

The logo for IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire) features the letters 'IRSN' in a bold, sans-serif font. The 'I', 'R', and 'S' are red, while the 'N' is blue.

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 4)**

Pôle radioprotection, environnement, déchets et
crise

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 ET CLASSER LES TRAVAILLEURS. 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 DEVELOPEE DANS DES FICHES SPECIFIQUES, CHACUNE DEDIEE A UN DOMAINE D'ACTIVITE PARTICULIER. A CE JOUR, SEUL LE DOMAINE MEDICAL A FAIT L'OBJET DE FICHES SPECIFIQUES. PAR EXTENSION, IL FOURNIT EGALEMENT UNE AIDE POUR LA DELIMITATION DES ZONES REGLEMENTEES DANS L'ENVIRONNEMENT DE TRAVAIL CONCERNE.

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 AND CLASSIFY THE WORKERS INTO DIFFERENT CATEGORIES. 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. UP TO NOW ONLY SHEETS RELATED TO MEDICAL FIELD HAVE BEEN DEVELOPED. BY EXTENSION, ADVICES FOR CLASSIFY THE WORKPLACES INTO DIFFERENT AREAS ARE ALSO SUPPLIED.

MOTS-CLES

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

SOMMAIRE

INTRODUCTION	9
1 CONCEPTS ET OUTILS	10
1.1 OBJECTIF D'UNE ETUDE DOSIMETRIQUE DE POSTE DE TRAVAIL	10
1.2 APPORT DE L'ETUDE DOSIMETRIQUE DE POSTE POUR LA DELIMITATION DES ZONES REGLEMENTEES	10
1.3 CADRE REGLEMENTAIRE ET ENJEUX	11
1.3.1 Pourquoi ?.....	11
1.3.2 Quand ?.....	12
1.3.3 Comment ?.....	12
1.4 SOURCES ET EXPOSITIONS.....	12
1.4.1 L'exposition externe	12
1.4.2 L'exposition interne.....	13
1.5 GRANDEURS DOSIMETRIQUES	13
1.5.1 Grandeurs de protection	13
1.5.2 Grandeurs opérationnelles pour l'exposition externe	14
1.5.3 Grandeurs pour l'exposition interne	15
1.6 LIMITES REGLEMENTAIRES ANNUELLES ET DELIMITATION DES ZONES DE TRAVAIL	15
1.7 MOYENS DE MESURE	18
1.7.1 Mesure de l'exposition externe	19
1.7.2 Mesure de la contamination	20
1.7.3 Mesure du radon	21
1.8 OUTILS DE CALCUL POUR L'EXPOSITION EXTERNE.....	21
1.9 REFERENCES UTILES	22
2 APPROCHE GENERALE D'UNE ETUDE DE POSTE	23
2.1 PREPARATION	23
2.1.1 Installations	23
2.1.2 Tâches	23
2.2 EVALUATION DES DOSES	24
2.2.1 Cartographie des débits d'équivalents de dose de l'installation	24
2.2.2 Détermination des niveaux de contamination.....	24
2.2.3 Dose associée à chaque tâche.....	25
2.3 EXPLOITATION DES RESULTATS.....	25
2.3.1 Dosimétrie prévisionnelle et classement du personnel.....	25
2.3.2 Délimitation des zones de travail.....	26
2.3.3 Optimisation de la radioprotection	26
3 FICHES SPECIFIQUES.....	28
FICHE A : ETUDE DE POSTE DE TRAVAIL EN RADIOLOGIE MEDICALE	
CONVENTIONNELLE	29
A.1 PREPARATION	29
A.1.1 Description de l'installation.....	29

A.1.2	Evaluation des procédures (ou tâches) réalisées dans l'installation	29
A.2	EVALUATION DES DOSES	30
A.2.1	Sélection des tâches	30
A.2.2	Acquisition des données dosimétriques	30
A.3	EXPLOITATION DES RESULTATS	32
A.3.1	Dosimétrie prévisionnelle et classement du personnel	32
A.3.2	Délimitation des zones de travail	32
A.3.3	Optimisation de la radioprotection	33
FICHE B : ETUDE DE POSTE DE TRAVAIL EN RADIOLOGIE MEDICALE		
INTERVENTIONNELLE		34
B.1	PREPARATION	34
B.1.1	Description de l'installation	34
B.1.2	Evaluation des procédures (ou tâches) réalisées dans l'installation	34
B.2	EVALUATION DES DOSES	35
B.2.1	Sélection des tâches	35
B.2.2	Acquisition des données dosimétriques	35
B.3	EXPLOITATION DES RESULTATS	39
B.3.1	Dosimétrie prévisionnelle et classement du personnel	39
B.3.2	Délimitation des zones de travail	39
B.3.3	Optimisation de la radioprotection	40
FICHE C : ETUDE DE POSTE DE TRAVAIL EN MEDECINE NUCLEAIRE		41
C.1	PREPARATION	41
C.1.1	Description de l'installation	41
C.1.2	Evaluation des procédures (ou tâches) réalisées dans l'installation	43
C.2	EVALUATION DES DOSES	44
C.2.1	Sélection des tâches	44
C.2.2	Acquisition des données dosimétriques	44
C.2.2.1	Exposition externe	45
C.2.2.2	Contamination atmosphérique	45
C.3	EXPLOITATION DES RESULTATS	49
C.3.1	Dosimétrie prévisionnelle et classement du personnel	49
C.3.2	Délimitation des zones de travail	50
C.3.3	Optimisation de la radioprotection	52
FICHE D : ETUDE DE POSTE DE TRAVAIL EN SCANOGRAPHIE		53
D.1	PREPARATION	53
D.1.1	Description de l'installation	53
D.1.2	Evaluation des procédures (ou tâches) réalisées dans l'installation	53
D.2	EVALUATION DES DOSES	54
D.2.1	Sélection des tâches	54
D.2.2	Acquisition des données dosimétriques	54
D.3	EXPLOITATION DES RESULTATS	56
D.3.1	Dosimétrie prévisionnelle et classement du personnel	56

D.3.2 Délimitation des zones de travail	56
D.3.3 Optimisation de la radioprotection	57
FICHE E : ETUDE DE POSTE DE TRAVAIL EN CURIETHERAPIE.....	58
E.1 PREPARATION	58
E.1.1 Description de l'installation :	58
E.1.2 Evaluation des procédures (ou tâches) réalisées dans l'installation	59
E.2 EVALUATION DES DOSES	60
E.2.1 Sélection des tâches	60
E.2.2 Acquisition des données dosimétriques	60
E.3 EXPLOITATION DES RESULTATS.....	61
E.3.1 Dosimétrie prévisionnelle et classement du personnel	61
E.3.2 Délimitation des zones de travail.....	64
E.3.4 Optimisation de la radioprotection	64

Avant-propos

Le présent document constitue la version 4 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 (PRP-HOM/DIR n°2012-10). L'évolution porte sur l'ajout de la fiche E relative à la curiethérapie (chapitre 3) et sur la mise à jour des références réglementaires.

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 évaluation du risque encouru [art. R4451-112], couramment appelée « *étude dosimétrique du poste 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 le classement des travailleurs et la mise en œuvre du processus d'optimisation de la radioprotection. Ce chapitre précise également comment les éléments nécessaires à une étude dosimétrique de poste peuvent être exploités pour la délimitation des zones de travail.

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 le classement 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 travail**¹ est d'évaluer, dans des **conditions normales**² 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 **tâches**³ 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 en vue de limiter, voire d'éliminer ce risque.

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,
- 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 des données qui doivent également être exploitées pour l'optimisation de la radioprotection en application du principe ALARA et la délimitation des zones réglementées (zones surveillée, contrôlée, spécialement réglementée, interdite).

1.2 APPORT DE L'ETUDE DOSIMETRIQUE DE POSTE POUR LA DELIMITATION DES ZONES REGLEMENTEES

La délimitation des zones de travail repose sur l'identification de la nature et de l'ampleur des risques associés à la présence d'une ou plusieurs sources de rayonnements ionisants dans l'environnement de travail compte tenu des caractéristiques de cette ou ces source(s) et non pas de la façon dont elles sont exploitées en condition de travail. En effet, la circulaire DGT/ASN n°1 du 18 janvier 2008 précise ainsi que « si le temps de travail effectif est à prendre en compte pour le classement des travailleurs [...], il n'est pas pertinent pour la délimitation de la zone

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 ASN-DGT, 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.

réglementée qui matérialise un danger d'exposition aux rayonnements ionisants ». L'employeur doit alors prendre en compte non pas les différents postes de travail susceptibles d'être exposés mais les « conditions normales les plus pénalisantes correspondant soit aux modes opératoires conduisant aux doses les plus élevées soit aux émissions maximales possibles dans l'installation (activités maximales autorisées ou manipulées pour les radionucléides, charges maximales pour des générateurs électriques...) ».

Cependant, dans la mesure où « le chef d'établissement évalue, sur ces bases, les niveaux d'exposition externe et, le cas échéant interne autour de la source », la méthodologie à mettre en place pour réaliser la délimitation des zones présente de fortes analogies avec celle développée pour les études dosimétriques de poste de travail en gardant en tête les trois différences importantes entre les approches méthodologiques de l'étude de poste et de la délimitation des zones réglementée, rappelées dans la circulaire DGT/ASN n° du 18 janvier 2008 :

- « Si le temps de travail effectif est à prendre en compte pour le classement des travailleurs, [...] il n'est pas pertinent pour la délimitation des zones réglementées ».
- Ce ne sont pas les conditions de travail les plus fréquentes qui doivent être prises en compte pour la délimitation des zones réglementées mais « les situations représentatives des conditions normales d'utilisation les plus pénalisantes »
- Et enfin, « ... La réduction d'exposition liée au port éventuel d'équipements de protection individuelle [...] ne doit pas être retenue pour la délimitation des zones réglementées. »

1.3 CADRE REGLEMENTAIRE ET ENJEUX

1.3.1 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. La transposition de la directive 2013/59/Euratom (Directive, 2013) ne devrait pas apporter de nouveauté concernant les analyses de poste et les évaluations de risque.

La notion d'analyse de poste est introduite dans le code du travail, notamment par l'article R. 4451-11 : « *Dans le cadre de 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'évaluation du risque - ou étude dosimétrique 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 le classement des travailleurs (articles R. 4451-44 à R. 4451-46). Elle constitue une des missions de la PCR (article R 4451-112). 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. 4451-62). L'arrêté du 17 juillet 2013, pris en application de l'article R. 4451-92 relatif à la carte de suivi médical, prévue à l'article R. 4451-91, et au suivi dosimétrique des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants (Arrêté, 2013), spécifie que le choix des méthodes de dosimétrie « repose sur l'analyse des postes de travail réalisée par l'employeur, qui comprend notamment la caractérisation des rayonnements ionisants susceptibles d'être émis. L'employeur détermine, au mieux des techniques disponibles et dans les conditions techniquement et économiquement acceptables, le système de dosimétrie adapté...».

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. 4451-30).

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. 4451-103. En outre, conformément à l'article R. 4451-112, 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. 4451-57) et utilisée par le médecin du travail (article R. 4451-82) qui statue sur l'aptitude médicale et les modalités de surveillance médicale de chaque travailleur.

1.3.2 QUAND ?

Une analyse de poste, comportant l'évaluation du risque radiologique, 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).

1.3.3 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 (anthroporadiométrie, 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.

1.4 SOURCES ET EXPOSITIONS

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

1.4.1 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.

1.4.2 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.

1.5 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).

1.5.1 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 .

1.5.2 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 **$H_p(0,07)$** [$H_p(10)$ pour les neutrons] 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 116 de l'ICRP (ICRP, 2010).

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

1.5.3 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 (Bq) 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 (h).

Dans le cas particulier de l'exposition au radon (radon 222 et radon 220), ce sont des facteurs de conversion exprimant la dose efficace par unité d'exposition à l'énergie potentielle ($\text{Sv}/\text{J}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$) qui sont utilisés (Arrêté, 2003).

Concernant les autres voies de contamination mentionnées au chapitre 1.4.2, elles ne concernent pas le fonctionnement normal, à l'exception de la voie cutanée, et sont très délicates à évaluer. Comme évoqué plus loin (cf. § 2.2.3), bien que les contaminations par voie cutanée ne soient pas à négliger, l'inhalation constitue la voie la plus probable d'incorporation de radionucléides dans l'organisme.

1.6 LIMITES REGLEMENTAIRES ANNUELLES ET DELIMITATION DES ZONES DE TRAVAIL

Les limites réglementaires de doses reçues par les **travailleurs exposés**⁴ 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 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.

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).

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 §	20	6		
Dose équivalente *	mains, avant-bras, pieds et chevilles	500	150	l'exposition de l'enfant à naître doit rester inférieure à 1 mSv
	peau #	500	150	
	cristallin	150	45	

§ Exposition externe et interne

* Exposition externe

Applicable sur toute surface de 1 cm²

Les modalités de délimitation de zones sont fixées dans l'arrêté du 15 mai 2006, modifié, 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 ; Arrêté, 2014). Cet arrêté est pris en application des articles R. 4451-18 et R. 4451-20 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 permettre de respecter les dispositions prévues à l'article R. 4451-18 du code du travail (voir tableau IIIb) pour ce qui concerne les doses susceptibles d'être reçues par les travailleurs en une année.

En outre, tout travailleur appelé à exécuter une opération en zone contrôlée doit faire l'objet d'un suivi par dosimétrie opérationnelle (article R4451-67).

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
Non Réglementée	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	mSv.h ⁻¹	2
	contrôlée orange	mSv en une heure	100	mSv.h ⁻¹	100
Interdite, désignée rouge	mSv en une heure	≥ 100	≥ 2 500	mSv.h ⁻¹	≥ 100

§ Exposition externe et interne (uniquement externe pour zone attenante)

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

Tableau IIIb. Limites réglementaires pour la délimitation des zones de travail (article R. 4451-18 du code du travail).

Zone	Unité	Limite de dose efficace §	Limite de dose équivalente §		
			mains, avant-bras, pieds, chevilles	peau #	cristallin
Non Réglementée	mSv sur 12 mois	< 1	< 50	< 50	< 15
Surveillée	mSv sur 12 mois	> 1 et ≤ 6	> 50 et ≤ 150	> 50 et ≤ 150	> 15 et ≤ 45
Contrôlée	mSv sur 12 mois	≥ 6	> 150	> 150	> 45

§ Exposition externe et interne (uniquement externe pour zone attenante)

Applicable sur toute surface de 1 cm²

Le 21 avril 2011, la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) a publié une déclaration en faveur d'une réduction de la limite de dose équivalente au cristallin pour les travailleurs dans les situations d'expositions planifiées (ICRP 2011 ; IAEA 2011). Elle recommande désormais une limite de dose de 20 mSv par an, en moyenne sur des périodes définies de 5 ans, sans dépasser 50 mSv au cours d'une même année.

Cette réduction de la limite de dose équivalente au cristallin pour les travailleurs est confirmée par la directive 2013/59/EURATOM du 5 décembre 2013 qui précise au point 3 de l'article 9 : « la limite de dose équivalente pour le cristallin est fixée à 20 mSv par an ou à 100 mSv sur une période de cinq années consécutives, pour autant que la dose reçue au cours d'une année ne dépasse pas 50 mSv, comme prévu dans la législation nationale ». Cette directive est en cours de transposition en droit français.

Tous domaines d'activité confondus, les recommandations de l'IRSN, en cas d'exposition du cristallin, sont les suivantes (IRSN, 2013) :

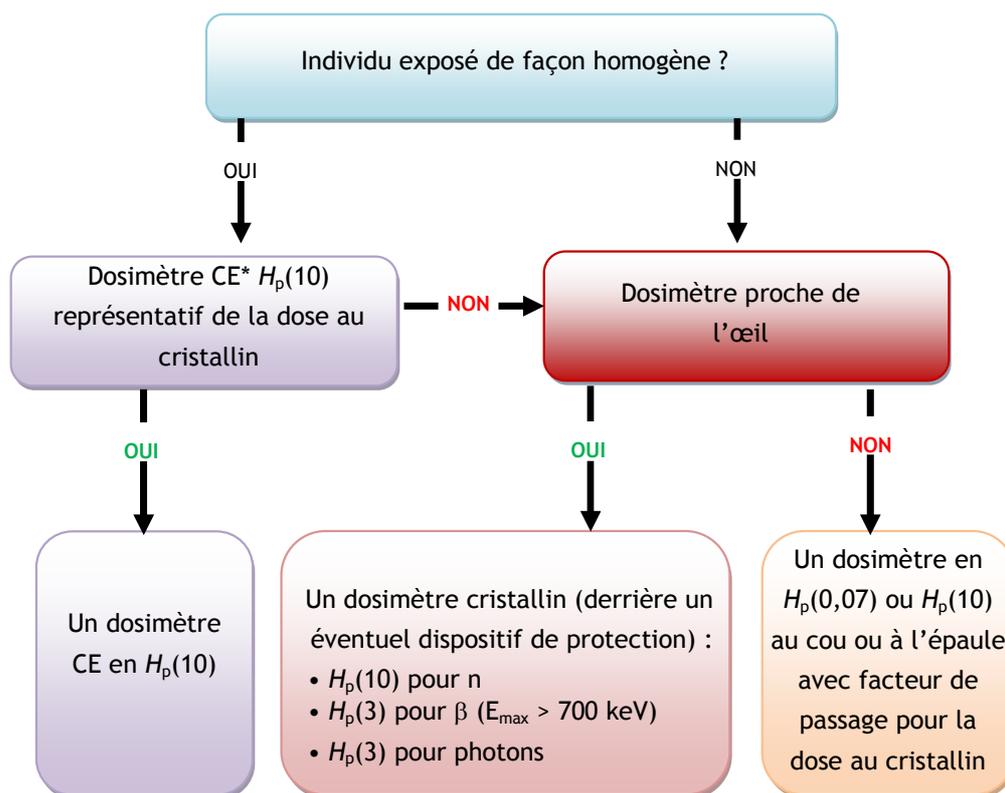
- Former et sensibiliser les opérateurs et les acteurs de la radioprotection à tous les « outils » permettant de réduire la dose au travailleur, tant par la conception des équipements au niveau de la source que par le déploiement des protections individuelles du cristallin.
- Pour toutes les situations où l'exposition du cristallin n'est pas ou est mal connue, réaliser des études pour évaluer cette exposition et, de manière plus générale, intégrer systématiquement la dose au cristallin dans toute étude de poste.
- Mettre en œuvre une surveillance dosimétrique, selon l'approche déclinée ci-après, dans les cas où l'exposition du cristallin évaluée lors de l'étude de poste est susceptible de dépasser 15 mSv/an (limite public).

Lorsque l'estimation correcte ou enveloppe de la dosimétrie du cristallin par le dosimètre poitrine ne peut être clairement démontrée, utiliser un dosimètre individuel « cristallin » étalonné en $H_p(3)$, sauf contraintes particulières ne le permettant pas ou circonstances conduisant à une mesure non représentative.

Dans les situations où l'utilisation d'un dosimètre individuel « cristallin » n'est pas possible ou bien si l'information fournie par ce dosimètre est susceptible d'être erronée, situations qui doivent être dûment justifiées, l'estimation de l'exposition du cristallin doit être réalisée :

- ✓ soit à partir du dosimètre « corps entier » auquel est appliqué un facteur correctif, déterminé par des études spécifiques (IRSN, 2013), garantissant le caractère enveloppe de l'estimation ;
- ✓ soit à partir d'un dosimètre placé proche de l'œil (par exemple au niveau du cou ou de l'épaule) auquel est appliqué, si nécessaire, un facteur correctif déterminé par des études spécifiques (IRSN, 2013), garantissant le caractère enveloppe de l'estimation.

Le logigramme de la figure suivante résume la démarche conduisant à définir les modalités de la surveillance dosimétrique du cristallin décrite ci-dessus (IRSN, 2013).



* CE : Corps Entier

1.7 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, 2010). 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.

1.7.1 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 la thermoluminescence (TLD), de la photoluminescence stimulée optiquement (OSL), ou de la radio-photoluminescence (RPL). Pour les neutrons, en plus du TLD, 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, ces détecteurs passifs 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.

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 importante, 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 actifs 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 IV. 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 BF₃ 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 (2007) 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). De nombreux guides et présentations sur ces aspects sont également disponibles sur le site internet www.oramed-fp7.eu.

1.7.2 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 Bq.cm², soit indirectement par frottis suivi d'un comptage d'activité (Bq), en ayant pris soin de définir une surface standard (cm²) 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).

1.7.3 MESURE DU RADON

Différents types de mesure du radon peuvent être réalisés en fonction des objectifs :

- **Mesure ponctuelle** : Mesure consistant en un prélèvement effectué sur une courte durée inférieure à une heure, en un point donné de l'espace, et en une analyse (par exemple un comptage) réalisée simultanément ou après un délai déterminé.
- **Mesure intégrée** : Mesure consistant en une accumulation au cours du temps de grandeurs physiques (nombre de traces nucléaires, nombre de charges électriques, etc.), liées à la désintégration du radon et/ou de ses descendants, et en une analyse réalisée à l'issue de la période d'accumulation. Une durée de mesure minimale d'une semaine est nécessaire afin d'inclure un nombre minimum de cycles de variation journalière.
- **Mesure en continu** : Mesure consistant en un prélèvement effectué de façon continue (ou par pas d'intégration inférieur ou égal à l'heure) et en une analyse réalisée simultanément ou en léger différé. Afin de suivre l'évolution temporelle de l'activité volumique du radon la durée de l'investigation doit être adaptée à la dynamique du phénomène étudié.

La mesure du radon est régie par des normes AFNOR ou, pour certains lieux particuliers (lieux souterrains, bâtiments thermaux), par des guides méthodologiques spécifiques. Les informations afférentes peuvent être trouvées sur le site de l'IRSN (IRSN, <http://www.irsn.fr/FR/connaissances/Environnement/expertises-radioactivite-naturelle/radon/Pages/3-mesure-radon.aspx?dId=9aef83d8-dab7-4201-beed-16551b10812c&dwId=2c2a9274-9106-41cf-b110-445981d4784e>).

1.8 OUTILS DE CALCUL POUR L'EXPOSITION EXTERNE

L'évaluation des doses reçues par les travailleurs doit 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.

1.9 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 (2007),
- 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 « fiches d'aide à l'analyse des risques », téléchargeables depuis le site Internet du même institut,
- les brochures « Radioprotection : radionucléides » élaborées conjointement par l'INRS et l'IRSN sont également téléchargeables sur le site de l'IRSN. (IRSN, http://www.irsn.fr/FR/professionnels_sante/radiopro_travailleurs/Pages/rad_travailleurs_medecine_nucleaire.aspx) ainsi que sur le site de l'INRS (INRS, www.inrs.fr).
- 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),
- 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.

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, cette analyse préparatoire peut être effectuée sur une période de temps représentative.

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 représentées 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 débits d'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 le classement du personnel, délimiter les zones de travail et contribuer à l'optimisation de la radioprotection.

2.2.1 CARTOGRAPHIE DES DEBITS D'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 1.7.1). 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'on divise l'équivalent de dose par la durée effective totale de l'irradiation, on en déduit le débit de dose instantané pendant l'impulsion. Si l'on divise l'équivalent de dose par la durée de la mesure, on obtient le débit de dose 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. 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 :

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

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, tel 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 au classement du personnel, à la délimitation des zones de travail et au processus d'optimisation de la radioprotection.

2.3.1 DOSIMETRIE PREVISIONNELLE ET CLASSEMENT DU PERSONNEL

Les équipements de protection individuelle vis-à-vis des expositions externe et interne 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 chaque travailleur, il convient de considérer les tâches qu'il réalise en moyenne sur une période de référence. Les

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

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. Il est recommandé de prendre en compte les situations incidentelles susceptibles de se produire.

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. 4451-45 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.

En tout état de cause, le classement du personnel relève *in fine* de la responsabilité de l'employeur, après avis du médecin du travail (articles R. 4451-44 à R. 4451-46 du code du travail).

2.3.2 DELIMITATION DES ZONES DE TRAVAIL

Il est rappelé que la délimitation des zones de travail est indépendante des études de poste et du classement 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 1.6), 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.

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 les plus efficaces, compte tenu de l'enjeu radiologique. 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, en adaptant les moyens mis en œuvre à l'enjeu radiologique du poste de travail.

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, tel le support patient.

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...) 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 le classement 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.).
- 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 C15-160 (tronc : fantômes de dimensions minimales 25 x 25 x 15 cm³, tête : cylindre de 16 à 20 cm de diamètre et de 15 cm de hauteur minimale), 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 $H^*(10)$ 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 CLASSEMENT 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 un classement des opérateurs à soumettre à l'employeur et au médecin du travail.

Exemple :

Considérons une installation de radiologie dédiée à des procédures radiologiques pulmonaires de face et lombaires de face debout. Il est réalisé sur cette installation environ 800 actes par mois soit 9600 actes par an. La procédure lombaire de face étant la plus représentative de cette salle, on simplifiera le calcul en ne considérant que cette procédure, qui se trouve être, de plus, la plus pénalisante.

10 manipulateurs tournent sur ce poste. Lors des procédures, les manipulateurs restent derrière le paravent plombé. A ce poste, l'équivalent de dose est de l'ordre de $20 \cdot 10^{-3}$ μSv par acte (cf. Tableau A.II). Ainsi la dose efficace annuelle estimée par manipulateur est égale à $20 \cdot 10^{-3}$ μSv x 9600 actes / 10 manipulateurs = 19,2 μSv .

Ces manipulateurs peuvent être classés en catégorie B.

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 des situations représentatives des conditions normales d'utilisation les plus pénalisantes. Ces conditions normales d'utilisation intègrent les aléas raisonnablement prévisibles inhérents aux conditions d'utilisation.

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 l'installation de radiologie dédiée à des procédures radiologiques pulmonaires de face et lombaires de face debout telle qu'évoquée plus haut. Nous avons vu que la procédure la plus pénalisante sur cette installation est l'examen lombaire de face debout (cf. Tableau A. II). En une heure, admettons que 12 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 12×6 μSv = 72 μSv serait susceptible d'être reçue à 50 cm du diffuseur.

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 $50 \text{ cm} \times \sqrt{72 \mu\text{Sv} / 25 \mu\text{Sv}} = 84 \text{ cm}$ du diffuseur, et celle de la zone contrôlée verte à $50 \text{ cm} \times \sqrt{72 \mu\text{Sv} / 7,5 \mu\text{Sv}} = 1,54 \text{ m}$, compte tenu des limites du tableau IIIa.

En pratique, la salle de traitement peut être classée en zone contrôlée verte, à l'exclusion d'une zone d'un rayon de 84 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 dentaire (ASN 2014).

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.

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 : anesthésistes, 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, tel le support patient.

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.

Il convient de noter qu'au cours des procédures de radiologie interventionnelle, les opérateurs peuvent se tenir à proximité du patient (distance de 50 à 100 cm) derrière des protections collectives ou à la console. Ils peuvent avoir 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 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.

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 le classement 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.).
- 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 ambiant $H^*(10)^9$,

⁹ 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

- pour simuler la diffusion des rayonnements par le patient, utiliser des fantômes conformes à la norme NF C15-160 (tronc : fantômes de dimensions minimales 25 x 25 x 15 cm³, tête : cylindre de 16 à 20 cm de diamètre et de 15 cm de hauteur minimale), afin de simuler le diffuseur.
- 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).

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

Tableau B.I : Valeurs indicatives des débits instantanés d'équivalent de dose $dH^*(10)/dt$ à 70 kV 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 ^s (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

^s Diamètre au niveau de l'imageur

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

dont la valeur tient compte de l'énergie moyenne du rayonnement X.

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 CLASSEMENT DU PERSONNEL

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

Exemple :

Considérons un service de chirurgie générale et vasculaire disposant d'une salle de radiologie interventionnelle. Sur un an le service réalise environ 40 embolisations utérines, 130 gastrostomies, 60 angioplasties et 40 artériographies des membres inférieurs. 4 médecins tournent sur ces activités. Pour notre exemple nous nous intéressons exclusivement au cas des médecins qui restent à proximité des patients tout le long de la procédure. Mais dans un cas réel il faudrait également considérer les manipulateurs et anesthésistes qui eux entrent et sortent de la salle durant la procédure.

Etant donné les ordres de grandeur et afin de simplifier l'exemple de calcul quel que soit le type d'examen pratiqué on considèrera une dose efficace corps entier intégrée sur un examen entier, sous le tablier plombé de 1 μ Sv, le médecin étant à 50 cm de la source. Pour le cristallin on considèrera une dose équivalente de 80 μ Sv là encore quel que soit le type d'examen pratiqué.

La dose efficace annuelle estimée pour un médecin est égale à $270 \text{ actes} \times 1 \mu\text{Sv} / 4 \text{ médecins} = 68 \mu\text{Sv}$. La dose équivalente annuelle au cristallin estimée est égale à $270 \text{ actes} \times 80 \mu\text{Sv} / 4 \text{ médecins} = 5,4 \text{ mSv}$.

Les médecins de ce service peuvent être classés en catégorie B.

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 des situations représentatives des conditions normales d'utilisation les plus pénalisantes. Ces conditions normales d'utilisation intègrent les aléas raisonnablement prévisibles inhérents aux conditions d'utilisation.

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 salle où l'embolisation utérine, procédure radiologique interventionnelle d'une durée de l'ordre de 50 min est la procédure la plus pénalisante pouvant être réalisée dans cette salle. 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 48 cm (cas le plus pénalisant). Le débit instantané d'équivalent de dose ambiant à 0,5 m du diffuseur, est égal à 3 mSv/h en radioscopie et 76 mSv/h en radiographie (voir respectivement les tableaux B.I et B.II).

Ceci correspond à une dose efficace en 1 heure égale à 2 mSv pour 40 min de radioscopie et 2,5 mSv pour 2 min de radiographie.

La dose efficace totale en 1 heure est donc égale à 4,5 mSv. Selon la loi de l'inverse du carré de la distance, qui n'est qu'une approximation, la limite entre la zone contrôlée orange et la zone contrôlée jaune serait située à $50 \text{ cm} \times \sqrt{4,5 \text{ mSv} / 2 \text{ mSv}} = 75 \text{ cm}$ du diffuseur, et celles entre la zone contrôlée jaune et verte respectivement à $50 \text{ cm} \times \sqrt{4,5 \text{ mSv} / 0,025 \text{ mSv}} = 6,7 \text{ m}$, compte tenu des limites du tableau IIIa.

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 75 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 dentaire (ASN 2014).

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 trois pistes d'amélioration suivantes :

- la diminution des cadences d'images en radioscopie et en radiographie,
- l'utilisation de filtrations additionnelles,
- le port de lunettes plombées, compte tenu des nouvelles dispositions adoptées par la directive 2013/59/EURATOM du 5 décembre 2013 relative à la réduction de la limite de dose équivalente pour le cristallin.

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'application clinique. 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 ont pour principal objet de servir d'appui aux exemples de classement 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 1.6).

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.

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	80	
				Traitement de certains lymphomes	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	300-700 40-200 20-80 185-1000 30-120 37-370
				Tomoscintigraphie	myocardique cérébrale	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'examens 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 le classement 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.).
- 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 $H^*(10)^{10}$,
 - 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.

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.

¹⁰ 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).

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 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$, 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	Derrière porte
		($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$)	($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$)
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 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$, 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

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 ¹⁸F 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)	^{99m} 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 $mSv.min^{-1}$, au contact d'une seringue sans protection contenant différents radionucléides d'activités types.

Radionucléide	Activité (MBq)	$H_p(0,07)$ ($mSv.min^{-1}$)
^{18}F	400	20
^{90}Y	1000	700 [#]
^{99m}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 ($\mu Sv.MBq^{-1}$)	Injection ($\mu Sv.MBq^{-1}$)
^{18}F	0,3	0,2
^{90}Y	1	1
^{99m}Tc	0,1	0,1

Tableau C.IX : Débits de l'équivalent de dose ambiant, $dH^*(10)/dt$, en $\mu Sv.h^{-1}$, 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
($\mu Sv.h^{-1}$)	
270	240

Tableau C.X : Débits calculés de l'équivalent de dose individuel, $dH_p(10)/dt$, en $\mu Sv.h^{-1}$, 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 ($\mu Sv.h^{-1}$)
^{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 $Bq.m^{-3}$.

Local	Contamination atmosphérique ($Bq.m^{-3}$)
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 ^{18}F 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 $1,2 \times 10^{-11} Sv.Bq^{-1}$ (cf. tableau 3.1 de l'arrêté du 1^{er} septembre 2003 ; Arrêté, 2003), un débit respiratoire de $1,2 m^3.h^{-1}$ et un temps de présence de l'opérateur de 800 h, la dose efficace engagée est égale à :

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

De la même façon, une scintigraphie thyroïdienne à l'iode 131 ($0,1 Bq.m^{-3}$) est associée à une dose efficace engagée de $2 \mu Sv$, en considérant le même débit respiratoire et le même temps de présence, mais une DPUI de $2 \times 10^{-8} Sv.Bq^{-1}$ (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 CLASSEMENT 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 un classement 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}F FDG.

Les tableaux C.XIIIa et C.XIIIb détaillent l'évaluation de 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 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 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 listés ci-dessous, en considérant les situations représentatives des conditions normales d'utilisation les plus pénalisantes. Ces conditions normales d'utilisation intègrent les aléas raisonnablement prévisibles inhérents aux conditions d'utilisation :

- une salle de caméra à scintillations dans laquelle, par heure, sont réalisées au maximum 2 scintigraphies osseuses (^{99m}Tc , 700 MBq) ;
- une salle de TEP-SCAN, dans laquelle, par heure, sont réalisées au maximum 4 examens au ^{18}F (^{18}F , 400 MBq) ;
- on distingue deux salles d'injection :
 - ✓ dans la première, au plus 2 patients sont pris en charge par heure pour une scintigraphie du squelette (^{99m}Tc , 700 MBq),
 - ✓ dans la seconde, au plus 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 μSv 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 μSv intégrés en 1 h pour 3 patients pris en charge, chacun d'entre eux restant au plus 20 min. A cela s'ajoutent la contribution de l'examen scanographique, soit 700 μSv (tableau C.XI pour 120 kV) intégrés à 1 m du patient par examen, soit 2100 μSv en 1 h pour 3 patients. Au total, 2145 μSv 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 1,4 m du patient.

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 et fiche D pour ce qui concerne le scanner)).

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.

Compte tenu des nouvelles dispositions adoptées par la directive 2013/59/EURATOM du 5 décembre 2013 relative à la réduction de la limite de dose équivalente pour le cristallin en cours de transposition en droit français et dans un esprit d'optimisation de la radioprotection, l'utilité du port de lunettes plombées doit être étudiée.

FICHE D : ETUDE DE POSTE DE TRAVAIL EN SCANOGRAPHIE

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 scanographie. 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 visées les installations fixes où sont réalisés des actes diagnostiques ou thérapeutiques. Ce type d'installation occasionne un risque d'exposition externe (corps entier et parfois extrémités) du personnel aux rayonnements ionisants.

D.1 PREPARATION

D.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 tournante,
 - des détecteurs,
 - type de régulation automatique de l'intensité,
 - type de reconstruction.
- Recenser les paramètres d'utilisation du générateur : haute tension (kV), intensité (mA), filtration, temps de rotation, largeur de la collimation, pas (pitch), déplacement de table, champ d'acquisition, type de procédure scanographique (TAP, abdominopelvien, cérébral, etc.), longueur d'acquisition, nombre d'acquisitions.
- Recenser les équipements nécessaires à la réalisation des actes radiologiques : scanner, système de fluoroscopie pour la scanographie interventionnelle. On rappelle que le Scanner du TepScan est traité dans la fiche C.
- Réaliser un schéma à l'échelle de l'implantation radiologique.

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

- Identifier le personnel de l'installation 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 plusieurs acquisitions).
- 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 (uniquement pour les extrémités en scanographie compte tenu de la conception de l'appareil),
 - par le rayonnement diffusé, la source étant essentiellement le patient, mais également les accessoires, tel le support patient.

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

- leur fréquence de réalisation,
- leur nombre d'acquisitions associées,
- les paramètres de réalisation : haute tension, intensité, temps de rotation, type d'acquisition (hélicoïdale ou séquentielle), pas, largeur de collimation, déplacement de table, nombre d'hélices, champ d'acquisition
- 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.

D.2 EVALUATION DES DOSES

D.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 équivalent 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 sont les suivantes :

- à la console d'acquisition,
- en salle d'examen lors de la réalisation d'actes guidés sous radioscopie.

D.2.2 ACQUISITION DES DONNEES DOSIMETRIQUES

- Relever les résultats de la surveillance dosimétrique (individuelle et d'ambiance) et des études antérieures.
- Analyser les courbes isodoses spécifiques au scanner transmises par l'installateur.
- Effectuer des mesures d'ambiance à la position des travailleurs pour les tâches sélectionnées (acquisition hélicoïdale ou fluoroscopie), par exemple à la console et à proximité du patient pour les actes radioguidés, afin de déterminer le classement du personnel.
- Réaliser des mesures aux extrémités et au niveau des yeux dans le cas d'actes de scanographie interventionnelle (ponction, biopsie...).
- Effectuer, pour délimiter les zones de travail, des mesures à différentes distances du volume de diffusion, permettant d'établir une cartographie dosimétrique de l'installation scanographique.

- Effectuer des mesures d’ambiance dans des situations s’écartant des conditions normales de travail (porte anormalement ouverte par exemple).
- 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 $H^*(10)$ ¹¹,
 - utilisation de fantômes « patient » conformes à la norme NF C15-160 (tronc : fantôme cylindrique de 32 cm de diamètre et 15 cm de hauteur minimale, tête : fantôme de 16 à 20 cm de diamètre et de 15 cm de hauteur minimale), afin de simuler le diffuseur.
- Evaluation de la dose au cristallin (estimation de la dose équivalente) :
 - utilisation recommandée de dosimètres étalonnés en équivalent de dose individuel $H_p(3)$,
 - mesurer $H_p(3)$ au moyen de dosimètres portés sur le front l’opérateur ou, éventuellement, fixés sur la tête d’un fantôme anthropomorphe.
- 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).

A titre d’exemple :

On considère une installation scanographique équipée d’un scanner multicoupe (MSCT) où sont réalisées des procédures radiologiques abdomino-pelviennes et pulmonaires.

Le tableau D.I présente les équivalents de dose mesurés au niveau de la console d’acquisition située dans un local adjacent, derrière une vitre plombée, et à 1 m du fantôme sans EPI pour différentes procédures réalisées sur la table d’examen. Le point de mesure a été positionné à 45° vers le haut par rapport à l’horizontale, c’est-à-dire dans l’axe le plus pénalisant en termes de dose.

Tableau D.I : Valeurs indicatives de l’équivalent de dose, $H^*(10)$ en μSv , mesuré à 1 m du diffuseur et au niveau du pupitre de commande pour différentes procédures en acquisition hélicoïdale.

Procédures	Longueur d’acquisition (cm)	HT (kV)	I (mA)	Temps rotation (s)	Charge (mAs)	Diamètre du diffuseur (cm)	$H^*(10)$ (μSv)	
							A 1 m du diffuseur	Au pupitre de commande
Abdomino- pelvienne	45	120	420	0,5	210	32	285	0,04
Pulmonaire	30	120	200	0,5	100	32	135	0,02

¹¹ 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 (Publication ICRU n°57, 1998)

D.3 EXPLOITATION DES RESULTATS

D.3.1 DOSIMETRIE PREVISIONNELLE ET CLASSEMENT 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 un classement des opérateurs à soumettre à l'employeur et au médecin du travail.

Dans notre exemple, le manipulateur en électroradiologie médicale affecté à ce poste, travaille uniquement au pupitre derrière l'écran de protection (EPC) sur la base de 1700 heures par an. Il réalise 8 000 acquisitions scanographiques abdomino-pelviennes et 4 000 acquisitions scanographiques pulmonaires. Au pupitre de commande du dispositif, il est susceptible de recevoir une dose de l'ordre de 400 µSv, il pourra donc être classé en catégorie B. Une dosimétrie passive trimestrielle pourra être recommandée. Le port du dosimètre opérationnel n'est pas recommandé dans la mesure où le travailleur n'a pas de tâches à réaliser en zone spécialement réglementée (cf. §D.3.2 Délimitation des zones de travail).

D.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 des situations représentatives des conditions normales d'utilisation les plus pénalisantes. Ces conditions normales d'utilisation intègrent les aléas raisonnablement prévisibles inhérents aux conditions d'utilisation.

Dans notre exemple, pour le calcul de la dose efficace susceptible d'être reçue en 1 heure, il a été supposé que 4 examens sont réalisés par heure. L'examen retenu est une procédure scanographique « abdomino-pelvienne » considérée comme la plus pénalisante car elle comporte une acquisition sans et avec injection, soit 8 acquisitions hélicoïdales au total en 1 heure.

Dans une optique pénalisante, soit un nombre d'acquisitions de l'ordre de 8 par heure, l'exposition à 1 mètre serait de l'ordre de 2,28 mSv en une heure ($8 \times 285 \mu\text{Sv}$).

Pour la mise en place du zonage, l'exposition des extrémités n'est pas prise en compte car aucun examen de type radioscopie scanner n'est effectué sur cette installation.

La limite, à partir de laquelle la zone contrôlée jaune est définie, est fixée à 25 µSv sur une heure. En extrapolant par calcul de l'inverse carré de la distance, la zone spécialement réglementée jaune serait située à 10 m du patient ($1 \text{ m} \times \sqrt{(2280 \mu\text{Sv}/25 \mu\text{Sv})} = 9,55 \text{ m}$) et la zone spécialement réglementée orange (2 mSv en une heure) à 1 m du patient.

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 dentaire (ASN 2014).

En pratique, il est conseillé de délimiter la zone spécialement réglementée jaune par les parois de la salle d'examen.

Dans la mesure où l'émission de rayonnements ionisants n'est pas continue, ces zones contrôlées peuvent être intermittentes.

Si aucun patient n'est présent dans la salle de radiologie mais le générateur à rayons X toujours alimenté, la salle est considérée comme zone surveillée.

Si le générateur à rayons X n'est plus alimenté, la salle de scanographie est une zone non réglementée.

Il est recommandé que le pupitre de commande soit une zone surveillée bien que la dose mesurée à ce point de mesure et extrapolée sur 1 mois ($34 \mu\text{Sv}$) n'excède pas $80 \mu\text{Sv}$ en 1 mois, limite de dose de la zone non réglementée.

En conclusion de cet exemple de zonage, la pièce où est installé le scanner est une zone spécialement réglementée jaune limitée aux parois, à l'exception d'une zone orange de l'ordre de 1 m de rayon par rapport au centre du diffuseur.

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. En effet, la durée du scanner étant d'environ 10 s, l'équivalent de dose intégré de $285 \mu\text{Sv}$ à 1 m est associé à un débit d'équivalent de dose instantané de $285 \mu\text{Sv} \times 3600/10 = 103 \text{ mSv}\cdot\text{h}^{-1}$, ce qui correspondrait à une zone rouge.

D.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 bonnes pratiques suivantes :

- Optimiser les paramètres techniques d'acquisition scanographique en maintenant la qualité diagnostique de l'image,
- Se tenir entièrement derrière la protection radiologique vitrée lors des acquisitions scanographiques,
- Eviter, dans la mesure du possible, le contrôle en salle d'examen des injections du produit de contraste.
- Maintenir les portes de la salle d'examen fermées pendant les acquisitions.

FICHE E : ETUDE DE POSTE DE TRAVAIL EN CURIETHERAPIE

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 unité de curiethérapie.

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 sont également précisés ; les valeurs étant fournies à titre indicatif, elles ne doivent pas être utilisées directement pour une étude de poste donnée. Elles ont pour principal objet de servir d'appui aux exemples de classement des travailleurs et de délimitation des zones de travail choisis.

Sont visées les installations disposant de projecteurs de sources ainsi que les installations où sont mises en œuvre des techniques de curiethérapie interstitielle, de contact et par implants permanents. Ces types d'installation occasionnent un risque d'exposition externe (corps entier et extrémités) du personnel aux rayonnements ionisants.

E.1 PREPARATION

E.1.1 DESCRIPTION DE L'INSTALLATION :

- Inventorier les différents radioéléments utilisés : nature, type(s) de rayonnement, énergie, période, forme et dimensions des sources. Le tableau E.1 rappelle les caractéristiques des radioéléments les plus utilisés en curiethérapie.
- Relever le nombre de sources utilisées par traitement ainsi que les activités maximales mises en œuvre en pratique clinique.
- En cas d'utilisation de projecteur(s) de source, identifier les caractéristiques techniques et paramètres d'utilisation clinique : nombre de canaux, longueur maximale de sortie de source, durée (min-max) du pulse d'irradiation.
- En cas d'utilisation de systèmes d'imagerie, se référer aux fiches A et B.
- Identifier également :
 - le matériel de manipulation des sources : gaines de transfert des sources, coffres de stockage des sources, pinces, coupe-fil, gants...
 - les systèmes de sécurité : système de rentrée manuelle de source, arrêts d'urgence...
 - les équipements de protection collectifs et individuels : paravents, paillasses, tabliers...
- Définir les locaux constituant l'unité de curiethérapie ainsi que son environnement :
 - local de réception, de stockage et de préparation des sources,
 - salle d'application des vecteurs (bloc opératoire),
 - local de traitement : chambre d'hospitalisation classique ou dédiée, local dédié à la curiethérapie à haut débit de dose (HDR) ou bunker de radiothérapie externe partagé pour le HDR,
 - postes de commande pour les projecteurs de source,
 - locaux environnants tels que chambres d'hospitalisation classiques, poste de soins infirmiers, locaux de nettoyage et stérilisation du matériel chirurgical...
- Caractériser le positionnement des sources dans les locaux selon la région anatomique traitée.
- Réaliser un schéma à l'échelle de l'unité de curiethérapie.

Tableau E.I : Caractéristiques de radioéléments fréquemment utilisés en curiethérapie.

Radioélément	Emissions principales	Energies (keV)	Période (jours)	Activités habituellement utilisées en clinique
^{125}I	X	27	60	18,5 MBq par grain (60 grains environ par application)
	γ	35		
^{192}Ir	β^-	675 et 538 ($E_{\beta\text{max}}$)	74	« Bas débit » (LDR) : 92,5 MBq/cm
	γ	316		« Débit pulsé » (PDR) : 18,5 GBq max
				« Haut débit » (HDR) : 370 GBq max

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

- Quantifier l'activité médicale :
 - types de traitements concernés : interstitiel, endocavitaire, de contact, à bas débit de dose (LDR), à débit de dose pulsé (PDR), à haut débit de dose (HDR),
 - isotopes concernés, activité et durée de manipulation,
 - durée des traitements,
 - nombre de patients par an par type de traitement,
 - l'utilisation éventuelle de systèmes d'imagerie durant les traitements doit également être prise en compte dans l'étude de poste.
- Identifier le personnel concerné, y compris le personnel travaillant de nuit : manipulateurs, médecins (radiothérapeute, anesthésiste, urologue), physiciens (PSRPM), infirmiers anesthésistes, aides-soignants, techniciens dosimétristes, stagiaires...
- Inventorier les différentes tâches : réception, préparation, implantation/application, traitement (LDR, PDR, HDR), réalisation de clichés d'imagerie, soins...
- Identifier les conditions d'exposition (corps entier, cristallin et/ou extrémités) :
 - par le rayonnement direct, c'est-à-dire celui provenant directement des sources radioactives,
 - par le rayonnement diffusé, le diffuseur étant essentiellement le patient, mais également les accessoires, tels les supports dédiés aux patients,

Les conditions d'exposition liées à d'éventuelles acquisitions d'image doivent également être considérées ici. Dans ce cas, se référer aux fiches A et B.
- Relever les positions et distances des opérateurs par rapport aux sources de rayonnements.
- Relever l'utilisation des équipements de protection individuelle (tablier, protège-thyroïde, paire de lunettes) et collective (écrans fixes ou mobiles et valisette de transport des sources) utilisés.
- Déterminer les temps de présence aux postes de travail sur une période de référence représentative.

E.2 EVALUATION DES DOSES

E.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 d'équivalent 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 postes de travail susceptibles d'être les plus couramment occupés par les opérateurs se situent :

- dans la salle de réception, de préparation, et de stockage des sources,
- en salle d'application,
- au poste de commande des projecteurs de sources,
- dans les chambres d'hospitalisation.

E.2.2 ACQUISITION DES DONNEES DOSIMETRIQUES

- Relever les résultats de la surveillance dosimétrique (individuelle et d'ambiance) et des études antérieures.
- Effectuer des mesures d'ambiance à la position des travailleurs pour les tâches sélectionnées, par exemple derrière un paravent et à proximité du patient, afin de déterminer le classement du personnel.
- Réaliser des mesures aux extrémités et au niveau des yeux.
- Effectuer, pour délimiter les zones de travail, des mesures à différentes distances du volume de diffusion, permettant d'établir une cartographie dosimétrique à l'intérieur de chaque local.
- Effectuer des mesures d'ambiance dans des situations s'écartant des conditions normales de travail (absence de protection collective, porte anormalement ouverte, source bloquée, etc...).
- 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 ambient $H^*(10)$ ¹²,
- Evaluation de la dose au cristallin (estimation de la dose équivalente) :
 - utilisation recommandée de dosimètres étalonnés en équivalent de dose individuel $H_p(3)$,
 - mesurer $H_p(3)$ au moyen de dosimètres portés sur le front de l'opérateur ou, éventuellement, fixés sur la tête d'un fantôme anthropomorphe.
- 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 tableaux E. II a et b présentent des valeurs indicatives de débits de dose mesurés ou estimés pour différentes situations.

¹² 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 (Publication CIPR n° 116, 2010)

Tableau E.IIa : débits d'équivalent de dose corps entier et extrémités mesurés lors de curiethérapie de la prostate par implantation de grains d'iode ou de curiethérapie interstitielle avec fils d'iridium 192

Type de curiethérapie	Source	Activité totale	Distance	Débit d'éq. de dose Corps entier	Débit d'éq. de dose extrémités
Curiethérapie de prostate	grains d'iode 125	925 MBq	Au niveau du dispositif de chargement à 15 cm du périnée	8 µSv/h	<1 µSv/h*
Curiethérapie interstitielle	fils d'Iridium 192	1,85 GBq	1 m	0,25 mSv/h	-

*Les mains de l'opérateur sont protégées par le dispositif de chargement

Tableau E.IIb : débits de dose maximum estimés lors de curiethérapie à débit pulsé ou à haut débit de dose

Type de curiethérapie	Position de la source	Distance	Débit de dose max
Curiethérapie à débit pulsé ou à haut débit de dose	En position de stockage	Au contact du projecteur	0,5 µSv/h
Curiethérapie à débit pulsé ou à haut débit de dose	En position de traitement	Au pupitre	0,6 µSv/h

Il est important de noter que contrairement à la curiethérapie à bas débit de dose, en curiethérapie HDR ou PDR, le personnel n'est jamais en contact avec la source puisque l'ensemble des manipulations est réalisé à distance via le projecteur. Toute entrée dans le local de traitement doit déclencher une rentrée automatique de la source.

E.3 EXPLOITATION DES RESULTATS

E.3.1 DOSIMETRIE PREVISIONNELLE ET CLASSEMENT 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 un classement des opérateurs à soumettre à l'employeur et au médecin du travail.

Exemple :

Considérons une unité de curiethérapie réalisant des curiethérapies de prostate par implantation de grains d'iode, des curiethérapies à bas débit avec des fils d'iridium 192, des curiethérapies à débit de dose pulsé et des curiethérapies à haut débit de dose. Pour les calculs les hypothèses suivantes ont été retenues :

- 11 curiethérapies de la prostate sont réalisées par an dans cette unité :
 - il est considéré que pour chaque curiethérapie de prostate une soixantaine de grains sont implantés pour une activité totale de 925 MBq (cf. Tableau E.IIa) ;
 - le temps estimé pour la mise en place des grains d'iode 125 est de 1 heure ;
 - il est supposé de manière simplificatrice que le patient est chargé avec la totalité de grains d'iode 125 du début à la fin de l'intervention (cas le plus pénalisant du point de vue de la radioprotection) ;
 - cinq soins par jour sont réalisés au lit du patient. Le temps passé auprès du patient est d'environ 15 minutes par soin. L'ensemble des soins sur l'année est réalisé par une même personne.

- 3 curiethérapies à bas débit avec des fils d'iridium 192 par an sont réalisées :
 - il est estimé que pour chaque curiethérapie, une activité totale de 1,85 GBq de fil d'iridium 192 est préparée puis implantée (cf. tableau E.IIa) ;
 - pour la préparation des fils, la dose équivalente aux extrémités est estimée égale à 0,9 mSv et la dose efficace au corps entier à 6 μ Sv ;
 - pour l'implantation et le retrait des fils d'iridium 192, la dose équivalente aux extrémités est estimée égale à 2 mSv et la dose efficace au corps entier à 37 μ Sv. Il est considéré 15 jours de traitement en chambre et 5 soins par jour au lit du patient ;
 - il est considéré que le nombre de soins est équitablement réparti sur trois personnes. Le temps passé auprès du patient est d'environ 15 minutes par soin.

- 21 curiethérapies à débit de dose pulsé sont réalisées par an :
 - la préparation du patient, la connexion au projecteur et la mise en route du traitement durent 35 minutes au total ;
 - lors de l'installation, la source est en position de stockage. Lorsque le traitement est déclenché, à chaque pulse, la source sort de son conteneur pour une durée de pulse définie sur un intervalle de 1 heure ;
 - le personnel se situe alors au pupitre de traitement. Le traitement dure 3 jours en moyenne ;
 - cinq soins par jour sont réalisés au lit du patient. Le temps passé auprès du patient est d'environ 15 minutes par soin ;
 - il est considéré que le nombre de soins est équitablement réparti sur trois personnes. Il est important de noter que le personnel n'est jamais en contact avec la source puisque que l'ensemble des manipulations est réalisé à distance via le projecteur.

- 250 séances de traitement de curiethérapie gynécologique à haut débit sont réalisées par an :
 - la préparation du patient pour une curiethérapie gynécologique dure 15 minutes ;
 - lors de l'installation, la source est en position de stockage ;
 - la séance de traitement de curiethérapie gynécologique dure 10 minutes.

- 10 séances de traitement de curiethérapie bronchique / œsophagienne à haut débit sont également réalisées par an :
 - la préparation du patient pour une curiethérapie œsophagienne dure 1 heure ;
 - lors de l'installation, la source est en position de stockage (la réalisation de scopie à l'aide d'un amplificateur de luminance n'est pas prise en compte dans le calcul) ;
 - la séance de traitement de curiethérapie œsophagienne dure 10 minutes.

- L'ensemble des traitements est équitablement réparti sur les 3 médecins du service.

Les tableaux E.III à E.VI présentent les doses efficaces et doses équivalentes aux mains estimées pour les personnels concernés par les différentes phases identifiées pour ces traitements.

Tableau E.III : Evaluation de la dose efficace et de la dose équivalente aux mains lors des traitements de curiethérapie de la prostate.

Type d'exposition (tableau E. IIa)	Tâche	Calcul
Externe corps entier	Implantation (radiothérapeute)	$8 \mu\text{Sv/h} \times 1 \text{ h} \times 11 = 88 \mu\text{Sv}$
	Soin (personnel hospitalier)	$8 \mu\text{Sv/h} \times \frac{1}{4} \text{ h} \times 5 \times 11 = 110 \mu\text{Sv}$
Externe extrémités	Implantation (radiothérapeute)	$1 \mu\text{Sv/h} \times 1 \text{ h} \times 11 = 11 \mu\text{Sv}$

Tableau E.IV : Evaluation de la dose efficace et de la dose équivalente aux mains lors des traitements de curiethérapie bas débit par fils d'iridium.

Type d'exposition (tableau E. IIa)	Tâche	Calcul
Externe corps entier	Préparation des fils (manipulateur dosimétriste)	$6 \mu\text{Sv} \times 3 = 18 \mu\text{Sv}$
	Implantation et retrait des fils (radiothérapeute)	$37 \mu\text{Sv} \times 3 = 111 \mu\text{Sv}$
	Soin (personnel hospitalier)	$0,25 \text{ mSv/h} \times \frac{1}{4} \text{ h} \times 5 \times 15 \times 3 / 3 = 4,7 \text{ mSv}$
Externe extrémités	Préparation des fils (manipulateur dosimétriste)	$1 \text{ mSv} \times 3 = 3 \text{ mSv}$
	Implantation et retrait des fils (radiothérapeute)	$2 \text{ mSv} \times 3 = 6 \text{ mSv}$

Tableau E.V : Evaluation de la dose efficace corps entier lors des traitements de curiethérapie à débit pulsé.

Type d'exposition (tableau E. IIb)	Tâche	Calcul
Externe corps entier	Préparation du patient et lancement du traitement (radiothérapeute/PSRPM)	$0,5 \mu\text{Sv/h} \times (35 / 60) \times 21 = 6,3 \mu\text{Sv}$
	Soin (personnel hospitalier)	$0,5 \mu\text{Sv/h} \times \frac{1}{4} \text{ h} \times 5 \times 3 \times 21 / 3 = 13,1 \mu\text{Sv}$

Tableau E.VI : Evaluation de la dose efficace corps entier lors des traitements de curiethérapie à haut débit de dose.

Type d'exposition (tableau E. IIb)	Tâche	Calcul
Externe corps entier	Préparation du patient (médecin)	
	curiethérapie gynécologique	$0,5 \mu\text{Sv/h} \times (15 / 60) \text{ minutes} \times 250 = 31,25 \mu\text{Sv}$
	curiethérapie œsophagienne	$0,5 \mu\text{Sv/h} \times 1 \text{ h} \times 10 = 5 \mu\text{Sv}$
	Traitement (médecin, manipulateur, infirmière)	
	curiethérapie gynécologique	$0,6 \mu\text{Sv/h} \times (10 / 60) \text{ minutes} \times 250 = 25 \mu\text{Sv}$
	curiethérapie œsophagienne	$0,6 \mu\text{Sv/h} \times (10 / 60) \text{ minutes} \times 10 = 1 \mu\text{Sv}$

Considérons le cas d'un personnel hospitalier impliqué dans les soins des différents types de traitements pratiqués dans cette unité de curiethérapie. La dose efficace annuelle estimée est de 4,8 mSv ; cette personne pourrait être classée en catégorie B.

Prenons le cas maintenant d'un médecin radiothérapeute impliqué sur le tiers des traitements de tous types pratiqués dans l'unité, la dose efficace annuelle estimée est de $242 / 3 = 81 \mu\text{Sv}$ et la dose équivalente aux mains de $6 / 3 = 2 \text{ mSv}$; ce médecin pourrait être classé « non exposé » mais le classement en catégorie B est recommandé compte tenu de activités importantes des sources utilisées et des aléas possibles.

E.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 curiethérapie, afin de définir les zones réglementées, il convient de déterminer la typologie des traitements réalisés dans la salle : zone anatomique traitée, activité totale, positionnement de la source dans la salle. A titre d'exemple, on retient les locaux et les activités suivants :

- une chambre dédiée aux traitements par curiethérapie interstitielle avec fils d'iridium 192 dans la configuration présentée dans le tableau E.IIa ;
- une salle dédiée au traitement par curiethérapie à débit de dose pulsé avec une source d'iridium 192.

Chambre de traitement par curiethérapie interstitielle par fils d'iridium 192 :

A 1 m du patient, le débit d'équivalent de dose est de 0,25 mSv/h (tableau E.IIa). Ce point d'évaluation est en zone spécialement réglementée jaune. La limite entre zones contrôlée et spécialement réglementée jaune est à 3,2 m du patient. La limite entre zones spécialement réglementées jaune et orange est à 35 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. Ces données montrent la nécessité d'utiliser des protections lorsque l'on rentre dans la chambre de traitement (paravent en plomb). En outre, un dosimètre opérationnel doit être porté par le personnel présent en salle.

Salle de traitement à débit de dose pulsé avec une source d'iridium

L'activité d'iridium 192 prise en compte est l'activité maximale pouvant être chargée dans le projecteur de source utilisé, soit $A = 18,5 \text{ GBq}$. Pour les calculs, la source est considérée comme ponctuelle et hors du projecteur. La constante de débit d'équivalent de dose retenue pour les calculs est $\Gamma = 135 \mu\text{Sv} \cdot \text{GBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ à 1 m, soit pour une source de 18,5 GBq, environ $2500 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ à 1 m.

En pratique la chambre de traitement dans ce cas peut être considérée comme une zone spécialement réglementée orange pendant l'irradiation. En dehors des irradiations, lorsque la source est en position de stockage (entre deux pulses ou entre deux patients), sous réserve qu'un détecteur d'ambiance confirme l'absence de rayonnement, la chambre pourrait être classée en zone surveillée.

E.3.4 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, et de disposer de systèmes de sécurité opérationnels : systèmes de rentrée automatique et manuelle de source, arrêts d'urgence...

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, 2013. *Arrêté du 17 juillet 2013 relatif à la carte de suivi médical et au suivi dosimétrique des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants*. Journal Officiel de la République Française n°0181 du 6 août 2013.
- Arrêté, 2010. *Arrêté du 21 mai 2010 portant homologation de la décision no 2010-DC-0175 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 4 février 2010 précisant les modalités techniques et les périodicités des contrôles prévus aux articles R. 4452-12 et R. 4452-13 du code du travail ainsi qu'aux articles R. 1333-7 et R. 1333-95 du code de la santé publique*. Journal Officiel de la République Française n°0188 du 15 août 2010.
- 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.
- Arrêté, 2014. *Arrêté du 15 mai 2014 modifiant l'article 23 de 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*. Journal Officiel de la République Française n°0233 du 8 octobre 2014
- ASN, 2014. *Présentation des principales dispositions réglementaires de radioprotection applicables en radiologie médicale et dentaire*. Mise à jour octobre 2014.
- 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° 4 du 21 avril 2010 relative aux mesures de prévention des risques d'exposition aux rayonnements ionisants*. NOR : MTST1011109C

- 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.
- Directive, 2013. *Directive 2013/59/EURATOM du Conseil du 5 décembre 2013 fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire contre les dangers résultant de l'exposition aux rayonnements ionisants et abrogeant les directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom et 2003/122/Euratom*. Journal Officiel des Communautés européennes n° L 13 du 17 janvier 2014.
- 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., 2007. *Manuel pratique de radioprotection*. Ed. Tec & Doc, 3^e édition. ISBN 2743009594.
- Ginjaume, M., Carinou, E., Donadille, L., Jankowski, J., Rimpler, A., Sans Merce, M., Vanhavere, F., Denozière, M., Daures, 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.
- IAEA, 2011. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards - Interim Edition. General Safety Requirements Part 3. 2011.
- ICRP, 2011. International Commission on Radiological Protection. Statement on tissue reaction - April 21, 2011. ICRP ref 4825-3093-1464.
- 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, 2010. International Commission on Radiological Protection. *Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures*. ICRP Publication 116, Ann. ICRP **40**(2-5) (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.
- IRSN, 2013. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire. *Recommandations sur les bonnes pratiques en*

matière de radioprotection des travailleurs dans la perspective de l'abaissement de la limite réglementaire de dose équivalente pour le cristallin. Rapport PRP-HOM/2013-00010

- 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.
- 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.