ci-dessous :

- le livre « Radiobiologie et radioprotection » de Tubiana et Lallemand (2002) dans la collection Que sais-je ?,
- le « Manuel pratique de radioprotection », déjà cité, de Gambini et Granier (2004),
- le premier volume de la collection « Personne compétente en radioprotection », édité par l'Institut national des sciences et techniques nucléaires (INSTN, www.instn.fr), de Jimonet et Métivier (coordonnateurs) (2007),
- le livre « Radiation detection and measurement » de Knoll (1989), plus spécifiquement consacré à l'instrumentation,
- le « Guide pratique Radionucléides & Radioprotection » de Delacroix, Guerre et Leblanc (2006), fournissant des informations pratiques et chiffrées sur un grand nombre de radionucléides manipulés sous la forme de sources non scellées,
- le document publié par l'Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles (INRS, www.inrs.fr) développant les aspects de la prévention en entreprise concernant les processus mettant en œuvre des rayonnements ionisants (Servent, Gauron et Boulay, 2006), ainsi que les brochures « Radioprotection : radionucléides » et les « fiches d'aide à l'analyse des risques », téléchargeables depuis le site Internet du même institut,
- l'ensemble des textes réglementaires (code du travail, code de la santé publique, etc.) consultables en ligne sur www.legifrance.gouv.fr ou www.asn.fr, en particulier la circulaire DGT/ASN relative aux mesures de prévention des risques d'exposition aux rayonnements ionisants (Circulaire, 2010), prochainement publiée,
- enfin les contributions aux diverses manifestations organisées par la Société française de radioprotection (SFRP, www.sfrp.asso.fr).

2 APPROCHE GENERALE D'UNE ETUDE DE POSTE

Ce chapitre présente une méthode générale d'évaluation de la dose liée aux expositions externe et interne au poste de travail. Elle se décline en trois phases :

- la préparation de l'étude,
- l'évaluation des doses,
- l'exploitation des résultats obtenus.

Cette méthode constitue la structure de base des fiches présentées au chapitre 3 et consacrées spécifiquement à différentes catégories de postes.

2.1 PREPARATION

La phase de préparation de l'étude de poste consiste à recueillir des informations relatives d'une part à l'installation qui comprend la ou les sources produisant des rayonnements ionisants et les dispositifs de protection associés, d'autre part aux tâches effectuées à ce poste par le personnel.

Afin de prendre en compte les pratiques professionnelles dont la fréquence et la nature sont susceptibles de varier dans le temps, une moyenne sur une période représentative peut être effectuée.

2.1.1 INSTALLATIONS

Chaque installation doit être identifiée, décrite et faire l'objet d'une analyse spécifique, qui consiste à :

- identifier la ou les sources de rayonnements,
- caractériser les champs de rayonnements associés (géométrie, nature du rayonnement, énergie, débit, orientation, etc.),
- identifier la contamination surfacique ou atmosphérique existante ou potentielle, en précisant la nature des radionucléides et les formes physico-chimiques associées,
- relever les paramètres d'utilisation des installations électriques génératrices de rayonnements ionisants,
- identifier et caractériser les éléments présents contribuant à la protection collective (parois, matériaux, écrans, ventilations),
- réaliser un schéma à l'échelle des installations sur lequel sont représentés les sources de rayonnements et les éléments de protection collective.

2.1.2 TACHES

Il s'agit d'identifier les différentes tâches liées à un poste de travail en prenant en compte les paramètres importants du point de vue de la radioprotection, c'est-à-dire les notions de temps, de distance et d'écran :

- durée et fréquence des tâches,
- positions correspondantes des travailleurs (gestes et postures) par rapport à la source, et organes exposés,
- dispositifs de protection individuelle mis en œuvre.

2.2 EVALUATION DES DOSES

L'évaluation des doses doit être effectuée dans des conditions réalistes du poste de travail, c'est-à-dire telles qu'elles se présentent lors du fonctionnement normal de l'installation.

Les données nécessaires à l'évaluation des doses peuvent être issues de mesures, de calculs, de données publiées dans la littérature, et de l'analyse du retour d'expérience du fonctionnement de l'installation (historique dosimétrique par exemple).

Trois étapes sont ici proposées, à savoir :

- établissement de la cartographie des équivalents de dose,
- s'il y a lieu, détermination des niveaux de contamination associés,
- détermination de la dose pour chaque tâche.

Les résultats de ces différentes évaluations seront exploités pour définir la classification du personnel, délimiter les zones de travail et contribuer à l'optimisation de la radioprotection.

2.2.1 CARTOGRAPHIE DES EQUIVALENTS DE DOSE DE L'INSTALLATION

Les débits d'équivalent de dose doivent être calculés ou mesurés aux points représentatifs des positions occupées par les travailleurs, ainsi qu'en des points permettant d'établir la cartographie dosimétrique des locaux dans la zone d'évolution des travailleurs.

Les évaluations visant à classer le personnel sont effectuées en tenant compte du port éventuel d'équipements de protection individuelle, comme par exemple derrière un tablier plombé.

Notons que pour certaines installations (salles de radiologie médicale, certains accélérateurs de particules, etc.), une mesure directe de débit peut être rendue très difficile, voire impossible compte tenu des techniques disponibles, en particulier en raison de très courtes durées d'irradiation (un cliché en radiologie par exemple), ou du caractère pulsé de l'installation (cf. paragraphe 1.6.1). Il convient dans ce cas d'effectuer une mesure d'équivalent de dose en mode intégration sur la durée totale de l'irradiation. Si l'équivalent de dose est alors divisé par la durée effective totale de l'irradiation, c'est le débit instantané, c'est-à-dire celui présent en cours d'impulsion, qui est déterminé. Si la division est faite par la durée de mesure, le résultat correspond à un débit moyen, c'est-à-dire prenant en compte les périodes d'absence d'irradiation entre chaque impulsion.

2.2.2 DETERMINATION DES NIVEAUX DE CONTAMINATION

L'évaluation des niveaux de contamination atmosphérique ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) de chacun des radionucléides identifiés doit être réalisée à la position occupée par les travailleurs. La contamination surfacique ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$) doit être évaluée pour toute surface susceptible d'être contaminée, comme par exemple les surfaces sur lesquelles sont manipulées des sources radioactives non scellées. Pour des contaminations labiles (non fixées), il est possible de déterminer leur contribution à la contamination atmosphérique par l'application de coefficients de mise en suspension dans l'air (m^{-1}). Comme ces coefficients dépendent des caractéristiques de la contamination, de la nature de la surface contaminée et des conditions environnementales (humidité, température), le choix de leurs valeurs est délicat et doit faire l'objet d'une étude spécifique (à titre d'exemple, voir l'article de Boulaud *et al.*, 2003).

2.2.3 DOSE ASSOCIEE A CHAQUE TACHE

L'évaluation de la dose au poste de travail doit correspondre à la somme des doses, qu'elles soient d'origine interne ou externe, associées à chacune des tâches. Dans un premier temps, l'étude peut être faite pour les tâches contribuant *a priori* à l'essentiel de la dose. Il convient néanmoins d'être vigilant vis-à-vis des tâches peu dosantes individuellement mais fréquentes.

Pour l'exposition externe, dans le cas d'une tâche « statique » (l'opérateur se trouve à la même distance de la source pendant toute la durée de la tâche), le débit d'équivalent de dose évalué à la position de l'opérateur et/ou de sa partie du corps la plus exposée est à multiplier par la durée. Pour une tâche pouvant être décomposée en sous-tâches statiques, on effectuera la somme des diverses contributions évaluées par la même méthode. Un opérateur travaillant devant une boîte à gants peut être considéré comme réalisant une tâche (ou une sous-tâche) statique, pour ce qui concerne l'exposition au niveau du corps entier. Dans le cas d'une tâche « dynamique », l'approche à partir des débits d'équivalent de dose n'est pas adaptée. Dans la pratique, il convient alors d'effectuer une mesure d'équivalent de dose en mode intégration en reproduisant la tâche telle qu'elle est réalisée par le travailleur. Par exemple, dans une boîte à gants les mains du même opérateur réalisent une tâche dynamique. Dans ce cas, les doses sont généralement évaluées au moyen de dosimètres passifs fixés sur un ou plusieurs doigts et portés durant une période représentative.

Pour ce qui concerne l'exposition interne, bien que les contaminations par voie cutanée⁷ ne soient pas à négliger, l'inhalation constitue la voie la plus probable d'incorporation de radionucléides dans l'organisme. Une première évaluation de la dose efficace engagée peut donc être effectuée en multipliant la DPUI par l'activité potentiellement présente dans l'atmosphère au niveau du poste de travail et susceptible d'être inhalée soit, plus précisément :

$$E \text{ (Sv)} = DPUI \text{ (Sv.Bq}^{-1}) \times C \text{ (Bq.m}^{-3}) \times V \text{ (m}^3\text{.h}^{-1}) \times T \text{ (h)}, \quad (3)$$

où E est la dose efficace engagée, C l'activité volumique dans l'air, V le débit respiratoire du travailleur et T le temps de présence au poste de travail.

Enfin, l'évaluation des doses peut être complétée en considérant des situations plausibles s'écartant des conditions normales de travail, par exemple une tâche de durée plus longue que prévu en raison d'une difficulté technique, ou celles relevant de mauvaises pratiques, telles le défaut d'utilisation d'équipements de protection radiologique.

2.3 EXPLOITATION DES RESULTATS

L'évaluation des doses (externe + interne) décrite précédemment permet de bien identifier les risques d'exposition aux rayonnements ionisants et sert de base à la classification du personnel, à la délimitation des zones de travail et au processus d'optimisation de la radioprotection.

2.3.1 DOSIMETRIE PREVISIONNELLE ET CLASSIFICATION DU PERSONNEL

Dans le cas de l'exposition externe, les équipements de protection individuelle sont à prendre en compte.

Les données collectées doivent permettre d'estimer les doses que les travailleurs sont susceptibles de recevoir au corps entier (dose efficace) ou sur une partie du corps (dose équivalente), ceci pour une durée d'une année. Pour

⁷ Passage transdermique lors de la manipulation de substances radioactives lipophiles telles le tritium et l'iode.

chaque travailleur, il convient de considérer les tâches qu'il réalise en moyenne sur une période de référence. Les doses associées à chaque tâche sont pondérées par la fréquence de réalisation de la tâche, puis sommées, et le résultat est extrapolé sur une base annuelle.

Si cette extrapolation conduit à des valeurs supérieures aux trois dixièmes d'une des limites réglementaires annuelles (voir tableau II, colonne 3), le travailleur est classé en catégorie A. Notons que les jeunes travailleurs et les femmes enceintes ne peuvent être affectés à des travaux qui requièrent un classement en catégorie A (article R. 4453-2 du code du travail). Dans le cas contraire, si la dose efficace est plus grande que 1 mSv, ou si l'une des doses équivalentes au cristallin (yeux) et à la peau (en valeur moyenne pour toute surface de 1 cm²) est respectivement plus grande que 15 mSv et 50 mSv (article R. 1333-8 du code de la santé publique), le travailleur est classé en catégorie B.

Cependant, par rapport aux extrapolations précédentes, il est recommandé de considérer une marge de sécurité. En tout état de cause, la définition des catégories du personnel relève *in fine* de la responsabilité de l'employeur, après avis du médecin du travail (articles R. 4453-1 à R. 4453-3 du code du travail).

2.3.2 DELIMITATION DES ZONES DE TRAVAIL

Il est rappelé que la délimitation des zones de travail est indépendante de la classification du personnel. Elle matérialise le risque radiologique associé à l'installation et à son utilisation. En particulier, le port des équipements de protection individuelle ne doit pas être considéré (cf. paragraphe 1.5), seuls les équipements de protection collective étant retenus. On portera toutefois une attention particulière aux équipements de protection collective mobiles qui, bien que pouvant *a priori* être considérés pour la délimitation des zones de travail, peuvent, par nature, ne pas être systématiquement utilisés par les travailleurs.

Les valeurs limites de doses efficaces et équivalentes reportées dans le tableau IIIa et spécifiques aux zones surveillées et contrôlées, correspondent aux doses susceptibles d'être reçues, évaluées sur la base de 1 heure de travail choisie comme la plus pénalisante du point de vue de la radioprotection.

Dans le cas d'une installation délivrant des rayonnements de façon discontinue (générateur X, irradiateur, accélérateur...) les débits de dose instantanés pourront être pondérés par le temps réel d'émission sur l'heure durant laquelle l'émission contribue le plus à la dose (cf. fiches pratiques pour des exemples de pondération).

On rappelle que dans le cas des zones spécialement réglementées et de la zone interdite il existe des contraintes supplémentaires sur les débits d'équivalent de dose au corps entier (tableau IIIa, dernière colonne). La mise en application pratique de ces limites de débit génère des difficultés pour certaines installations, notamment celles pour lesquelles la durée effective d'irradiation est très courte à l'échelle de l'heure. Ce point doit être clarifié par les autorités et n'est donc pour l'instant pas considéré dans cette partie, ni dans les fiches spécifiques A et B, respectivement relatives à la radiologie conventionnelle et à la radiologie interventionnelle.

Enfin, bien que la délimitation des zones de travail soit déterminée au moyen d'évaluations faites dans la zone d'évolution des travailleurs, elle peut être révisée temporairement dans le cas d'opérations particulières en dehors du fonctionnement normal du poste, comme par exemple l'entretien du réseau de ventilation d'une installation en zone contrôlée.

2.3.3 OPTIMISATION DE LA RADIOPROTECTION

Le principe d'optimisation de la radioprotection est défini à l'article L. 1333-1 du code de la santé publique : « [...] *L'exposition des personnes aux rayonnements ionisants [...] doit être maintenue au niveau le plus faible qu'il est raisonnablement possible d'atteindre, compte tenu de l'état des techniques, des facteurs économiques et sociaux et, le cas échéant, de l'objectif médical recherché [...]* » et rappelé dans l'article R. 4451-10 du code du travail.

L'étude de poste de travail est un des éléments du processus d'optimisation car elle permet d'identifier les tâches contribuant à l'essentiel des doses reçues ; par suite elle permet donc d'améliorer les protocoles sur la base d'une analyse comparative des différentes solutions possibles, et de mettre en œuvre les protections adaptées. Parmi les actions possibles, on envisagera :

- la réduction de la durée et/ou de la fréquence des tâches,
- l'augmentation de la distance à la source de rayonnements,
- l'utilisation d'équipements de protection collective et individuelle supplémentaires ou mieux adaptés,
- l'optimisation des paramètres des sources radioactives.

L'étude de poste et l'optimisation de la radioprotection doivent être menées conjointement en suivant une logique itérative.

3 FICHES SPECIFIQUES

FICHE A : ETUDE DE POSTE DE TRAVAIL EN RADIOLOGIE MEDICALE CONVENTIONNELLE

Les informations contenues dans cette fiche viennent en complément de l'introduction générale du guide pratique d'aide à la réalisation d'études de poste de travail, et notamment de la méthodologie présentée au chapitre 2. L'objet est ici de donner des recommandations spécifiques pour la réalisation d'une étude de poste de travail dans une salle de radiologie médicale conventionnelle. En complément, des valeurs de dose ou de débit de dose sont présentées à titre indicatif ; elles ne doivent pas être utilisées directement pour une étude de poste donnée. Sont concernées les installations fixes où sont réalisés des actes de radioscopie ou de radiographie à des fins diagnostiques. Ce type d'installation occasionne un risque d'exposition externe (corps entier et parfois extrémités) du personnel aux rayonnements ionisants.

A.1 PREPARATION

A.1.1 DESCRIPTION DE L'INSTALLATION

- Identifier les caractéristiques :
 - du générateur : puissance, fréquence de stabilisation, modèle,
 - du tube à rayons X : haute tension maximale, intensité de fonctionnement, nature et angle de l'anode, filtration inhérente et filtrations additionnelles, dimensions du foyer, anode fixe ou tournante,
 - des détecteurs : couple écran-film, plaques photostimulables, intensificateur d'image, etc.
- Recenser les paramètres d'utilisation du générateur : couples haute tension (kV) - charge (mAs), filtrations additionnelles, incidences, temps d'exposition.
- Recenser les équipements nécessaires à la réalisation des actes radiologiques : suspension plafonnière, table télécommandée, potter mural, etc.
- Réaliser un schéma à l'échelle de l'implantation radiologique.

A.1.2 EVALUATION DES PROCEDURES (OU TACHES) REALISEES DANS L'INSTALLATION

- Identifier le personnel concerné : manipulateurs, médecins, physiciens (PSRPM), techniciens, stagiaires, éventuellement personnel accompagnant.
- Déterminer les temps de présence aux postes de travail sur une période de référence représentative.
- Quantifier l'activité radiologique (prendre en compte le fait qu'une procédure peut comporter de multiples incidences, comme par exemple la cystographie).
- Relever les positions et distances des opérateurs par rapport à la source de rayonnements.
- Relever l'utilisation des équipements de protection individuelle et collective.
- Identifier les conditions d'exposition, à savoir :
 - par le rayonnement direct, c'est-à-dire le faisceau provenant directement du tube à rayons X,

- par le rayonnement diffusé, la source étant essentiellement le patient, mais également les accessoires, tels la table du statif.

Pour chaque poste, les procédures peuvent être regroupées en fonction des critères suivants :

- leur fréquence de réalisation,
- les paramètres de réalisation (haute tension, charge, temps d'exposition, filtration, incidence),
- la position de l'opérateur par rapport au volume de diffusion (distance opérateur/patient),
- les équipements de protection individuelle (tablier, protège-thyroïde, paire de lunettes) et collective (écrans fixes ou mobiles) utilisés.

A.2 EVALUATION DES DOSES

A.2.1 SELECTION DES TACHES

Dans un premier temps, une évaluation des doses peut être faite en sélectionnant les tâches contribuant a priori à l'essentiel de l'exposition, soit en raison de leur durée et de leur fréquence, soit en raison du débit de dose associé. Dans un second temps, la contribution des tâches moins irradiantes devra être considérée de façon à couvrir l'ensemble de l'exposition.

Les positions susceptibles d'être les plus couramment occupées par les opérateurs suivant l'examen réalisé sont rappelées dans le tableau A.I.

Tableau A.I : Exemples de position des opérateurs pour des procédures classiques (A : cas adulte, P : cas pédiatrie)

| Examens radiologiques | Derrière paravent | A proximité du patient | Extrémités exposées |
|-----------------------|-------------------|------------------------|---------------------|
| Mammographie | A | — | — |
| Poumons | A/P | P | — |
| Rachis | A/P | P | — |
| Bassin | A/P | P | — |
| Genoux | A/P | P | — |
| Epaules | A/P | P | — |
| TOGD* | A/P | A/P | A/P |
| HSG** | A | A | A |
| Cystographie | A/P | A/P | A/P |

* TOGD : transit œso-gastro-duodéal

** HSG : hystérosalpingographie

A.2.2 ACQUISITION DES DONNEES DOSIMETRIQUES

- Relever les résultats de la surveillance dosimétrique et des études antérieures.
- Effectuer des mesures d'ambiance à la position des travailleurs pour les tâches sélectionnées (radioscopie et/ou radiographie), par exemple derrière un paravent et à proximité du patient, afin de déterminer la classification du personnel.

- Réaliser des mesures aux extrémités le cas échéant.
- Effectuer, pour délimiter les zones de travail, des mesures à différentes distances du diffuseur, permettant d'établir une cartographie dosimétrique de l'installation radiologique.
- Effectuer des mesures d'ambiance dans des situations s'écartant des conditions normales de travail (absence de protection, porte anormalement ouverte, etc.).

A.2.3 INSTRUMENTS DE MESURE

- Evaluation de la dose au corps entier (estimation de la dose efficace) :
 - utilisation recommandée d'une chambre d'ionisation de grand volume (au moins 500 cm³), étalonnée depuis moins d'un an, de préférence en équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ ⁸,
 - utilisation de « fantômes patient » conformes à la norme NF C15-161 (radiologie conventionnelle, scanner : 25 x 25 x 15 cm, mammographie : 20 x 25 x 3 cm, dentaire : cylindre 20 x 20 cm), afin de simuler le diffuseur.
- Evaluation de la dose aux extrémités (estimation de la dose équivalente) :
 - utilisation recommandée de dosimètres étalonnés en équivalent de dose individuel $H_p(0,07)$,
 - pour les mains, mesurer $H_p(0,07)$ au moyen de dosimètres portés sur les doigts par l'opérateur ou, éventuellement, fixés sur un fantôme adapté (ISO rondin suivant la norme ISO 4037-3).

Les procédures les plus courantes ainsi que des valeurs indicatives des doses associées par incidence spécifique correspondant au domaine de la radiologie conventionnelle sont rappelées dans le tableau A.II.

Tableau A.II : Exemples de procédures et de valeurs indicatives d'équivalents de dose $H^*(10)$ et de débits instantanés d'équivalent de dose $dH^*(10)/dt$ pour différentes procédures et incidences.

| Procédure | Incidence | Paramètres | | Sans protection | Derrière paravent |
|--------------------------|-------------|--------------------|--------------|---|---|
| | | Haute tension (kV) | Charge (mAs) | (0,5 m du diffuseur) $H^*(10)$ (μSv) | 2 mm équivalent Pb (2,5 m du diffuseur) $H^*(10)$ (μSv) |
| Radiographie pulmonaire | face | 115 | 3 | 1 | $[0-10] \times 10^{-3}$ |
| Crâne | face | 60 | 80 | 2 | $[0-10] \times 10^{-3}$ |
| | profil | 60 | 50 | 1,5 | $[0-10] \times 10^{-3}$ |
| Rachis cervical | face/profil | 60 | 32 | 1 | $[0-10] \times 10^{-3}$ |
| Rachis lombaire | face | 70 | 40 | 2 | $[0-10] \times 10^{-3}$ |
| | profil | 80 | 100 | 3,5 | $[10-20] \times 10^{-3}$ |
| | face debout | 84 | 130 | 6 | $[10-20] \times 10^{-3}$ |
| Abdomen sans préparation | face | 70 | 30 | 1,5 | $[0-10] \times 10^{-3}$ |
| Bassin | face | 70 | 50 | 2,5 | $[0-10] \times 10^{-3}$ |
| Fémur | face | 58 | 16 | 0,5 | $[0-10] \times 10^{-3}$ |

⁸ Si la mesure est faite en termes de kerma dans l'air K_a il convient de multiplier le K_a mesuré par un coefficient de conversion dont la valeur tient compte de l'énergie moyenne du rayonnement X.

A.3 EXPLOITATION DES RESULTATS

A.3.1 DOSIMETRIE PREVISIONNELLE ET CLASSIFICATION DU PERSONNEL

- Extrapoler les évaluations dosimétriques à l'activité annuelle des opérateurs.
- Comparer aux limites réglementaires (voir le tableau II de l'introduction générale).
- Proposer une classification des opérateurs à soumettre à l'employeur et au médecin du travail.

A.3.2 DELIMITATION DES ZONES DE TRAVAIL

Les valeurs limites de doses associées aux zones contrôlées, surveillées et spécialement réglementées ou interdites sont rappelées dans les tableaux IIIa et IIIb du chapitre 1.

Les valeurs limites de doses efficaces et équivalentes du tableau IIIa et spécifiques aux zones surveillées et contrôlées, correspondent aux doses susceptibles d'être reçues, évaluées sur la base de l'heure de travail la plus pénalisante.

Dans le cas de la radiologie conventionnelle, le temps d'émission des rayonnements X ne correspond généralement qu'à une fraction de l'heure. Il convient ainsi de pondérer les débits de dose instantanés déterminés en cours d'irradiation par la durée effective d'émission des rayonnements à l'échelle d'une heure. Notons que ce type d'installation fait partie des cas générant des difficultés pour l'application des limites de débit d'équivalent de dose au corps entier applicables pour les zones spécialement réglementées (voir tableau IIIa et paragraphe 2.3.2), limites qui ne sont pas considérées ici.

A titre d'exemple :

Considérons un poste de radiologie dédié à des procédures radiologiques pulmonaires de face et lombaires de face debout. En une heure de travail, admettons que 5 radiographies pulmonaires et 6 radiographies lombaires sont au plus réalisées à ce poste de radiologie. En s'appuyant sur les données indicatives fournies dans le tableau A.II, une dose efficace totale de $5 \times 1 \mu\text{Sv} + 6 \times 6 \mu\text{Sv} = 41 \mu\text{Sv}$ serait susceptible d'être reçue par un travailleur qui se trouverait à 50 cm du diffuseur.

Le travailleur se trouve donc en zone contrôlée jaune (voir tableau IIIa).

Selon la loi de l'inverse du carré de la distance, qui n'est qu'une approximation, la limite de la zone contrôlée jaune serait située à $50 \text{ cm} \times \sqrt{41 \mu\text{Sv} / 25 \mu\text{Sv}} = 64 \text{ cm}$ du diffuseur, et celle de la zone contrôlée verte à $50 \text{ cm} \times \sqrt{41 \mu\text{Sv} / 7,5 \mu\text{Sv}} = 1,17 \text{ m}$.

En pratique, la salle de traitement peut être classée en zone contrôlée verte, à l'exclusion d'une zone d'un rayon de 64 cm autour du diffuseur classée en zone spécialement réglementée jaune. Au niveau du pupitre, derrière un paravent plombé, le débit est généralement suffisamment faible pour pouvoir classer cet espace en zone surveillée.

Notons qu'il convient de s'assurer que les zones de travail ainsi délimitées permettent le respect des limites réglementaires annuelles reportées dans le tableau IIIb.

Des informations complémentaires relatives à la délimitation des zones de travail sont précisées dans un document établi par l'Autorité de sûreté nucléaire et consacré à la radiologie médicale et dentaire⁹.

A.3.3 OPTIMISATION DE LA RADIOPROTECTION

Sans entrer dans la mise en œuvre du processus d'optimisation tel que décrit au paragraphe 2.3.3, qui nécessite une réflexion d'ensemble sur les pratiques médicales, on souligne l'importance des deux bonnes pratiques suivantes :

- réduire au strict minimum l'utilisation et la durée de la radioscopie de centrage du patient,
- se tenir entièrement derrière la protection radiologique vitrée lors de la prise d'un cliché.

⁹ Rappel des principales dispositions réglementaires de radioprotection applicables en radiologie médicale et dentaire. Mise à jour de la synthèse jointe à la lettre circulaire ASN/DIS/n° 1452/2006 du 29 décembre 2006 adressée par l'ASN aux professionnels de santé. Document distribué aux Journées Françaises de Radiologie 2007, CNIT Paris-la-Défense, du 20 au 24 octobre 2007.

FICHE B : ETUDE DE POSTE DE TRAVAIL EN RADIOLOGIE MEDICALE INTERVENTIONNELLE

Les informations contenues dans cette fiche viennent en complément de l'introduction générale du guide pratique d'aide à la réalisation d'études de poste de travail, et notamment de la méthodologie présentée au chapitre 2. L'objet est ici de donner des recommandations spécifiques pour la réalisation d'une étude de poste de travail dans une salle de radiologie médicale interventionnelle. En complément, des valeurs de dose ou de débit de dose sont présentées à titre indicatif ; elles ne doivent pas être utilisées directement pour une étude de poste donnée. Sont concernées les installations fixes et mobiles où sont réalisés des actes diagnostiques ou thérapeutiques utilisant la radiographie ou la radioscopie. Ce type d'installation occasionne un risque d'exposition externe (corps entier et parfois extrémités) du personnel aux rayonnements ionisants.

B.1 PREPARATION

B.1.1 DESCRIPTION DE L'INSTALLATION

- Identifier les caractéristiques :
 - du générateur : puissance, fréquence de stabilisation, modèle,
 - du tube à rayons X : haute tension maximale, intensité de fonctionnement, nature et angle de l'anode, filtration inhérente et filtrations additionnelles, dimensions du foyer, anode fixe ou tournante,
 - des détecteurs : intensificateur d'image, détecteur plan dynamique ou couple écran-film.
- Recenser les paramètres d'utilisation du générateur (attention ! ces paramètres peuvent s'ajuster automatiquement) : couples haute tension - charge (mAs), filtrations additionnelles, incidences, temps d'exposition, nombre de pulses par seconde (radioscopie), nombre d'images par seconde (radiographie),
- Recenser les équipements nécessaires à la réalisation des actes radiologiques : arceau fixe ou mobile, artériophlébographe, etc.
- Réaliser un schéma à l'échelle de l'implantation radiologique.

B.1.2 EVALUATION DES PROCEDURES (OU TACHES) REALISEES DANS L'INSTALLATION

- Identifier le personnel concerné : manipulateurs, infirmières, médecins, physiciens (PSRPM), techniciens, stagiaires, éventuellement personnel accompagnant.
- Déterminer les temps de présence aux postes de travail sur une période de référence représentative.
- Quantifier l'activité radiologique (attention ! une procédure peut comporter plusieurs incidences, comme par exemple la coronarographie).
- Relever les positions et distances des opérateurs par rapport à la source de rayonnements.
- Relever l'utilisation des équipements de protection individuelle et collective.
- Identifier les conditions d'exposition, à savoir :

- par le rayonnement direct, c'est-à-dire le faisceau provenant directement du tube à rayons X,
- par le rayonnement diffusé, la source étant essentiellement le patient, mais également les accessoires, tels la table du statif.

Pour chaque poste, les procédures peuvent être regroupées en fonction des critères suivants :

- leur fréquence de réalisation,
- les paramètres de réalisation, généralement accessibles à la console ou à partir du récapitulatif informatique des paramètres (haute tension, charge, temps d'exposition, filtration, incidence),
- la position de l'opérateur par rapport au volume de diffusion (distance opérateur/patient),
- les équipements de protection individuelle (tablier, protège-thyroïde, lunettes) et collective (écrans fixes ou mobiles) utilisés.

B.2 EVALUATION DES DOSES

B.2.1 SELECTION DES TACHES

Dans un premier temps, une évaluation des doses peut être faite en sélectionnant les tâches contribuant a priori à l'essentiel de l'exposition, soit en raison de leur durée et de leur fréquence, soit en raison du débit de dose associé. Dans un second temps, la contribution des tâches moins irradiantes devra être considérée de façon à couvrir l'ensemble de l'exposition.

Au cours des procédures radiologiques suivantes :

- examen vasculaire diagnostique (artériographie abdominale) et thérapeutique (dilatation des artères fémorales),
- examen cardio-vasculaire diagnostique (coronarographie) et thérapeutique (dilatation et pose de stent dans l'artère coronaire),
- examen vasculaire thérapeutique abdominal (drainage biliaire),

les opérateurs se tiennent, en général, derrière le paravent ou à proximité du patient (distance de 50 à 100 cm) et ont souvent les extrémités et les cristallins exposés. S'agissant des extrémités, il convient de considérer l'exposition des mains et celle des pieds et chevilles.

B.2.2 ACQUISITION DES DONNEES DOSIMETRIQUES

- Relever les résultats de la surveillance dosimétrique et des études antérieures.
- Effectuer des mesures d'ambiance à la position des travailleurs pour les tâches sélectionnées (radioscopie ou radiographie), par exemple derrière un paravent et à proximité du patient, afin de déterminer la classification du personnel.
- Réaliser des mesures aux extrémités le cas échéant.
- Effectuer, pour délimiter les zones de travail, des mesures à différentes distances du diffuseur, permettant d'établir une cartographie dosimétrique de l'installation radiologique.

- Effectuer des mesures d'ambiance dans des situations s'écartant des conditions normales de travail (absence de protection, porte anormalement ouverte, etc.).

B.2.3 INSTRUMENTS DE MESURE

- Evaluation de la dose au corps entier (estimation de la dose efficace) :
 - il est recommandé d'utiliser une chambre d'ionisation de grand volume (au moins 500 cm³) étalonnée depuis moins d'un an, de préférence en équivalent de dose ambient $H^*(10)$ ¹⁰,
 - pour simuler la diffusion des rayonnements par le patient, utiliser des fantômes conformes à la norme NF C15-161 (radiologie conventionnelle : 25 x 25 x 15 cm).
- Evaluation de la dose aux extrémités (estimation de la dose équivalente) :
 - il est recommandé d'utiliser des dosimètres étalonnés en équivalent de dose individuel $H_p(0,07)$,
 - pour les mains et les pieds, mesurer $H_p(0,07)$ au moyen de dosimètres portés sur les doigts (de la main ou du pied, suivant le cas) par l'opérateur ou, éventuellement, fixés sur un fantôme adapté (ISO rondin suivant la norme ISO 4037-3),
 - pour les chevilles, mesurer $H_p(0,07)$ au moyen de dosimètres portés sur les chevilles par l'opérateur ou, éventuellement, fixés sur un fantôme adapté (ISO colonne suivant la norme ISO 4037-3).

Les valeurs du débit d'équivalent de dose ambient $dH^*(10)/dt$ pour les incidences les plus courantes et spécifiques du domaine de la radiologie interventionnelle sont rappelées dans les tableaux B.I à B.V.

¹⁰ Si la mesure est faite en termes de kerma dans l'air K_a il convient de multiplier le K_a mesuré par un coefficient de conversion dont la valeur tient compte de l'énergie moyenne du rayonnement X.

Tableau B.I : Valeurs indicatives des débits instantanés d'équivalent de dose $dH^*(10)/dt$ selon différents paramètres (cadence d'images, champ, distance, filtration) pour de la radioscopie de face (DFD : distance foyer - détecteur).

| Radioscopie de face, DFD = 105 cm | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|--|-------------------------------------|--|
| Nombre d'impulsions par seconde | Taille du champ [§] (cm) | Distance du diffuseur [#] (m) | Filtration additionnelle (mm de Cu) | $dH^*(10)/dt$ (sans protection) (mSv.h ⁻¹) |
| 30 | 48 | 0,5 | 0,3 | 8 |
| | 42 | 0,5 | 0,3 | 6 |
| | 32 | 0,5 | 0,3 | 5 |
| | 22 | 0,5 | 0,3 | 3 |
| 15 | 48 | 0,5 | 0,6 | 3 |
| | 42 | 0,5 | 0,6 | 2,5 |
| | 32 | 0,5 | 0,6 | 2 |
| | 22 | 0,5 | 0,3 | 1,9 |
| 10 | 48 | 0,5 | 0,6 | 2,5 |
| | 42 | 0,5 | 0,6 | 2 |
| | 32 | 0,5 | 0,6 | 1,5 |
| | 22 | 0,5 | 0,6 | 1 |

[§] Diamètre au niveau de l'imageur

[#] Distance horizontale entre le centre de la zone irradiée du fantôme « patient » et le point de mesure

Tableau B.II : Idem tableau B.I mais pour de la radiographie de face.

| Radiographie de face, DFD = 105 cm | | | | |
|------------------------------------|-----------------------------------|--|-------------------------------------|--|
| Nombre d'impulsions par seconde | Taille du champ [§] (cm) | Distance du diffuseur [#] (m) | Filtration additionnelle (mm de Cu) | $dH^*(10)/dt$ (sans protection) (mSv.h ⁻¹) |
| 3 | 48 | 0,5 | 0,1 | 76 |
| | 42 | 0,5 | 0,1 | 64 |
| | 32 | 0,5 | 0,1 | 41 |
| | 22 | 0,5 | 0 | 37 |

[§] Diamètre au niveau de l'imageur

[#] Distance horizontale entre le centre de la zone irradiée du fantôme « patient » et le point de mesure

Tableau B.III : Idem tableau B.I mais pour de la radioscopie en oblique antérieur gauche (30°).

| Radioscopie en oblique antérieur gauche (30°), DFD = 105 cm | | | | |
|---|-----------------------------------|--|-------------------------------------|---|
| Nombre d'impulsions par seconde | Taille du champ [§] (cm) | Distance du diffuseur [#] (m) | Filtration additionnelle (mm de Cu) | dH*(10)/dt (sans protection) (mSv.h ⁻¹) |
| 30 | 48 | 0,5 | 0,3 | 19 |
| | 42 | 0,5 | 0,3 | 14 |
| | 32 | 0,5 | 0,3 | 10 |
| | 22 | 0,5 | 0,2 | 8 |
| 15 | 48 | 1 | 0,3 | 4 |
| | 42 | 1 | 0,3 | 3 |
| | 32 | 1 | 0,3 | 2,5 |
| | 22 | 1 | 0,2 | 2 |

[§] Diamètre au niveau de l'imageur

[#] Distance horizontale entre le centre de la zone irradiée du fantôme « patient » et le point de mesure

Tableau B.IV : Idem tableau B.I mais pour de la radiographie en oblique antérieur gauche (30°).

| Radiographie en oblique antérieur gauche (30°), DFD = 105 cm | | | | |
|--|-----------------------------------|--|-------------------------------------|---|
| Nombre d'impulsions par seconde | Taille du champ [§] (cm) | Distance du diffuseur [#] (m) | Filtration additionnelle (mm de Cu) | dH*(10)/dt (sans protection) (mSv.h ⁻¹) |
| 3 | 48 | 0,5 | 0,1 | 138 |
| | 42 | 0,5 | 0 | 108 |
| | 32 | 0,5 | 0,1 | 61 |
| | 22 | 0,5 | 0 | 58 |
| 3 | 48 | 1 | 0 | 35 |
| | 42 | 1 | 0 | 27 |
| | 32 | 1 | 0,1 | 15 |
| | 22 | 1 | 0 | 13 |

[§] Diamètre au niveau de l'imageur

[#] Distance horizontale entre le centre de la zone irradiée du fantôme « patient » et le point de mesure

Tableau B.V : Idem tableau B.I mais pour de la radiographie de profil.

| Radiographie de profil, DFD = 110 cm | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|--|-------------------------------------|---|
| Nombre d'impulsions par seconde | Taille du champ [§] (cm) | Distance du diffuseur [#] (m) | Filtration additionnelle (mm de Cu) | dH*(10)/dt (sans protection) (mSv.h ⁻¹) |
| 3 | 48 | 1 | 0 | 212 |
| | 42 | 1 | 0 | 97 |

[§] Diamètre au niveau de l'imageur

[#] Distance horizontale entre le centre de la zone irradiée du fantôme « patient » et le point de mesure

Les données indicatives présentées dans le tableau B.VI précisent les gammes des variations possibles des équivalents de dose individuels évalués par intervention pour le radiologue ou le cardiologue réalisant l'acte radiologique. Ces données sont issues d'études publiées dans la littérature et leurs degrés de variabilité reflètent la grande disparité des types de procédures, de leurs difficultés ou leurs durées, des paramètres radiologiques mis en œuvre, et des pratiques individuelles des opérateurs.

Tableau B.VI : Gammes indicatives des variations des équivalents de dose individuels évalués par intervention pour le radiologue ou le cardiologue réalisant l'acte radiologique.

| Type d'évaluation | Grandeur | Protection | Gamme |
|-------------------|-------------|----------------------------|--|
| Corps entier | $H_p(10)$ | Derrière un tablier plombé | de quelques centaines de nSv à quelques dizaines de μ Sv |
| Yeux | $H_p(3)$ | Sans protection | de quelques dizaines de μ Sv à plusieurs mSv |
| Mains | $H_p(0,07)$ | Sans protection | de quelques dizaines de μ Sv à plusieurs mSv |
| Pieds - Chevilles | $H_p(0,07)$ | Sans protection | de quelques dizaines de μ Sv à plusieurs mSv |

B.3 EXPLOITATION DES RESULTATS

B.3.1 DOSIMETRIE PREVISIONNELLE ET CLASSIFICATION DU PERSONNEL

- Extrapoler les évaluations dosimétriques à l'activité annuelle des opérateurs.
- Comparer aux limites réglementaires.
- Proposer une classification des opérateurs à soumettre à l'employeur et au médecin du travail.

B.3.2 DELIMITATION DES ZONES DE TRAVAIL

Les valeurs limites de doses associées aux zones contrôlées, surveillées et spécialement réglementées ou interdites sont rappelées dans les tableaux IIIa et IIIb du chapitre 1.

Les valeurs limites de doses efficaces et de doses équivalentes du tableau IIIa, spécifiques aux zones surveillées et contrôlées, correspondent aux doses susceptibles d'être reçues, évaluées sur la base de l'heure de travail la plus pénalisante.

Dans le cas de la radiologie interventionnelle, le temps d'émission des rayonnements X ne correspond généralement qu'à une fraction d'heure. Il convient alors de pondérer les débits de dose instantanés déterminés en cours d'irradiation par la durée effective d'émission des rayonnements à l'échelle d'une heure. Notons que ce type d'installation fait partie des cas générant des difficultés pour l'application des limites de débit d'équivalent de dose au corps entier applicables pour les zones spécialement réglementées (voir tableau IIIa et paragraphe 2.3.2), limites qui ne sont pas considérées ici.

A titre d'exemple :

Considérons le cas d'une embolisation utérine, procédure radiologique interventionnelle d'une durée de l'ordre de 50 min. Admettons que les durées totales de radioscopie (15 impulsions par seconde) et de radiographie (3 images par seconde) sont respectivement égales à 40 min et 2 min. Cette procédure est réalisée avec un champ de diamètre 22 cm. Le débit instantané d'équivalent de dose ambiant à 0,5 m du diffuseur (position de l'opérateur), est égal à 1,9 mSv/h en radioscopie et 37 mSv/h en radiographie (voir respectivement les tableaux B.I et B.II).

Ceci correspond à une dose efficace en 1 heure égale à 1,27 mSv pour 40 min de radioscopie et 1,23 mSv pour 2 min de radiographie.

La dose efficace totale en 1 heure est donc égale à 2,5 mSv. L'opérateur est en zone contrôlée orange (voir tableau IIIa).

Selon la loi de l'inverse du carré de la distance, qui n'est qu'une approximation, la limite de la zone contrôlée orange serait située à $50 \text{ cm} \times \sqrt{2,5 \text{ mSv} / 2 \text{ mSv}} = 56 \text{ cm}$ du diffuseur, et celles des zones contrôlées jaune et verte respectivement à $50 \text{ cm} \times \sqrt{2,5 \text{ mSv} / 0,025 \text{ mSv}} = 5 \text{ m}$ et $50 \text{ cm} \times \sqrt{2,5 \text{ mSv} / 0,0075 \text{ mSv}} = 9,13 \text{ m}$.

Une salle de dimensions typiques 5 m x 5 m peut donc être classée en zone contrôlée jaune (2 mSv en 1 heure), à l'exclusion d'un espace de 56 cm de rayon autour du diffuseur dont l'intérieur est classé en zone contrôlée orange. Au niveau du pupitre, derrière un paravent plombé, le débit de dose est généralement suffisamment faible pour pouvoir classer cet espace en zone surveillée.

Notons qu'il convient de s'assurer que les zones de travail ainsi délimitées permettent le respect des limites réglementaires annuelles reportées dans le tableau IIIb.

Des informations complémentaires relatives à la délimitation des zones de travail sont précisées dans un document établi par l'Autorité de sûreté nucléaire et consacré à la radiologie médicale et dentaire¹¹.

B.3.3 OPTIMISATION DE LA RADIOPROTECTION

Sans entrer dans la mise en œuvre du processus d'optimisation tel que décrit au paragraphe 2.3.3, qui nécessite une réflexion d'ensemble sur les pratiques médicales, on relève les deux pistes d'amélioration suivantes :

- la diminution des cadences d'images en radioscopie et en radiographie,
- l'utilisation de filtrations additionnelles.

¹¹ Rappel des principales dispositions réglementaires de radioprotection applicables en radiologie médicale et dentaire. Mise à jour de la synthèse jointe à la lettre circulaire ASN/DIS/n° 1452/2006 du 29 décembre 2006 adressée par l'ASN aux professionnels de santé. Document distribué aux Journées Françaises de Radiologie 2007, CNIT Paris-la-Défense, du 20 au 24 octobre 2007.

FICHE C : ETUDE DE POSTE DE TRAVAIL EN MEDECINE NUCLEAIRE

Les informations contenues dans cette fiche viennent en complément de l'introduction générale du guide pratique d'aide à la réalisation d'études de poste de travail, et notamment de la méthodologie présentée au chapitre 2. L'objet est ici de donner des recommandations spécifiques pour la réalisation d'une étude de poste de travail dans un service de médecine nucléaire.

Des données complémentaires sont fournies, à savoir les principaux radionucléides utilisés, leurs caractéristiques radioactives et leurs domaines d'applications cliniques. Des doses et débits de dose ainsi que des niveaux de contamination sont également précisés ; les valeurs étant fournies à titre indicatif elles ne doivent pas être utilisées directement pour une étude de poste donnée. Elles sont ont pour principal objet de servir d'appui aux exemples de classification des travailleurs et de délimitation des zones de travail choisis.

Sont concernées les installations de médecine nucléaire où sont réalisés des actes diagnostiques *in vivo* ainsi que des actes thérapeutiques. Ce type d'activité génère un risque d'exposition externe (corps entier et extrémités) ainsi qu'un risque d'exposition interne du personnel. L'exposition aux mains est dans de nombreux cas le facteur contraignant compte tenu des limites de dose annuelles réglementaires (cf. paragraphe 1.5).

C.1 PREPARATION

C.1.1 DESCRIPTION DE L'INSTALLATION

- Identifier les sources de rayonnement contribuant à l'exposition externe:
 - Local de réception des produits radioactifs :
 - stockage de sources conditionnées : générateurs $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$, flacons de ^{18}F FDG, gélules de ^{131}I , kits de ^{90}Y , etc. ;
 - Radiopharmacie :
 - stockage de sources dans l'enceinte blindée : générateurs $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$, réfrigérateur ;
 - élaboration et/ou mesure de l'activité de radiopharmaceutiques en boîte à gants : élution, seringues, gélules ;
 - gestion des déchets radioactifs : poubelles en enceinte blindée et/ou externe ;
 - Salle d'injection :
 - les seringues et leur conditionnement (valise de transport), le patient après administration du radiopharmaceutique, les poubelles ;
 - Salle d'attente après administration du radiopharmaceutique :
 - les patients ;
 - Salles d'exams pour les applications diagnostiques (salles de caméra à scintillations, de TEP-CT, d'épreuve d'effort) :
 - le patient ;
 - les poubelles ;
 - Couloir et éventuellement tout autre local se trouvant en zone réglementée (bureau de consultation, salle d'interprétation) :

- les patients après examen, plus généralement toutes les sources et matériels contaminés y circulant ;
- Locaux destinés à l'entreposage à court et moyen termes pour décroissance et évacuation des déchets radioactifs solides et effluents liquides :
 - sacs étanches, fûts, bidons ;
 - cuves.

Les sources scellées utilisées pour divers étalonnages (exemples : ^{57}Co , ^{58}Ga , ^{133}Ba , ^{137}Cs), sont également à prendre en compte dans l'inventaire précédent.

- Identifier les sources de contamination:
 - Ensemble des locaux réglementés :
 - Contamination surfacique : plan de travail, intérieur des boîtes à gants, toilettes, éviers, fauteuils, chambres d'hospitalisation, ...
 - Contamination atmosphérique liée principalement à l'utilisation de radionucléides volatiles tels les isotopes de l'iode ou à la réalisation des explorations pulmonaires ventilatoires : tous les locaux sont susceptibles d'être contaminés.
- Inventorier les différents radionucléides : nature, type(s) de rayonnement(s), énergie(s) et forme physico-chimique pour le cas de l'évaluation de l'exposition interne. Le tableau C.1 rappelle les caractéristiques des radionucléides les plus utilisés en médecine nucléaire.
- Relever les activités manipulées par les travailleurs et celles administrées aux patients. Les valeurs indicatives d'activités administrées aux patients sont présentées dans le tableau C.1.
Pour l'étude de poste, ce sont d'une part les activités réellement administrées dans le service qui doivent être considérées et, d'autre part, celles manipulées durant l'ensemble des opérations, comme par exemple la préparation des radiopharmaceutiques.
- Réaliser un schéma à l'échelle du service de médecine sur lequel seront représentées les sources de rayonnement et leurs intensités respectives.

Tableau C.I : Caractéristiques physiques et dosimétriques d'une sélection de radionucléides utilisés, leurs applications cliniques et activités administrées.

| Radionucléide | Période radioactive | Principales émissions | Constante de débit d'équivalent de dose ($\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2\cdot\text{GBq}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) [§] | Type d'application | Activité administrée au patient (MBq) [¶] | |
|--------------------------------------|---------------------|------------------------------------|--|---|--|---|
| Applications thérapeutiques : | | | | | | |
| ⁸⁹ Sr | 50,5 j | β^- | - | Antalgique des métastases osseuses | 150 | |
| ⁹⁰ Y | 2,67 j | β^- | - | Traitement des arthrites inflammatoires Traitement de certains lymphomes | 80 1200 | |
| ¹³¹ I | 8,02 j | β^- , photons | 65,7 [#] | Traitement de l'hyperthyroïdie de cancers thyroïdiens | 400-700 4000-6000 | |
| ¹⁵³ Sm | 1,93 j | β^- , photons | 16,9 [*] | Antalgique des métastases osseuses | 2400 | |
| ¹⁶⁹ Er | 9,40 j | β^- | - | Traitement des arthrites inflammatoires | 20 | |
| ¹⁸⁶ Re | 3,78 j | β^- , photons | 3,9 [*] | Traitement des arthrites inflammatoires | 40 | |
| Applications diagnostiques : | | | | | | |
| ¹⁸ F | 1,83 h | β^+ , photons d'annihilation | 165,5 [#] | Tomographie par émission de positons | 200-500 | |
| ⁶⁷ Ga | 3,26 j | photons | 25,0 [#] | Foyers infectieux | 74-185 | |
| ^{99m} Tc | 6,01 h | photons | 21,7 [#] | Scintigraphie | du squelette pulmonaire de la thyroïde de cavités cardiaques du cortex rénal rénale dynamique Tomoscintigraphie myocardique cérébrale | 300-700 40-200 20-80 185-1000 30-120 37-370 185-750 350-1110 |
| ¹¹¹ In | 2,80 j | photons | 90,5 [#] | Scintigraphie des récepteurs de la somatostatine | 100-220 | |
| ¹²³ I | 13,3 h | photons | 47,4 [#] | Scintigraphie de la thyroïde | 10-15 | |
| ²⁰¹ Tl | 3,04 j | photons | 17,6 [#] | Tomoscintigraphie myocardique | 37-110 | |

[§] Seule la contribution des photons est prise en compte et les valeurs sont données pour une source ponctuelle en négligeant l'atténuation dans l'air. Le débit d'équivalent de dose (en $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$) à la distance d (en m) de la source d'activité A (en GBq) se calcule en multipliant par A et en divisant par d^2 .

[#] Constante de débit de l'équivalent de dose ambiant, $H^*(10)$, pour des énergies des photons supérieures à 20 keV, extraite de (Tschurlovits, Leitner, Daverda, 1992).

^{*} Constante de débit de l'équivalent de dose individuel, $H_p(10)$, calculée à 1 m au moyen du code Microshield[®] (Microshield, 2005).

[¶] Pour les applications diagnostiques, les valeurs sont extraites des autorisations de mise sur le marché. Pour les applications thérapeutiques, elles représentent des moyennes indicatives.

C.1.2 EVALUATION DES PROCEDURES (OU TACHES) REALISEES DANS L'INSTALLATION

- Quantifier l'activité médicale (nombre de patients par jour, types d'exams diagnostiques et de procédures thérapeutiques).
- Identifier le personnel concerné : manipulateurs, radiopharmaciens, techniciens, infirmiers, physiciens (PSRPM), médecins, brancardiers, stagiaires, y compris les intervenants extérieurs tels le personnel de nettoyage, de maintenance, etc.
- Inventorier les différentes tâches : réception, préparation, administration du radiopharmaceutique (via injection, ingestion ou inhalation suivant le cas), prise en charge du patient et gestion des déchets.
- Identifier les conditions d'exposition, qui sont différentes suivant la tâche effectuée et les équipements de protection utilisés. Par exemple, les mains sont préférentiellement exposées lors de la manipulation des sources (préparation, administration du radiopharmaceutique, ...), et le corps entier durant la prise en charge du patient dès l'administration (mise en place du patient sous le TEP, ...).

En ce qui concerne les équipements de protection, il convient de distinguer les équipements de protection collective (portes, boîte à gants, ventilation, écran plombé fixe ou mobile, valise et container

de transport, protège-flacon, poubelle plombée, container de décroissance, ...) et individuelle (tablier plombé, pince-langouette, gants à usage unique, ...) mis en œuvre. Le protège-seringue est un équipement de protection considéré comme équipement de protection collective.

- Déterminer les temps de présence aux postes de travail sur une période de référence représentative.

Pour chaque poste, les procédures peuvent être regroupées en fonction des critères suivants :

- leur fréquence de réalisation,
- les types de radionucléides et leur activité,
- la source de rayonnements : le radiopharmaceutique manipulé, le patient dès qu'un radiopharmaceutique lui a été administré,
- les équipements de protection individuelle et collective mis en œuvre,
- la distance (position) de l'opérateur par rapport à la source,
- le type d'exposition : externe (corps entier, extrémités), interne (inhalation).

C.2 EVALUATION DES DOSES

C.2.1 SELECTION DES TACHES

L'évaluation des doses est faite en attachant davantage d'attention aux tâches contribuant à l'essentiel de l'exposition en raison de leur fréquence de réalisation, de la nature des radionucléides manipulés, de leur activité et des risques associés (voir le tableau C.I et Delacroix, Guerre, Leblanc, 2006). Pour autant, la contribution des tâches attendues comme moins irradiantes doit être évaluée.

Une représentation relative des types d'exposition (externe, interne) et des zones exposées des opérateurs (corps entier, extrémités) est présentée dans le tableau C.II pour les différentes tâches réalisées dans un service de médecine nucléaire.

Tableau C.II : Représentation relative des types d'exposition associés aux zones exposées des opérateurs pour différentes tâches.

| Exposition Tâches | externe | | interne |
|-----------------------|--------------|------------|---------|
| | Corps entier | Extrémités | |
| Réception | – | – | – |
| Préparation | – | +++ | + |
| Administration | + | +++ | + |
| Console d'acquisition | + | – | – |
| Transfert patient | + | – | – |
| Soins au patient | + | – | + |
| Gestion des déchets | + | – | + |

C.2.2 ACQUISITION DES DONNEES DOSIMETRIQUES

- Relever les résultats de la surveillance dosimétrique (individuelle et d'ambiance) et des études antérieures, y compris les résultats des analyses radiotoxicologiques et anthroporadiométriques des travailleurs.

C.2.2.1 Exposition externe

- Effectuer des mesures d'ambiance à la position des travailleurs pour les tâches sélectionnées afin de déterminer la classification du personnel. A titre d'exemple, on peut citer les situations suivantes :
 - derrière un écran (pupitre de commande, boîte à gants, tablier plombé, ...),
 - à proximité du patient (injection, épreuve d'effort, consultation après examen, ...),
 - dans une salle (entreposage des déchets radioactifs, ...).
- Réaliser des mesures aux extrémités, a minima pour les phases
 - de préparation en boîte à gants,
 - d'administration au patient.

Ces mesures sont faites idéalement au moyen de plusieurs dosimètres portés à l'extrémité des doigts durant une période représentative, a minima on peut utiliser un dosimètre du type bague, le détecteur étant orienté du côté de la paume de la main.

Ces mesures sont également utiles à la définition des zones de travail.

- Etablir une cartographie dosimétrique de l'installation radiologique par des mesures à différentes distances des sources radioactives. Ne pas oublier le cas des sources mobiles, comme par exemple la présence de patients dans un couloir.
- Effectuer des mesures d'ambiance dans des situations s'écartant des conditions normales de travail mais pouvant néanmoins se rencontrer (absence de protection, porte anormalement ouverte, etc.).

C.2.2.2 Contamination atmosphérique

- Effectuer des prélèvements à la position des travailleurs pour les tâches sélectionnées. Ils permettront d'évaluer la contribution de l'exposition interne à la dose efficace (voir paragraphe 2.2.3). A titre d'exemple, on retient particulièrement les locaux suivants :
 - la radiopharmacie,
 - la salle d'administration,
 - la salle d'examen dédiée aux explorations de ventilation pulmonaire,
 - la chambre d'hospitalisation,
 - la salle de gestion des déchets.

C.2.3 INSTRUMENTS DE MESURE

- Evaluation de la dose au corps entier (estimation de la dose efficace) :
 - utilisation recommandée d'une chambre d'ionisation de grand volume (au moins 500 cm³) étalonnée depuis moins d'un an, de préférence en équivalent de dose ambiant H*(10)¹²,
 - utilisation de « fantômes patient » afin de simuler le diffuseur dans le cas de procédures scanographiques : fantôme 25 x 25 x 15 cm conforme à la norme NF C15-161 ou fantôme dosimétrique cylindrique de 32 cm de diamètre,
 - utilisation de préleveurs pour la mesure de la contamination atmosphériques.

- Evaluation de la dose aux extrémités (estimation de la dose équivalente) :
 - utilisation recommandée de dosimètres étalonnés en équivalent de dose individuel H_p(0,07) selon le type de rayonnement. En particulier, dans le cas des émetteurs bêta on s'assurera que le dosimètre utilisé répond de façon satisfaisante (voir Carinou *et al.*, 2008 ; Ginjaume *et al.*, 2008).
 - mesures éventuelles sur fantôme anthropomorphe de main.

Les tableaux C.III à C.X présentent des valeurs indicatives de débits d'équivalents de dose mesurés ou calculés pour différentes situations. Les hypothèses retenues pour les calculs sont extraites du guide pratique « Radionucléides & Radioprotection » (Delacroix, Guerre et Leblanc, 2006 ; seringue de 5 cm³ contenant 2,5 cm³ de solution, tableaux C.IV à C.VIII). Dans le cas du tableau C.IX, le patient a été modélisé par un cylindre d'eau de 1,5 m de hauteur et 30 cm de diamètre.

Tableau C.III : Débits mesurés de l'équivalent de dose ambiant, dH*(10)/dt, en μSv.h⁻¹, pour deux générateurs de ^{99m}Tc situés dans la même enceinte au contact (porte de l'enceinte ouverte) et devant la porte (porte fermée).

| | Activité (GBq) | Mesure | |
|--------------|-------------------|-----------------------------------|--|
| | | Contact (μSv.h ⁻¹) | Derrière porte (μSv.h ⁻¹) |
| Générateur 1 | 9,8 | 1000 | 2,3 |
| Générateur 2 | 14,3 | 1200 | 2,3 |

Tableau C.IV : Débits calculés de l'équivalent de dose individuel, dH_p(10)/dt, en μSv.h⁻¹, à différentes distances d'une seringue contenant 1 GBq de ^{99m}Tc, pour différentes protections.

| Distance (cm) | Sans protection | Tungstène (2 mm) | Plomb (5 mm) |
|---------------|-----------------|------------------|--------------|
| 25 | 380 | 35 | 0,3 |
| 50 | 96 | 9 | 0,07 |
| 100 | 24 | 2 | 0,02 |
| 150 | 11 | 1 | 0,007 |

¹² Si la mesure est faite en termes de kerma dans l'air K_a il convient de multiplier K_a mesuré par un coefficient de conversion dont la valeur tient compte de l'énergie du rayonnement. Ces coefficients peuvent être trouvés dans le rapport 57 de l'ICRU (ICRU, 1998) ou dans la publication 74 de l'ICRP (ICRP, 1996).

Tableau C.V : Débits calculés de l'équivalent de dose individuel, $dH_p(10)/dt$, en $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$, à différentes distances d'une seringue contenant 400 MBq de ^{18}F et équipée d'une protection de 5 mm de tungstène.

| Distance (cm) | Tungstène (5 mm) |
|---------------|------------------|
| 25 | 873 |
| 50 | 218 |
| 100 | 55 |
| 150 | 24 |

Tableau C.VI : Débits calculés de l'équivalent de dose individuel, $dH_p(10)/dt$, en $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$, à différentes distances d'une seringue munie d'un cache plombé d'épaisseur égale à 3 mm, pour des activités types de radionucléides.

| Distance (cm) | $^{99\text{m}}\text{Tc}$ | ^{111}In | ^{123}I | ^{67}Ga |
|---------------|--------------------------|-------------------|------------------|------------------|
| | 1000 MBq | 200 MBq | 10 MBq | 150 MBq |
| 25 | 14 | 134 | 1 | 34 |
| 50 | 3 | 34 | 0,2 | 8 |
| 100 | 0,9 | 9 | 0,06 | 2 |
| 150 | 0,4 | 3 | 0,01 | 0,9 |

Tableau C.VII : Débits indicatifs de l'équivalent de dose individuel, $dH_p(0,07)/dt$, en $\text{mSv}\cdot\text{min}^{-1}$, au contact d'une seringue sans protection contenant différents radionucléides d'activités types.

| Radionucléide | Activité (MBq) | $H_p(0,07)$ ($\text{mSv}\cdot\text{min}^{-1}$) |
|--------------------------|----------------|--|
| ^{18}F | 400 | 20 |
| ^{90}Y | 1000 | 700 [#] |
| $^{99\text{m}}\text{Tc}$ | 500 | 3 |
| ^{123}I | 10 | 0,1 |
| ^{201}Tl | 100 | 0,5 |

[#] On constate que la limite réglementaire annuelle aux extrémités et à la peau peut être atteinte en une minute

Tableau C.VIII : Valeurs indicatives de l'équivalent de dose, $H_p(0,07)$, en μSv par MBq manipulés, reçus aux mains et associés à différentes étapes de travail, pour des protocoles optimisés (opérateurs entraînés et utilisation d'équipements de protection).

| Radionucléide | Préparation | Injection |
|--------------------------|--|-----------|
| | ($\mu\text{Sv}\cdot\text{MBq}^{-1}$) | |
| ^{18}F | 0,3 | 0,2 |
| ^{90}Y | 1 | 1 |
| $^{99\text{m}}\text{Tc}$ | 0,1 | 0,1 |

Tableau C.IX : Débits de l'équivalent de dose ambiant, $dH^*(10)/dt$, en $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$, évalués à 1 m d'une gélule contenant 3,7 GBq de ^{131}I au moyen d'une mesure et d'un calcul.

| Mesure | Calcul |
|--------------------------------------|--------|
| ($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$) | |
| 270 | 240 |

Tableau C.X : Débits calculés de l'équivalent de dose individuel, $dH_p(10)/dt$, en $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$, à 30 et 100 cm d'un patient après administration de différents radionucléides d'activités types.

| Radionucléide | Activité (MBq) | à 30 cm | à 100 cm |
|-------------------|----------------|------------------------|----------|
| | | (μSv.h ⁻¹) | |
| ¹⁸ F | 400 | 270 | 45 |
| ⁶⁷ Ga | 150 | 19 | 3 |
| ^{99m} Tc | 1000 | 121 | 21 |
| ¹¹¹ In | 200 | 67 | 12 |
| ¹³¹ I | 3700 | 1020 | 175 |

Le tableau C.XI présente des valeurs indicatives d'équivalents de dose ambiant, $H^*(10)$, intégrés durant une acquisition scanographique TEP-SCAN (examen thoraco-abdomino-pelvien). La mesure a été réalisée à 1 m du centre de diffusion et à 45° par rapport au plan du statif.

Tableau C.XI : Equivalent de dose ambiant, $H^*(10)$, en mSv, mesuré lors d'une acquisition scanographique TEP-SCAN.

| Haute tension (kV) | $H^*(10)$ (mSv) |
|--------------------|-----------------|
| 120 | 0,7 |
| 140 | 1,1 |

Le tableau C.XII présente des exemples de valeurs de contamination atmosphérique relevées auprès de différents services de médecine nucléaire. Il convient d'indiquer que ces valeurs dépendent fortement des paramètres suivants : ventilation des locaux, volume des pièces et activité des radionucléides au moment de la mesure.

Tableau C.XII : Exemples de valeurs de contamination atmosphérique, en $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$.

| Local | Contamination atmosphérique ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) |
|---|---|
| Applications diagnostiques | |
| Laboratoire chaud | 250 (^{99m} Tc) |
| Salle d'injection | 0,4 (¹²³ I) |
| | 160 (^{99m} Tc) |
| Gamma-caméra | 0,1 (¹²³ I, scintigraphie thyroïdienne) |
| | 0,1 (¹³¹ I, scintigraphie thyroïdienne) |
| | 14 (^{99m} Tc, scintigraphie cardiaque) |
| | 1400 (^{99m} Tc, ventilation pulmonaire) |
| Déchets solides et liquides | < limite de détection |
| Applications thérapeutiques (¹³¹ I) | |
| Chambre | 90 - 630 |
| Couloir | 30 |
| Cuves | 1 - 1700 |

La mesure des niveaux de contamination atmosphérique associés à l'utilisation de ¹⁸F est complexe en raison de la courte période radioactive de ce radionucléide (110 min). C'est pourquoi aucune valeur n'est fournie dans le

tableau C.XII et cette contribution ne sera pas considérée dans les exemples d'évaluation de dose efficace présentés ci-après.

Comme il l'a été indiqué au paragraphe 2.2.3 de l'approche générale, il est possible de calculer des doses efficaces engagées à partir des valeurs du tableau C.XII.

Par exemple, pour le cas d'un examen de ventilation pulmonaire (^{99m}Tc) en salle de gamma-caméra donnant lieu à une contamination atmosphérique évaluée à 1400 Bq.m^{-3} , en considérant une DPUI de $1,2 \times 10^{-11} \text{ Sv.Bq}^{-1}$ (cf. tableau 3.1 de l'arrêté du 1^{er} septembre 2003 ; Arrêté, 2003), un débit respiratoire de $1,2 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ et un temps de présence de l'opérateur de 800 h, la dose efficace engagée est égale à :

$$1,2 \times 10^{-11} \text{ Sv.Bq}^{-1} \times 1400 \text{ Bq.m}^{-3} \times 1,2 \text{ m}^3.\text{h}^{-1} \times 800 \text{ h} = 16 \text{ }\mu\text{Sv}.$$

De la même façon, une scintigraphie thyroïdienne à l'iode 131 ($0,1 \text{ Bq.m}^{-3}$) est associée à une dose efficace engagée de $2 \text{ }\mu\text{Sv}$, en considérant le même débit respiratoire et le même temps de présence, mais une DPUI de $2 \times 10^{-8} \text{ Sv.Bq}^{-1}$ (cf. tableau 2.1 de l'arrêté du 1^{er} septembre 2003 ; Arrêté, 2003).

C.3 EXPLOITATION DES RESULTATS

C.3.1 DOSIMETRIE PREVISIONNELLE ET CLASSIFICATION DU PERSONNEL

- Extrapoler les évaluations dosimétriques à l'activité annuelle des opérateurs.
- Comparer aux limites réglementaires (voir le tableau II de l'introduction générale).
- Proposer une classification des opérateurs à soumettre au chef d'établissement et au médecin du travail.

Exemple :

Considérons un service réalisant des scintigraphies du squelette et de la tomographie par émission de positons. Par semaine, un manipulateur consacre 4 jours à la réalisation de scintigraphies, à raison de 25 patients par semaine, et 1 jour à la réalisation de 10 examens au ^{18}FDG .

Les tableaux C.XIIIa et C.XIIIb détaillent l'évaluation la dose efficace et de la dose équivalente aux mains que le manipulateur est susceptible d'intégrer sur une année travail. Les tâches prises en compte n'ont pas un caractère exhaustif et il convient de considérer également les doses associées notamment à l'exposition corps entier durant la préparation des radiopharmaceutiques en enceinte blindée, au cours des déplacements dans l'ensemble des zones réglementées, durant la gestion des déchets radioactifs, ...

Pour les calculs ont été retenues les hypothèses suivantes :

- 43 semaines travaillées par an,
- l'administration du radiopharmaceutique au patient dure 1 min,
- l'opérateur est à proximité immédiate du patient (à 30 cm) durant 2 min,
- les activités administrées pour le ^{99m}Tc et le ^{18}F sont respectivement choisies égales à 700 et 400 MBq,
- pour l'exposition par contamination, seule la contribution d'un examen de ventilation pulmonaire est prise en compte.

Tableau C.XIIIa : Evaluation la dose efficace et de la dose équivalente aux mains qu'un manipulateur est susceptible d'intégrer sur une année travail pour des applications avec ^{99m}Tc .

| Type d'exposition | Tâche | Calcul pour les applications avec ^{99m}Tc |
|---------------------------------|--|--|
| Externe corps entier | Administration (tableau C.VI) | $3 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1} \times 700 \text{ MBq}/1000 \text{ MBq}$ $\times 1 \text{ min}/60 \times 25 \text{ patients} \times 43 \text{ semaines}$ $= 38 \mu\text{Sv}$ |
| | Soins au patient (tableau C.X) | $121 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1} \times 700 \text{ MBq}/1000 \text{ MBq}$ $\times 2 \text{ min}/60 \times 25 \text{ patients} \times 43 \text{ semaines}$ $= 3035 \mu\text{Sv}$ |
| Contamination par inhalation | Durant un examen de ventilation pulmonaire (tableau C.XII) | $1400 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3} \times 1,2 \times 10^{-11} \text{ Sv}\cdot\text{Bq}^{-1}$ $\times 1,2 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1} \times 800 \text{ h}$ $= 16 \mu\text{Sv}$ |
| Externe extrémités | Préparation + Administration (tableau C.VIII) | $(0,1+0,1) \mu\text{Sv}\cdot\text{MBq}^{-1}/1000 \times 700 \text{ MBq}$ $\times 25 \text{ patients} \times 43 \text{ semaines}$ $= 150 \text{ mSv}$ |

Tableau C.XIIIb : Evaluation la dose efficace et de la dose équivalente aux mains qu'un manipulateur est susceptible d'intégrer sur une année travail pour des applications avec ^{18}F .

| Type d'exposition | Tâche | Calcul pour les applications avec ^{18}F (TEP) |
|---------------------------------|--|---|
| Externe corps entier | Administration (tableaux C.V et C.VI) | $218 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ $\times 1 \text{ min}/60 \times 10 \text{ patients} \times 43 \text{ semaines}$ $= 1562 \mu\text{Sv}$ |
| | Soins au patient (tableau C.X) | $270 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ $\times 2 \text{ min}/60 \times 10 \text{ patients} \times 43 \text{ semaines}$ $= 3870 \mu\text{Sv}$ |
| Contamination par inhalation | Durant un examen de ventilation pulmonaire (tableau C.XII) | - |
| Externe extrémités | Préparation + Administration (tableau C.VIII) | $(0,3+0,2) \mu\text{Sv}\cdot\text{MBq}^{-1}/1000 \times 400 \text{ MBq}$ $\times 10 \text{ patients} \times 43 \text{ semaines}$ $= 86 \text{ mSv}$ |

La dose efficace annuelle estimée est égale à 8,5 mSv, et la dose équivalente aux mains à 236 mSv. Ce manipulateur doit donc être classé en catégorie A.

C.3.2 DELIMITATION DES ZONES DE TRAVAIL

Les valeurs limites de doses associées aux zones contrôlées, surveillées et spécialement réglementées ou interdites sont rappelées dans les tableaux IIIa et IIIb de l'introduction générale.

Dans le cas d'une étude en médecine nucléaire, l'ensemble des sources de rayonnements ionisants présentes dans chaque pièce doivent être considérées (voir liste au paragraphe C.1.1) afin de définir les zones réglementées. A titre d'exemple, on retient les locaux et les activités suivants :

- une salle de caméra à scintillations dans laquelle, par heure, sont réalisées 2 scintigraphies osseuses (^{99m}Tc , 700 MBq) ;

- une salle de TEP-SCAN, dans laquelle, par heure, sont réalisées 2 examens au ^{18}F (^{18}F , 400 MBq) ;
- on distingue deux salles d'injection :
 - ✓ dans la première, 2 patients sont pris en charge par heure pour une scintigraphie du squelette ($^{99\text{m}}\text{Tc}$, 700 MBq),
 - ✓ dans la seconde, 2 patients sont pris en charge pour un TEP-SCAN (^{18}F , 400 MBq),
- une chambre protégée pour l'irathérapie dans laquelle est hospitalisé un patient auquel 3,7 GBq de ^{131}I ont été administrés.

Dans tous les cas, par souci de simplification les corrections liées aux périodes physiques et biologiques des radiopharmaceutiques ne sont pas prises en compte.

Salle de caméra à scintillations :

A 1 m du patient, le débit d'équivalent de dose est de (tableau C.X) :

$21 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1} \times 700 \text{ MBq}/1000 \text{ MBq} = 14,7 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ pour 700 MBq injectés, soit $14,7 \mu\text{Sv}$ intégrés en 1 h pour 2 patients pris en charge, chacun d'entre eux restant au plus 30 min.

La limite entre les zones surveillée et contrôlée est donc localisée à 1,4 m de la source radioactive (le patient), entre zones contrôlée et spécialement réglementée jaune à 0,77 m du patient. En pratique la zone contrôlée pourra être étendue à l'ensemble de la salle.

Salle de TEP-SCAN :

A 1 m du patient, le débit d'équivalent de dose est de (tableau C.X) : $45 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ pour 400 MBq injectés, soit $45 \mu\text{Sv}$ intégrés en 1 h pour 2 patients pris en charge, chacun d'entre eux restant au plus 30 min. A cela s'ajoutent la contribution de l'examen scanographique, soit $700 \mu\text{Sv}$ (tableau C.XI pour 120 kV) intégrés à 1 m du patient par examen, soit $1400 \mu\text{Sv}$ en 1 h pour 2 patients. Au total, $1445 \mu\text{Sv}$ sont susceptibles d'être intégrés en 1 h à 1 m du patient.

Dans le cadre d'un raisonnement fondé sur les limites de dose intégrée en une heure, la limite entre les zones contrôlée et spécialement réglementée jaune est située à une distance plus grande que les dimensions de la salle.

La limite entre zones spécialement réglementées jaune et orange est localisée à 0,85 m du patient.

Cependant, la durée du scanner étant d'environ 15 s, l'équivalent de dose intégré de $700 \mu\text{Sv}$ à 1 m est associé à un débit d'équivalent de dose instantané de $700 \mu\text{Sv} \times 3600/15 = 168 \text{ mSv}\cdot\text{h}^{-1}$, ce qui correspond à une zone rouge. Par extrapolation, la limite de cette dernière ($100 \text{ mSv}\cdot\text{h}^{-1}$) doit être localisée à 1,30 m du patient. La limite de la zone orange ($2 \text{ mSv}\cdot\text{h}^{-1}$) s'étendant jusqu'à 9,17 m, elle sera définie par les parois physiques de la salle.

D'après l'arrêté du 15 mai 2006 (Arrêté, 2006), ce sont ces dernières limites, basées sur le débit d'équivalent de dose au corps entier, qu'il convient de prendre en compte pour la définition des zones de travail. Elles impliquent en particulier que la zone rouge, située dans cet exemple à moins de 1,30 m autour du patient, doit être considérée comme interdite d'accès durant l'acquisition scanographique de 15 s.

Salles d'injections :

Pour ces évaluations le protège-seringue est considéré comme un équipement de protection collective et c'est le patient qui contribue à l'essentiel des doses.

Pour l'exposition du corps entier, à 1 m du patient, l'équivalent de dose intégré en 1 h est de (tableau C.X) :

- $2 \times 700 \text{ MBq} / 1000 \text{ MBq} \times 21 \text{ } \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1} \times 5 \text{ min} / 60 \text{ min} = 2,45 \text{ } \mu\text{Sv}$ autour du siège (ou du lit) dans la salle dédiée aux injections de $^{99\text{m}}\text{Tc}$, en supposant que chaque patient reste 5 min après injection,
- $2 \times 45 \text{ } \mu\text{Sv} \times 30 \text{ min} / 60 \text{ min} = 45 \text{ } \mu\text{Sv}$ autour du lit dans la salle dédiée aux injections de ^{18}F FDG, chaque patient restant allongé ½ heure après injection.

Pour la salle dédiée aux 2 injections horaires de $^{99\text{m}}\text{Tc}$, le point d'évaluation est en zone surveillée. La limite entre zones surveillée et contrôlée est donc située à 58 cm du patient. La limite entre zones contrôlée et spécialement réglementée jaune est à 32 cm du patient. En pratique, la salle peut être classée en zone contrôlée verte, avec une zone spécialement réglementée jaune autour du siège (ou du lit) du patient.

Pour la salle dédiée au ^{18}F FDG, le point d'évaluation est en zone spécialement réglementée jaune. La limite entre zones contrôlée et spécialement réglementée jaune est à 1,35 m du patient. La limite entre zones surveillée et contrôlée à 2,45 m. La limite entre zones spécialement réglementées jaune et orange est extrapolée à 15 cm du patient. En pratique, la salle peut être classée en zone spécialement réglementée jaune, avec une zone spécialement réglementée orange autour du lit du patient.

Notons que dans cet exemple, l'évaluation des doses équivalentes reçues aux mains en une heure (tableau C.VIII) conduit à des contraintes plus faibles pour la définition des zones de travail que celles issues des évaluations au corps entier.

Chambre d'irathérapie :

A 1 m du patient, le débit d'équivalent de dose est de (tableau C.X) : $175 \text{ } \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ pour 3,7 GBq administrés, soit $175 \text{ } \mu\text{Sv}$ susceptibles d'être intégrés en 1 h.

Le point d'évaluation est en zone spécialement réglementée jaune. La limite entre zones contrôlée et spécialement réglementée jaune est à 2,65 m du patient. La limite entre zones spécialement réglementées jaune et orange est extrapolée à 30 cm du patient.

En pratique, la chambre pourra être classée en zone spécialement réglementée jaune, avec une zone orange supplémentaire restreinte au lit du patient.

C.3.3 OPTIMISATION DE LA RADIOPROTECTION

Sans entrer dans la mise en œuvre du processus d'optimisation tel qu'il a été décrit au paragraphe 2.3.3, qui nécessite une réflexion d'ensemble sur les pratiques médicales, on souligne l'importance du respect des bonnes pratiques. On insiste en outre sur la nécessité de la mise en œuvre de moyens de protection, en particulier sur l'utilisation impérative de protège-seringues adaptés au type et à l'énergie des rayonnements.

RÉFÉRENCES

- Ankerhold, U., Hupe, O. et Ambrosi, P., 2009. *Deficiencies of active electronic radiation protection dosimeters in pulsed fields*. Radiation Protection Dosimetry, 135(3), 149-153.
- Arrêté, 2003. *Arrêté du 1^{er} septembre 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants*. Journal Officiel de la République Française n°262 du 13 novembre 2003.
- Arrêté, 2004. *Arrêté du 30 décembre 2004 relatif à la carte individuelle de suivi médical et aux informations individuelles de dosimétrie des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants*. Journal Officiel de la République Française n°304 du 31 décembre 2004.
- Arrêté, 2005. *Arrêté du 26 octobre 2005 définissant les modalités de contrôle de radioprotection en application des articles R. 231-84 du code du travail et R. 1333-44 du code de la santé publique*. Journal Officiel de la République Française n°276 du 27 novembre 2005.
- Arrêté, 2006. *Arrêté du 15 mai 2006 relatif aux conditions de délimitation et de signalisation des zones surveillées et contrôlées et des zones spécialement réglementées ou interdites compte tenu de l'exposition aux rayonnements ionisants, ainsi qu'aux règles d'hygiène, de sécurité et d'entretien qui y sont imposées*. Journal Officiel de la République Française n° 137 du 15 juin 2006.
- Bordy, J.M., Daures, J., Clairand, I., Denozière, M., Donadille, L., d'Errico, F., Gouriou, J., Itié, C. et Struelens, L., 2008. *Evaluation of the calibration procedure of active personal dosimeters for interventional radiology*. Radiation Protection Dosimetry 131(1), 87-92.
- Bottollier-Depois, J.F., Clairand, I., Donadille, L. et Rannou, A., 2007. *Dosimétrie individuelle pour l'irradiation externe : évolution des pratiques et des techniques*. Radioprotection 42(4), 477-487.
- Boulaud, D., Gérasimo, P., Martin, G., Martinot, L., Nourreddine, A. et Sens, J.C., 2003. *Evaluation du facteur de mise en suspension de contamination dans les installations nucléaires*. Radioprotection 38(4), 493-508.
- Carinou, E., Donadille, L., Ginjaume, M., Jankowski, J., Rimpler, A., Sans Merce, M., Vanhavere, F., Denozière, M., Daures, J., Bordy, J.M., Itié, C. et Covens, P., 2008. *Intercomparison on measurements of the quantity personal dose equivalent, Hp(0.07), by extremity ring dosimeters in medical fields*. Radiation Measurements 43, 565-570.
- Circulaire, 2008. *Circulaire DGT/ASN n° 1 du 18 janvier 2008 relative à l'arrêté du 15 mai 2006 relatif aux conditions de délimitation et de signalisation des zones surveillées et contrôlées et des zones spécialement réglementées ou interdites compte tenu de l'exposition aux rayonnements ionisants, ainsi qu'aux règles d'hygiène, de sécurité et d'entretien qui y sont apposées*. Bulletin Officiel du Ministère du Travail, des Relations sociales, de la Famille et de la Solidarité n° 2009/02 du 28 février 2009.
- Circulaire, 2010. *Circulaire DGT/ASN n° [...] du [...] relative aux mesures de prévention des risques d'exposition aux rayonnements ionisants*. A paraître.
- Clairand, I., Struelens, L., Bordy, J.M., Daures, J., Debroas, J., Denozières, M., Donadille, L., Gouriou, J., Itié, C., Vaz, P. et d'Errico, F., 2008. *Intercomparison of active personal dosimeters in interventional radiology*. Radiation Protection Dosimetry 129(1-3), 340-345.
- Delacroix, D., Guerre, J.P. et Leblanc, P., 2006. *Guide pratique Radionucléides & Radioprotection*. Radioprotection 39, numéro spécial. Ed. EDP Sciences, 2^e édition. ISBN 2-86883-864-2.
- Directive, 1996. *Directive 96/29/Euratom du Conseil du 13 Mai 1996 fixant les normes de base relatives à la*

protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des rayonnements ionisants. Journal Officiel des Communautés européennes n° L 159 du 29 juin 1996.

- Donadille, L., Carinou, E., Ginjaume, M., Jankowski, J., Rimpler, A., Sans Merce, M. et Vanhavere, F., 2008. *An overview of the use of extremity dosimeters in some European countries for medical applications*. Radiation Protection Dosimetry 131(1), 62-66.
- Gambini, D.J. et Granier, R., 2004. *Manuel pratique de radioprotection*. Ed. Tec & Doc, 2^e édition. ISBN 2-7430-0161-5.
- Ginjaume, M., Carinou, E., Donadille, L., Jankowski, J., Rimpler, A., Sans Merce, M., Vanhavere, F., Denozière, M., Dures, J., Bordy, J.M., Itié, C. et Covens, P., 2008. *Extremity ring dosimetry intercomparison in reference and workplace fields*. Radiation Protection Dosimetry 131(1), 67-72.
- ICRP, 1992. International Commission on Radiological Protection. *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. ICRP publication 60, Annals of the ICRP 21(1-3) (Oxford : Pergamon Press).
- ICRP, 1996. International Commission on Radiological Protection. *Conversion Coefficients for use in Radiological Protection Against External Radiations*. ICRP Publication 74, Annals of the ICRP 26(3-4) (Oxford : Pergamon Press).
- ICRP, 2007 : International Commission on Radiological Protection. *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. ICRP Publication 103, Ed. Elsevier. Edition en langue française par Nénot, J.C., Brenot, J., Laurier, D., Rannou, A. et Thierry, D. *Recommandations 2007 de la Commission internationale de protection radiologique*. Ed. Tec & Doc, 2009. ISBN 978-2-7430-1120-8.
- ICRU, 1998. International Commission on Radiations Units and Measurements. *Conversion Coefficients for use in Radiological Protection Against External Radiations*. ICRU Report 57 (Bethesda, MD 20814: ICRU Publications).
- IRSN, 2007. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire. *Guide pratique pour la réalisation des études dosimétriques de poste de travail présentant un risque d'exposition aux rayonnements ionisants*. Rapport IRSN DRPH/DIR n°2007-6.
- ISO, 1988. *Évaluation de la contamination de surface - Partie 1 : émetteurs bêta (énergie bêta maximale supérieure à 0,15 MeV) et émetteurs alpha*. Norme NF ISO 7503-1:1988. *Évaluation de la contamination de surface - Partie 2 : contamination de surface par le tritium*. Norme NF ISO 7503-2:1988. *Évaluation de la contamination de surface - Partie 3 : émetteurs à transition isomérique et capture électronique, émetteurs bêta basse énergie (énergie bêta maximale inférieure à 0,15 MeV)*. Norme NF ISO 7503-3:1988.
- Jimonet, C. et Métivier, H. (coordonnateurs), 2007. *Personne Compétente en Radioprotection. Vol.1 « Principes de radioprotection - réglementation »*. Ed. EDP Sciences. ISBN 978-2-86883-948-0.
- Knoll, G.F., 1989. *Radiation detection and measurement, second edition*. Ed. John Wiley & Sons. ISBN 0-471-81504-7.
- Microshield, 2005. *MicroShield® Version 7.00*. Copyright © 1995-2005 Grove Software, Inc.
- Rannou, A., Barthe, J., Aubert, B., Brégeon, B., Champlong, J., Colson, P., Espagnan, M., Herbaut, Y., Thévenin, J.C. et Valéro M., 1998. *Etat de l'art des techniques de dosimétrie individuelle et analyse des besoins*. Radioprotection 33(4), 405-433.
- Renoux, A. et D. Boulaud, D., 1998. *Les aérosols : Physique & métrologie*. Ed. Lavoisier Tec&Doc. ISBN 2-7430-

0231-X.

- Servent, J.P., Gauron, C. et Boulay, M.H., 2006. *Les rayonnements ionisants. Prévention et maîtrise du risque*. Ed. INRS, ED 958.
- Thévenin, J.C., 2003. *Instrumentation pour la dosimétrie individuelle des travailleurs*. Techniques de l'ingénieur BN 3 490, 1-16 et Doc. BN 3 490, 1-4.
- Tschurlovits, M., Leitner, A. et Daverda, G., 1992. *Dose rate constants for new dose quantities*. Radiation Protection Dosimetry 42(2), 77-82.
- Tubiana, M. et Lallemand, J., 2002. *Radiobiologie et radioprotection*. Que sais-je ? 2439, Ed. Presses universitaires de France (PUF), 2^e édition. ISBN 2130529194.
- Vanhavere, F., Carinou, E., Donadille, L., Ginjaume, M., Jankowski, J., Rimpler, A. et Sans Merce, M., 2008. *An overview of extremity dosimetry in medical applications*. Radiation Protection Dosimetry 129(1-3) 350-355.