



ENSP
ECOLE NATIONALE DE
LA SANTÉ PUBLIQUE

RENNES

INGÉNIEUR DU GÉNIE SANITAIRE

Promotion 2004

« La radioprotection dans le nucléaire de proximité -
Identification des activités et caractérisation du risque radiologique »

Eléments de gestion pour la région Champagne-Ardenne

Présenté par

Chrystel BRENAUT

Ingénieur ENSI Limoges
Eau et Environnement

Lieu du stage

DRIRE- Division de Sûreté Nucléaire et de
Radioprotection de Châlons en Champagne

Référents professionnels

Michel CHAUGNY
Alain THIZON

Référent pédagogique

Denis BARD, ENSP

Remerciements

Je tiens à remercier Monsieur **Denis BARD**, enseignant à l'ENSP, qui fut mon réfèrent pédagogique pour ce mémoire.

Mes remerciements vont à toutes les personnes de la **DRIRE-DSNR de Châlons en Champagne** pour leur accueil, leurs conseils et pour m'avoir intégrée rapidement à leur équipe.

En particulier :

- Madame **Marie-Claire BELTRAME-DEVOTI**, directrice de la DRIRE Champagne-Ardenne
- Monsieur **Michel CHAUGNY**, mon réfèrent professionnel, ex-chef de la division (départ en juin 2004) pour m'avoir proposé ce mémoire, pour son accompagnement pour la réalisation de la note de cadrage, sa présence à l'oral de cadrage, ses conseils pour la note d'étape du mémoire
- Monsieur **Alain THIZON**, adjoint au chef de division, chef par intérim depuis juin 2004, pour ses encouragements et pour avoir mis à ma disposition le matériel et les procédures nécessaires au bon déroulement du mémoire
- Monsieur **Gilles LELONG**, ingénieur de l'industrie et des mines chargé d'affaires en radioprotection, cellule «radioprotection du nucléaire de proximité» de la division, pour ses précieux conseils, sa disponibilité, sa prévenance et pour m'avoir présentée aux personnes susceptibles de m'aider pour la réalisation du mémoire

Je remercie aussi les autres entités de l'ASN pour leurs conseils tout au long du mémoire, en particulier :

A la DGSNR-SD9 :

- Monsieur **Jean-Pierre VIDAL**, sous directeur, pour m'avoir acceptée en immersion dans sa sous-direction, pour ses nombreux conseils dans le domaine du nucléaire de proximité médical et pour avoir mis à ma disposition des documents pour la réalisation du mémoire
- Monsieur **Ronan MEAR**, chargé d'affaires en radioprotection, pour ses conseils techniques en radioprotection et pour m'avoir invitée à participer à des inspections

A la DGSNR-SD1 pôle « sources » :

- Messieurs **Fabien FERON**, adjoint au sous-directeur et **Jérôme FRADIN**, chargé d'affaires en radioprotection, pour leurs conseils et leurs documents relatifs au nucléaire de proximité industriel

Mes remerciements vont aussi à toute **l'équipe de la DRIRE-DSNR de Lyon** (une des deux DRIRE pilotes pour la radioprotection du nucléaire de proximité), pour m'avoir invitée à participer à des visites dans les domaines industriel et médical.

Sommaire

INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1: CONTEXTE ET DEMARCHE ADOPTEE POUR LA REALISATION DU MEMOIRE.....	2
1 CONTEXTE DU MEMOIRE	3
1.1 <i>Le signal sanitaire</i>	3
1.2 <i>Objectifs de la radioprotection</i>	5
1.3 <i>Un nouveau cadre réglementaire pour la radioprotection</i>	6
1.4 <i>L'organisation des pouvoirs publics en matière de radioprotection</i>	7
2 LA MISE EN PLACE DE LA MISSION REPERAGE DE LA DSNR DE CHALONS	8
3 OBJECTIFS ET DEMARCHE DU MEMOIRE	9
3.1 <i>Objectifs</i>	9
3.2 <i>Démarche</i>	9
CHAPITRE 2 : IDENTIFICATION ET CARACTERISATION DU PARC DU NUCLEAIRE DE PROXIMITE EN REGION CHAMPAGNE-ARDENNE.....	12
1 REFLEXION SUR L'EXHAUSTIVITE DES DONNEES DU PARC DU NUCLEAIRE DE PROXIMITE	13
1.1 <i>La base de donnée de la DSNR</i>	13
1.2 <i>La collecte d'information : identification des acteurs institutionnels en rapport avec la radioprotection</i>	13
2 RESULTATS DU REPERAGE DES ACTIVITES DU NUCLEAIRE DE PROXIMITE	17
2.1 <i>Le nucléaire de proximité industriel</i>	17
2.2 <i>Le nucléaire de proximité médical</i>	20
2.3 <i>Bilan sur la présentation des activités du nucléaire de proximité</i>	23
CHAPITRE 3 : « IDENTIFICATION DES DANGERS, PROPOSITION D'INDICATEURS POUR HIERARCHISER LES ACTIVITES, DISPOSITIONS REGLEMENTAIRES POUR GERER LE RISQUE»	25
1. LES POPULATIONS EXPOSEES	26
1.1 <i>Présentation des groupes exposés</i>	26
1.2 <i>L'exposition des travailleurs</i>	26
1.3 <i>L'exposition du public</i>	26
1.4 <i>L'environnement</i>	27
1.5 <i>L'exposition des patients</i>	27
2 TYPES D'EXPOSITIONS ET MOYENS DE PROTECTION	27
2.1 <i>L'exposition externe</i>	27
2.2 <i>L'exposition interne : la contamination</i>	29
2.3 <i>Application aux activités identifiées en Champagne-Ardenne</i>	32
3. LES INDICATEURS POSSIBLES POUR HIERARCHISER LES ACTIVITES	35
3.1 <i>Pour l'exposition externe : le débit de dose</i>	35
3.2 <i>Pour l'exposition interne : les limites annuelles d'incorporation</i>	35
3.3 <i>Les résultats du suivi dosimétrique des travailleurs exposés</i>	37
3.4 <i>Proposition de l'INVS de mise en place un suivi des doses délivrées aux patients</i> ..	39
3.5 <i>Importance de la typologie de mise en œuvre des rayonnements ionisants</i>	39
4. DEUX PROBLEMATIQUES PARTICULIEREMENT SENSIBLES POUR LA RADIOPROTECTION	40

4.1 La gammagraphie.....	40
4.2 Les services de médecine nucléaire.....	41
5 LA GESTION DU RISQUE RADIOLOGIQUE PAR L'INSPECTION DE LA RADIOPROTECTION	43
5.1 Dispositions réglementaires pour la prévention du risque radiologique.....	43
5.2 La gestion du risque radiologique par l'inspection de la radioprotection	45
5.3 La coordination des différents acteurs pour gérer le risque radiologique	48
CONCLUSION	49
BIBLIOGRAPHIE.....	50
LISTES DES ANNEXES.....	53
RESUME.....	103

Liste des sigles utilisés : les acteurs institutionnels

Par ordre alphabétique :

AFSSAPS	Association Française de Sécurité Sanitaire des Aliments et des Produits de Santé
ANDRA	Agence Nationale de gestion des Déchets RAdioactifs
ARH	Agence Régionale d'Hospitalisation
ASN	Autorité de Sûreté Nucléaire
CIREA	Commission Interministérielle des Radioéléments Artificiels
CIRP	Commission Internationale de RadioProtection
CSP	Code de la Santé Publique
CRAM	Caisse Régionale d'Assurance Maladie
DDASS	Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales
DGS	Direction Générale de la Santé
DGSNR	Direction Générale de la Sûreté Nucléaire et de la Radioprotection
DHOS	Direction de l'Hospitalisation et des Offres de Soins
DPPR	Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques
DSNR	Division de la Sûreté Nucléaire et de la Radioprotection
DRASS	Direction Régionale des Affaires Sanitaires et Sociales
DRIRE	Direction Régionale de l'Industrie de la Recherche et de l'Environnement
DRT	Direction des Relations du Travail
DRTEFP	Direction Régionale du Travail, de l'Emploi et de la Formation Professionnelle
OPRI	Office pour la Protection contre les Rayonnements Ionisants
INB	Installations Nucléaires de Base
IPSN	Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire
IRSN	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
SD	Sous-Direction
SROS	Schéma Régional d'Organisation Sanitaire

Liste des sigles utilisés : la radioprotection dans le nucléaire de proximité

Par ordre alphabétique¹ :

ADN	Acide désoxyribonucléique
CAMARI	Certificat d'Aptitude à Manipuler les Appareils de Radioscopie et de radiographie Industrielles
CPE	Conditions Particulières d'Emploi de radionucléides
GBq	Giga Becquerel
GERIX	Générateur électrique de rayonnements ionisants X
Gy	Gray
keV	Kilo électron Volt
MeV	Méga électron Volt
PCR	Personne compétente en radioprotection
REA	Radio éléments artificiels
RI	Rayonnement ionisant
Sv	Sievert
TBq	Téra Becquerel
TEP	Tomographie à Emission de Positons
ZC	Zone contrôlée
ZS	Zone surveillée

¹Par souci de clarté pour le lecteur, les définitions des termes techniques de radioprotection sont reportées en annexes 1 et 2 du mémoire.

Table des illustrations

➤ Tableaux

Tableau 1 : « Effets déterministes et irradiation localisée : la radiosensibilité des organes »	3
Tableau 2 : « Effets déterministes et irradiation globale : les différents symptômes »	4
Tableau 3 : « Les deux types d'autorisations requises pour l'utilisation d'un équipement lourd »	14
Tableau 4 : « Normes de construction des projecteurs de gammagraphie pour la radioprotection »	18
Tableau 5 : « Les activités de la radiologie conventionnelle médicale et dentaire »	21
Tableau 6 : « Les différentes technique de curiethérapie »	22
Tableau 7 : « Bilan du repérage du parc du nucléaire de proximité en région Champagne-Ardenne »	23
Tableau 8 : « Les limites de doses admissibles pour les expositions professionnelles »	26
Tableau 9 : « Les limites de dose admissible pour le public »	26
Tableau 10 : « Synthèse des voies d'exposition, des risques et des moyens de prévention dans le nucléaire de proximité industriel et de recherche »	33
Tableau 11 : « Synthèse des voies d'exposition, des risques et des moyens de prévention pour le nucléaire de proximité médical »	34
Tableau 12 : « Expositions externe/interne par radioéléments pour un service de médecine nucléaire »	36
Tableau 13 : « Suivi des travailleurs exposés pour le nucléaire de proximité en 2002 »	37
Tableau 14 : « Suivi des travailleurs exposés pour tout le nucléaire en 2002 » - Sources IRSN	38
Tableau 15 : « Limites des doses réglementaires pour les zone contrôlée et zone surveillée »	44
Tableau 16 : « Classement des travailleurs et limites des doses réglementaires associées »	44
Tableau 17 : « Procédures administratives pour le nucléaire de proximité industriel et de recherche »	46
Tableau 18 : « Procédures administratives pour les activités du nucléaire de proximité médical »	47
Tableau 19 : « Les différents contrôles opérés au titre du CSP ou du CT pour les GERIX »	47
Tableau 20 : « Les différents contrôles opérés au titre du CSP et du CT pour la radiothérapie et la médecine nucléaire »	47
Tableau 21 : « Nature des mouvements de sources nécessitant un enregistrement à l'IRSN »	48

➤ Figures

Figure 1 : « Effets des rayonnements ionisants sur les cellules du corps humain »	64
Figure 2 : Cheminement possible dans l'organisme d'un composé radioactif en fonction de son mode d'introduction - (source : M. Ammerich 2001 DGSNR)	64

INTRODUCTION

La mise en œuvre progressive des directives européennes 96/29 et 97/43 Euratom de 1996 et 1997 relatives à la protection des personnes contre les dangers des rayonnements ionisants constitue une opportunité et un cadre nouveau pour faire évoluer les pratiques et les mentalités en matière de radioprotection. Ainsi, une remise à jour complète des dispositions législatives et réglementaires concernant la radioprotection contenue dans le Code de la santé publique et le Code du travail a été entreprise en 2002. Conjointement, une réorganisation des pouvoirs publics en matière de radioprotection, a créé l'autorité de sûreté nucléaire (ASN) constituée de ses deux entités : la Direction générale de la sûreté nucléaire et de la radioprotection (DGSNR) à l'échelle nationale, et ses organes déconcentrés, les Divisions de sûreté nucléaire et de radioprotection (DSNR) placées dans les Directions régionales de l'industrie de la recherche et de l'environnement (DRIRE).

Le décret n°2002-255 du 22 février 2002, créant la DGSNR lui a confié plusieurs missions dont le contrôle de la radioprotection notamment dans le nucléaire de proximité. Ce terme regroupe les activités hors Installations nucléaires de base (INB), à savoir les domaines de l'industrie, de la recherche et du médical. Jusqu'en 2002, le contrôle de la radioprotection du nucléaire de proximité était réalisé uniquement à l'échelle nationale. Pour renforcer ce contrôle, une partie de l'inspection a été déconcentrée en région afin d'être plus près du parc à contrôler. Actuellement, des missions dites de « repérage » sont réalisées par les DSNR, en particulier celle de Châlons en Champagne qui a en charge les régions Champagne-Ardenne et Picardie.

La DSNR de Châlons en Champagne a démarré la mission repérage en mars 2004 en commençant par la région Champagne-Ardenne, région composée de quatre départements : les Ardennes (08), l'Aube (10), la Marne (51) et la Haute-Marne (52).

Le mémoire s'ancre pleinement dans cette première mission de repérage de la DSNR, en consistant à identifier, d'une part, les diverses activités du nucléaire de proximité, d'autre part, le parc des détenteurs et des utilisateurs de rayonnements ionisants, mais aussi en proposant une réflexion, notamment par le choix d'indicateurs, pour hiérarchiser les activités par rapport aux enjeux sanitaires qu'elles engendrent vis à vis du risque radiologique.

CHAPITRE 1 : CONTEXTE ET DEMARCHE ADOPTEE POUR LA REALISATION DU MEMOIRE

1 Contexte du mémoire

1.1 Le signal sanitaire

1.1.1 les dangers liés aux rayonnements ionisants

Parmi les différents types de rayonnements, seuls les rayonnements les plus énergétiques sont dits ionisants. Qu'ils soient le fait de particules chargées, par exemple un électron (rayonnement bêta), un noyau d'hélium (rayonnement alpha) ou de photons du rayonnement électromagnétique (rayons X ou rayons gamma), en traversant la matière, les rayonnements ionisants heurtent les molécules la constituant. Au cours de ces chocs, ils arrachent un ou plusieurs électrons au cortège électronique périphérique entourant le noyau central de l'atome : l'ionisation de la matière se produit. Par cet effet, les radiations ionisantes agissent sur le tissu vivant en lui cédant de l'énergie, notamment au niveau des molécules de l'ADN et provoque des lésions. De façon générale, pour appréhender les effets des rayonnements ionisants, il faut connaître d'une part, le type et l'intensité du rayonnement, d'autre part, la sensibilité du milieu irradié. En effet, les pouvoirs de pénétration des différents rayonnements étant très différents, les techniques de radioprotection doivent être adaptées à chacun d'eux.

1.1.2 Les effets déterministes induits

Lorsqu'elles ne sont pas réparées par les cellules elles-mêmes, les lésions peuvent conduire à la mort cellulaire et à l'apparition d'effets sanitaires dès lors que le tissu ne peut plus assurer ses fonctions². Ces effets, appelés « effets déterministes », sont connus de longue date puisque les premiers effets ont été observés dès la découverte des rayons X par Röntgen³. Ils apparaissent de façon certaine dès que la quantité de rayonnements absorbée dépasse, selon le type de tissu exposé, un certain niveau de dose nommé seuil : les effets sont alors d'autant plus importants que la dose et le débit de dose de rayonnements reçus par le tissu est élevée. Ce sont des effets précoces dont les temps de latence varient de quelques jours à quelques mois.

1.1.2.1 L'irradiation localisée

Quatre cibles biologiques sont particulièrement radio-sensibles comme le montre le tableau suivant⁴.

Peau	3 Gy < Dose < 12 Gy ⁵	Erythème, radiodermites et œdèmes précoces ou tardifs
	12 Gy < Dose < 20 Gy	Phlyctènes (épidermite exsudative)
	20 Gy < dose < 25 Gy	Nécrose ⁶
	Dose > 25 Gy	Scléroses
Système pileux	4 Gy < Dose < 15 Gy	Chute provisoire des poils et des cheveux
	Doses > 15 Gy	Epilation définitive
Œil	Conjonctivite aiguë ou à plus fortes doses cataracte	
Gonades hommes	0.3 Gy < Dose < 5 Gy	Stérilité provisoire
	Dose > 5 Gy :	Stérilité définitive
Gonades femmes	3 Gy < Dose < 7 Gy	Stérilité provisoire
	Dose > 7 Gy	Stérilité définitive

Tableau 1 : « Effets déterministes et irradiation localisée : la radiosensibilité des organes »

² Voir la figure n°1 en annexe 4 « Effets biologiques de rayonnements ionisants »

³ Physicien allemand, connu pour sa découverte des rayons X en 1895, Wilhelm C. Röntgen reçut le premier prix Nobel de physique en 1901

⁴ Les valeurs indiquées sont uniquement indicatives : des écarts peuvent être constatés en fonction des types de rayonnement mis en jeux et des individus

⁵ C'est l'unité de dose absorbée par les tissus suite à une irradiation : 1 gray correspond à un joule par kilogramme

⁶ La nécrose débute par une ulcération plus ou moins profonde dont le fond est jaunâtre, recouvert d'un exsudat fibrineux (délais d'apparition quelques semaines)

1.1.2.2 L'irradiation globale

Dans une irradiation du corps entier, les symptômes sont très variés et dépendent : de la dose moyenne reçue et du tissu cible, de la répartition topographique (homogène ou non) et de sa distribution chronologique (exposition aiguë ou chronique). Les relations doses-effets retenues sont généralement les suivantes :

Dose < 0.25 Gy	Aucun symptôme apparent
0.25 Gy < Dose < 1 Gy	Chute réversible des lymphocytes
1 Gy < Dose < 2 Gy	Nausées, vomissements, céphalées, chute précoce des lymphocytes mais guérison spontanée
2 Gy < Dose < 5 Gy	Nausées, vomissements, asthénie, fièvre, chute rapide et sévère des lymphocytes (50%)
5 Gy < Dose < 15 Gy	Troubles digestifs et neurologiques : aplasie médullaire profonde
Dose > 15 Gy	Etat de choc, manifestation neurologique immédiate, irradiation létale : décès fréquent au delà de 12 Gy et pratiquement inéluctable au dessus de 15 Gy

Tableau 2 : « Effets déterministes et irradiation globale : les différents symptômes »

1.1.3 Les effets stochastiques induits

À l'opposé des effets déterministes, les effets stochastiques sont indépendants de la notion de seuil, ont des effets tardifs (de 2 à 15 ans pour une leucémie) et ne sont pas spécifiques. Ce sont par exemple, les cancers et les leucémies qui concernent soit directement l'individu irradié (effet somatique) soit les effets génétiques pouvant toucher sa descendance. Ces effets, dont la probabilité de développer un cancer augmente avec la dose, soulèvent les problèmes les plus importants du point de vue de la radioprotection. Actuellement, les études épidémiologiques⁷ n'ont pas permis de mettre en évidence des pathologies liées uniquement à l'exposition à des doses élevées. Pour les faibles doses, deux questions restent en suspens :

- Existe-t-il un seuil de dose au-dessous duquel le risque de transformations malignes est nul ?
- Le risque croît-il de façon monotone avec la dose ?

Ces questions ne peuvent être résolues par les enquêtes épidémiologiques en raison des incertitudes de nature statistique. Seule l'étude des mécanismes d'induction des cancers radio-induits pourra peut-être fournir des réponses. Dans la pratique de la radioprotection, à la fois en but de prudence et de simplification, la double hypothèse est faite de l'absence de seuil⁸ et de la linéarité entre la dose et l'effet⁹. L'évaluation des risques sanitaires s'appuie alors sur des calculs d'extrapolation linéaires sans seuil de la relation observée à des doses élevées.

En conséquence, s'il est possible d'éviter tout effet déterministe en fixant des limites de doses à des niveaux suffisamment bas ne permettant pas leur apparition, il n'en est pas de même pour les effets stochastiques. La prudence impose donc la CIPR de postuler que des faibles doses peuvent être à l'origine d'une augmentation de la probabilité d'apparition des effets stochastiques. Pour minimiser ce risque, il faut réduire les doses reçues à des niveaux aussi bas que possible (principe ALARA) jusqu'à une valeur considérée comme socialement acceptable. Pour quantifier et gérer ce risque, la CIPR a introduit le concept de détriment sanitaire.

⁷ dont les sources de données humaines les plus importantes sont constituées par la cohorte des survivants des explosions nucléaires d'Hiroshima et de Nagasaki

⁸ toute dose, aussi petite soit elle, peut produire un effet

⁹ tout incrément de dose donne le même incrément d'effet, quelle que soit la dose déjà reçue

1.1.4 Le détriment sanitaire

Il s'agit d'une estimation du risque de réduction de l'espérance (probabilité d'apparition de l'effet) et de la qualité (gravité de l'effet) de vie d'une population exposée aux rayonnements ionisants. Les cancers mortels, ceux n'ayant pas d'issue fatale et les effets héréditaires, ont été pris en compte par les conclusions de la CIPR n°60 pour déterminer ce détriment sanitaire. Par exemple, une exposition à une dose de 1 Sv distribuée avec un faible débit aboutit à augmenter de 5% le risque d'apparition des cancers fatals.

1.2 Objectifs de la radioprotection

Le but de la radioprotection est d'empêcher ou de réduire les risques liés aux rayonnements ionisants. Sur la base des constats précédents, l'objectif de la radioprotection est alors double :

- Eviter l'apparition des effets déterministes
- Limiter les probabilités d'apparition des cancers radio-induits liés aux expositions aux faibles doses (principe ALARA)

Pour atteindre cet objectif, la CIPR n°60 a élaboré des recommandations à l'échelle internationale pour la mise en place d'un système de protection radiologique permettant une utilisation des sources radioactives dans des conditions de sécurité satisfaisantes. Ces recommandations sont basées sur trois grands principes : ils s'appliquent à toutes les activités faisant usage des rayonnements ionisants, excepté le principe de limitation des doses qui ne peut s'appliquer aux activités médicales.

- **Le principe de la justification** prévoit qu'une activité nucléaire ne peut être entreprise que si elle est justifiée par les avantages qu'elle procure, notamment en matière sanitaire, sociale, économique ou scientifique, rapportés aux risques inhérents à l'exposition aux rayonnements ionisants auxquels elle est susceptible de soumettre les personnes.

Il s'agit de comparer les avantages procurés par une activité nucléaire aux risques radiologiques qu'elle comporte, qu'il s'agisse de risques d'accident radiologique ou des risques induits par le fonctionnement normal des installations, notamment par l'exposition radiologique des travailleurs, le rejet d'effluents ou la production de déchets radioactifs.

- **Le principe d'optimisation** prévoit que l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants résultant des activités nucléaires doit être maintenue à un niveau aussi faible qu'il est raisonnablement possible, compte tenu de l'état des techniques, des facteurs économiques et sociaux et, le cas échéant, de l'objectif médical recherché.

Historiquement, ce principe d'optimisation a d'abord été appliqué à la radioprotection des travailleurs avant d'être étendu à l'ensemble de la radioprotection.

- **Le principe de limitation des doses** prévoit que l'exposition d'une personne aux rayonnements ionisants résultant d'une activité nucléaire ne peut porter la somme des doses d'énergie absorbées par unité de masse au-delà des limites fixées par voie réglementaire, sauf lorsque cette personne est l'objet d'une exposition à des fins médicales ou de recherche biomédicale.

Pour appliquer ces principes, la radioprotection met en œuvre des moyens réglementaires et techniques spécifiquement adaptés à trois types de populations exposées : **le public, les patients et les travailleurs.**

1.3 Un nouveau cadre réglementaire pour la radioprotection

Les trois principes de la radioprotection élaborés par la CIPR n°60 ont été repris par les directives européennes Euratom N°96/29 du 13 mai 1996 fixant de nouvelles normes de base et N°97/43 du 30 juin 1997 relative à la protection sanitaire des personnes contre les dangers des rayonnements ionisants lors des expositions à des fins médicales. Depuis la publication de ces directives, une mise à jour complète des dispositions législatives et réglementaires contenues dans le Code de la santé publique et dans le Code du travail a été entreprise. La partie législative a été actualisée en 2001 avec la publication de l'ordonnance N° 2001-270 du 2 mars 2001. Les décrets d'application ont été publiés en 2002 et 2003 tandis que les arrêtés d'application viennent de paraître ou sont en cours d'élaboration (2004).

Parmi les principaux textes applicables actuellement en France en matière de radioprotection peuvent être cités :

- **L'ordonnance du 31 mars 2001** qui fixe les modalités et les principes généraux de protection contre les rayonnements ionisants
- **Le décret n°2002-460 du 4 avril 2002** relatif à la protection de la population contre les dangers des rayonnements ionisants (dit « décret population »). fixe entre autre, la limite annuelle du public à 1 mSv, réglemente les demandes et les renouvellements des autorisations, les acquisitions et les reprises des sources radioactives
- **Le décret n°2003-296 du 31 mars 2003** relatif à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants (dit « décret travailleurs »). Y sont notamment définies les zones contrôlées et surveillées, le suivi dosimétrique des travailleurs. Ce texte fixe la limite annuelle à 20mSv et demande à ce qu'un renouvellement de la formation à la radioprotection soit effectué au moins tous les 3 ans
- **Le décret n°2003-270 du 24 mars 2003** relatif à la protection des personnes exposées à des rayonnements ionisants à des fins médicales et médico-légales (dit « décret patients »). Il reprend les principes de justification et d'optimisation des doses énoncées par la CIPR mais n'intervient pas dans la limitation des doses
- **Le décret n°2003-295 du 31 mars 2003** relatif aux interventions en situation d'urgences radiologiques et en cas d'exposition durable fixe notamment les limites des doses reçues en fonction du groupe d'intervenants

La radioprotection est donc régie par un cadre réglementaire nouveau encore en évolution puisque actuellement de nombreux arrêtés restent à adopter : ils viendront se substituer aux textes précédents qui demeurent des références pour l'application de nouveaux décrets, d'où l'ambiguïté pratique. Ainsi, « l'arrêté zonage » est attendu pour lever le flou réglementaire concernant notamment la définition des limites de zones contrôlées et surveillées dans les établissements¹⁰.

Conjointement à cette refonte réglementaire, une réorganisation des pouvoirs publics en matière de radioprotection s'est mise en place en 2002 : elle vise à renforcer le contrôle de son application et par suite, à assurer une meilleure gestion du risque radiologique.

¹⁰ Le chapitre 3, paragraphe 5, du mémoire explique ces notions de zone contrôlée et zone surveillée

1.4 L'organisation des pouvoirs publics en matière de radioprotection

Une nouvelle Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASN), chargée d'élaborer la réglementation dans ces domaines et d'en contrôler sa bonne application, a été créée par le décret n°2002-255 du 22 février 2002 mettant fin aux activités de la CIREA, de l'OPRI et de la DSIN. L'ASN ainsi créée, placée sous l'autorité conjointe des ministres de la Santé, de l'Industrie et de l'Ecologie et du développement durable comprend deux entités¹¹ : la DGSNR à l'échelon national composée de 8 sous-directions thématiques et ses services déconcentrés les DSNR placées au sein des DRIRE. L'ASN bénéficie de l'expertise et de l'appui technique de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) créée par le décret n°2002-254 et mettant fin aux activités de l'IPSN.

1.4.1 Les missions de l'IRSN

L'IRSN est un établissement public à caractère industriel et commercial sous la tutelle des ministres de la Santé, de l'Industrie, de l'Environnement, de la Recherche et de la Défense. Ses missions principales sont :

- D'apporter un appui technique à l'ASN quand elle en fait la demande
- De participer à la veille permanente en matière de radioprotection, notamment en concourant à la surveillance radiologique de l'environnement
- De réaliser des expertises, des recherches, des analyses, des mesures pour les organismes publics ou privés, français ou étranger
- De définir des programmes de recherche

1.4.2 Les missions de la DGSNR

La DGSNR s'est vue confiée plusieurs missions parmi lesquelles :

- L'élaboration de la réglementation dans les domaines de la sûreté des installations nucléaires de base (INB), des transports des matières radioactives et fissiles à usage civil, de la radioprotection notamment pour le nucléaire de proximité
- Le contrôle de l'application de la réglementation dans les domaines cités ci dessus, en instruisant les dossiers d'autorisation au titre du ministère de la santé et en faisant des inspections périodiques des établissements notamment pour le nucléaire de proximité
- L'organisation d'une veille en radioprotection, notamment la surveillance de l'environnement
- La mise en œuvre de la politique du Gouvernement pour les problématiques des déchets radioactifs
- L'organisation de crise en cas d'accident nucléaire dans une INB ou sur un transport de matières radioactives

1.4.3 Les missions des DSNR

Les DSNR possèdent généralement deux pôles : l'un concerne les INB, l'autre, nouveau à l'échelle déconcentrée, concerne l'inspection de la radioprotection dans les domaines du nucléaire de proximité. Pour ce dernier, l'ASN s'attache à mettre en place un système global et organisé d'inspection conformément aux prérogatives du décret n°2002-255 qui lui a attribué un rôle de pilotage et de coordination de l'inspection de la radioprotection en région. Le projet de loi relatif à la réforme de la Santé publique renforce cette décision puisqu'il le corps des « inspecteurs radioprotection » vient d'être créé¹².

¹¹ Voir l'organigramme de l'ASN en annexe 3 « Réorganisation des pouvoirs publics en matière de radioprotection »

¹² En accord avec le Journal Officiel du 11 août 2004

Pour définir le contenu d'une telle inspection, des missions de «repérage» en radioprotection hors INB sont actuellement lancées au sein des DSNR. L'objectif principal de ces missions étant d'appréhender le champ de contrôle de la radioprotection par les futurs inspecteurs. Pour se faire, ces missions de repérage doivent réaliser un inventaire des établissements et des activités utilisatrices des rayonnements ionisants pour connaître le parc des établissements à inspecter et proposer des priorités d'inspections en fonction des enjeux sanitaires liés à l'utilisation des rayonnements ionisants. Par ailleurs, dans un souci de gestion du risque radiologique, les DSNR doivent identifier les acteurs institutionnels locaux susceptibles de participer à l'inspection pour pouvoir ensuite coordonner les différents services de l'Etat afin d'assurer un contrôle optimum de la radioprotection.

2 La mise en place de la mission repérage de la DSNR de Chalons

Après la parution du décret n°2002-255 du 22 février 2002, le Directeur général de la sûreté nucléaire et de la radioprotection (DGSNR) a confié une mission de repérage à deux DRIRE pilotes, Rhône-alpes et Basse Normandie, dans le but d'appréhender le champ de contrôle de la radioprotection dans le domaine du nucléaire de proximité à l'échelle déconcentrée. Les conclusions de leur mission, achevée à la fin de l'année 2003, ont permis de dégager quatre axes de travail pour la mise en place du système d'inspection de la radioprotection dans les autres régions :

1. Recenser les activités et les sites concernés par la radioprotection, tels que la détention et l'utilisation de sources radioactives ou de générateur électrique de rayonnements ionisants
2. Présenter aux détenteurs et aux utilisateurs de rayonnements ionisants les nouvelles exigences réglementaires et recenser les difficultés rencontrées pour procéder à une évaluation de la radioprotection des travailleurs, des patients, du public et de l'environnement en région
3. Identifier puis rencontrer les acteurs locaux intervenant dans le domaine de la radioprotection pour comprendre leurs missions, leur organisation et leurs pratiques, pour leur présenter la nouvelle ASN et pour envisager un travail commun « d'entente administrative » plutôt qu'un partage des responsabilités
4. Réfléchir à la mise en place d'un nouveau système de surveillance et de contrôle de la radioprotection en étroite collaboration avec les autres organisations concernées

Par ailleurs, depuis février 2002, la DGSNR met en place des groupes de travail sur les thèmes variés liés au contrôle de la radioprotection dans le nucléaire de proximité, dégagant ainsi des priorités nationales. A ce titre, on peut citer :

- Le rapport «Priorités nationales en radioprotection - Proposition pour une meilleure protection des personnes contre les dangers des rayonnements ionisants» dit rapport « Pr. VROUSSOS » publié en juin 2004 qui reprend les résultats de la mission repérage des DRIRE pilotes et synthétise l'avis de plusieurs experts notamment en santé publique
- Le rapport de l'INVS «Exposition aux rayonnements ionisants d'origine médicale - proposition pour la mise en place et le développement d'activités de surveillance épidémiologique en population générale»
- Les rapports des groupes de travail «inspection de la radioprotection dans le nucléaire de proximité» regroupant les agents de la DGSNR et des DSNR

S'appuyant sur ces rapports de réflexion sur la mise en place de l'inspection de la radioprotection à l'échelle déconcentrée, l'ensemble des DSNR, dont celle de Chalons en Champagne, ont démarré en 2004 leur propre mission de repérage, contribuant ainsi au renforcement du contrôle de la radioprotection en région.

3 Objectifs et démarche du mémoire

3.1 Objectifs

Le mémoire s'ancre pleinement dans la mission repérage de la DSNR de Châlons en Champagne en consistant en une réflexion sur la stratégie à adopter et sur la démarche à mettre en œuvre pour identifier, caractériser et hiérarchiser les activités et les établissements du nucléaire de proximité présentant des enjeux sanitaires pour les différentes populations exposées. Conjointement, le travail d'identification des acteurs et des organisations intervenant dans les domaines industriel, de recherche et médical mettant en œuvre des rayonnements ionisants contribuera à la démarche de gestion du risque radiologique entreprise par la DSNR à l'échelle régionale.

3.2 Démarche

La première partie du travail a porté sur la collecte d'informations concernant les détenteurs et les utilisateurs de sources radioactives et de générateurs électriques de rayonnements ionisants dans les domaines de l'industrie, de la recherche et du médical pour les quatre départements¹³. Le travail a continué par :

- Une caractérisation de ces activités
- Une identification des personnes exposées et des différentes voies d'exposition possibles (irradiation, contamination externe et interne)
- Une réflexion sur une proposition de choix d'indicateurs en vue d'une hiérarchisation des risques engendrés. Cette réflexion a porté sur :
 - Les débits de doses délivrées : problématiques des techniques de mise en œuvre des rayonnements ionisants, une spécificité de chaque activité
 - Les limites annuelles d'incorporation
 - Les données du suivi dosimétrique des travailleurs

Pour ce faire, la réalisation du mémoire s'est scindée en deux approches conjointes très complémentaires :

- Un travail bibliographique portant sur :
 - La réorganisation des pouvoirs publics dans le domaine de la radioprotection
 - L'identification des différents acteurs concernés par la radioprotection pour collecter et croiser les différentes données de repérage
 - Les problématiques techniques liées directement à la radioprotection dans les activités identifiées notamment pour analyser les points critiques présentant des enjeux sanitaires pour les populations exposées
- Une approche de terrain, dont le planning est présenté ci-après, avec des visites d'établissements et des discussions avec les acteurs concernés

¹³ La région Champagne-Ardenne est composée de quatre départements : les Ardennes (08), l'Aube (10), la Marne (51) et la Haute Marne (52)

Dates	Réunion / Stage	Apport pour le mémoire
Début du stage	Visite médicale au CEA	Aptitude à travailler dans le nucléaire : état initial avant sortie sur site, notamment passage d'une anthropogammamétrie, attribution d'un dosimètre passif (film) et suivi médical associé
4 mai	Visite de la centrale nucléaire de Chooz (en arrêt de tranche)	Premier contact avec le nucléaire. Objectifs : Avoir un référentiel des pratiques de la radioprotection en centrales nucléaires (ici une INB) par rapport aux pratiques mises en œuvre dans les activités du « nucléaire de proximité » qui est le thème du mémoire. Approche terrain des zones contrôlées et surveillées et des dosimétries associées. Techniques d'habillage et de déshabillage avec vêtements appropriés avant entrée en zone. Utilisation du radiamètre durant la visite.
10-14 mai	Participation au stage « Radioprotection » à la DGSNR à Paris	➤ Généralités sur la radioactivité ➤ L'interaction rayonnements matière ➤ Les effets biologiques des rayonnements ionisants ➤ La protection contre l'exposition interne et externe ➤ Gestion dosimétrique et port des tenues de protection contre la contamination radioactive ➤ La démarche ALARA ➤ Appareils de radioprotection, principes de détection, statistiques et correction de mesures
24-28 mai	Immersion à la DSNR de Lyon (Les DSNR de Lyon et Caen sont les DRIRE pilotes pour la radioprotection du nucléaire de proximité)	Approche terrain des enjeux de la radioprotection par des visites avec des inspecteurs de Lyon, des SD8 et SD9 de la DGSNR : ➤ Service de médecine nucléaire d'un hôpital notamment le TEPSCAN ➤ Institut de soudure - Tirs gammagraphiques ➤ Participation à un examen de passage CAMARI ➤ Discussion avec un MISP sur les principes de radioprotection dans les établissements de santé ➤ Approche de la réglementation : code de la santé, code du travail...
1 ^{er} juin	Participation à un TP « détection »	Manipulation des appareils de mesure et prise en compte des incertitudes
2 juin	Rencontre avec le directeur de l'Agence Régionale d'Hospitalisation (ARH)	Croisement des données ARH/OPRI pour les appareils médicaux qualifiés « d'équipements lourds ». Premier contact pour lancer un groupe de travail sur la gestion globale des risques sanitaires dans les établissements de santé (cf. ANAES)
4 juin	Rencontre avec J. FALIU (IGS DRASS)	Gestion du risque radiologique par l'inspection régalienne : discussion sur la décision nationale de désengagement des DRASS sur certains points du contrôle de la radioprotection
8 juin am	Rencontre de l'équipe SD7 (IGS DGSNR)	Rapport VROUSSOS sur les priorités en matière d'inspections de la radioprotection
8 juin pm	Réunion à la SD8 de la DGSNR (Fontenay aux Roses)	Renseignements sur les différents types, le fonctionnement et la mise en œuvre des gammagraphes dans le domaine industriel

Dates	Réunion / Stage	Apport pour le mémoire
10 juin	Rencontre avec la Caisse Régionale d'Assurance Maladie (CRAM)	Premier contact DSNR/CRAM pour la mise en place de la gestion du risque radiologique avec les ingénieurs conseil de la CRAM
11 juin	Visite de « Ciment CALCIA » à Vitry	Exemple d'un détenteur de sources scellées utilisées pour des Jaugeages de la cuve à ciment
17 juin	Rencontre avec le Dr. PETERS, MISP à la DDASS de la Marne	Croisements des données notamment pour les GERIX médicaux soumis aux anciens agréments DDASS - Gestion du risque radiologique par une proposition d'inspections conjointes DDASS/DSNR
1 ^{er} juillet	Visite d'un service de radiologie avec un organisme agréé par la DGSNR	Enjeux de la radioprotection pour la radiologie conventionnelle, la radiologie dentaire, l'utilisation de scanner, de mammographe, de panoramique dentaire et des appareils mobiles
6 juillet	Rencontre avec les inspecteurs du travail des domaines du droit commun, de l'agriculture et du transport	➤ Croisement des données des détenteurs de sources radioactives dans leurs domaines respectifs ➤ Premier contact pour la gestion du risque radiologique avec des inspections communes : droit de la santé publique et droit du travail
9 juillet	Visite du CSTFA (Centre de stockage des déchets radioactifs de très faible activité) et du CSA (Centre de stockage des déchets de faibles et moyennes activités à vie courte) dans l'Aube	➤ Connaissance des techniques de stockage des déchets radioactifs de très faible activité et de faible et moyenne activité à vie courte (techniques, réglementation, admission des déchets....) ➤ Parallèle avec les problématiques des déchets radioactifs hospitaliers du nucléaire de proximité
12 juillet	Observation d'une inspection avec la SD9 dans un service de curiethérapie (Marne)	➤ Approche terrain des enjeux de la radioprotection dans des services de curiethérapie et de médecine nucléaire avec TEPSCAN
26-27-28 juillet	Immersion à la SD9 « activités médicales » de la DGSNR (Paris)	➤ Visite d'un service de radiothérapie pour comprendre les enjeux de la radioprotection ➤ Protection contre l'exposition externe : calculs de radioprotection ➤ Compréhension des différents types de contrôle existant pour le nucléaire de proximité hospitalier
3 Août	Immersion à la SD1 pôle « sources radioactives » de la DGSNR (Fontenay aux Roses)	➤ Enjeux de la radioprotection dans le nucléaire de proximité industriel ➤ Les différents contrôles opérés par la SD1 pour la protection et la gestion du risque radiologique ➤ Suivis des sources radioactives en partenariat avec l'IRNS

**CHAPITRE 2 : IDENTIFICATION ET CARACTERISATION DU PARC DU NUCLEAIRE DE PROXIMITE
EN REGION CHAMPAGNE-ARDENNE**

1 Réflexion sur l'exhaustivité des données du parc du nucléaire de proximité

1.1 La base de donnée de la DSNR

Le premier objectif du repérage est l'identification des détenteurs et des utilisateurs de rayonnements ionisants dans le nucléaire de proximité régional. Pour ce faire, une collecte d'informations puis un croisement des résultats ont été nécessaires pour réaliser une base de données simple faisant état des lieux du parc régional à contrôler : un inventaire des activités a pu ensuite être établi en séparant les domaines industriels et médicaux.

En fait, la réflexion sur l'exhaustivité des données s'est réalisée en identifiant les acteurs institutionnels locaux et nationaux ayant trait à la radioprotection dans les activités industrielles, de recherche et médicales pour pouvoir conforter les diverses informations.

1.2 La collecte d'information : identification des acteurs institutionnels en rapport avec la radioprotection

La collecte des données pour la mission de repérage a notamment pris en compte les types d'établissements, les contrôles effectués par les différents acteurs, le matériel utilisé, l'organisation institutionnelle mise en place pour les contrôles d'inspection en radioprotection ainsi que l'intégration de l'évaluation des risques radiologiques au poste de travail. Pour cela, les acteurs concernés, en région et à l'échelle nationale, ont été répertoriés puis contactés.

Remarque : Par souci de présentation d'une démarche de gestion du risque radiologique par l'identification des différents acteurs concernés, sont présentés ci-après uniquement les organismes et leurs rôles respectifs en matière de radioprotection à l'échelle de la région, les résultats de la collecte de données étant présentés par la suite.

1.2.1 L'ex-CIREA et l'ex-OPRI

L'inventaire régional des détenteurs et utilisateurs des rayonnements ionisants dans les domaines industriels et médicaux fut initialisé par les listes anciennement tenues à jour par l'ex-secrétariat permanent de la CIREA et l'ex-OPRI. Ces deux services avaient en charge, avec le bureau des rayonnements ionisants de la DGS, la réglementation concernant la radioprotection, l'instruction des dossiers d'autorisation, les contrôles de mise en service des appareils et réalisaient des contrôles périodiques au titre de la radioprotection pour l'ensemble du parc français pour les activités industrielles, de recherche et médicales.

1.2.2 Les Sous-Directions SD1 « pôle sources » et SD9 de la DGSNR et de l'IRSN

Les missions de l'ex-CIREA et de l'ex-OPRI ont été reprises et complétées en 2002 par les Sous-direction SD1 « pôle sources » et SD 9 de la DGSNR respectivement dans les domaines de l'industrie et la recherche, et les activités médicales. En particulier, la SD1 « pôle sources » instruit les dossiers de demande d'autorisation relatifs à la fabrication, la détention, l'utilisation, la manipulation de radio éléments artificiels ou de dispositifs en contenant, les autorisations concernant les fournisseurs, l'importation et l'exportation de sources radioactives ainsi que l'utilisation d'appareils électriques émettant des rayons X et les accélérateurs de particules. La SD9 quant à elle, instruit les dossiers et élabore la réglementation relative à la radioprotection pour les activités médicales et réalise des inspections, en particulier pour les équipements lourds, les GERIX médicaux et les organismes agréés.

L'IRSN a repris la mission de l'ex-CIREA quant au suivi des sources radioactives (acquisition, détention, récupération, élimination) et au suivi dosimétrique des travailleurs.

1.2.3 L'Agence Régionale d'Hospitalisation

Instances de coordination, les Agences régionales de l'hospitalisation (ARH), créées par l'ordonnance du 24 avril 1996, sont des groupements d'intérêt public associant les services de santé de l'Etat (DRASS, DDASS, médecin inspecteur régional) et l'assurance maladie (notamment la CRAM).

Elles sont chargées de mettre en œuvre, au niveau régional, la politique hospitalière définie par le Gouvernement, d'analyser et de coordonner l'activité des établissements de santé publics et privés, de conclure avec eux des contrats pluriannuels d'objectifs et de moyens, et de déterminer leurs ressources. Elles s'appuient sur les travaux des conférences régionales de santé qui définissent annuellement les priorités régionales de santé et sur les avis des Comités régionaux de l'organisation sanitaire (CROS). Elles élaborent, en partenariat avec tous les professionnels de santé, les Schémas régionaux de l'organisation sanitaire (SROS) qui tracent, tous les cinq ans, le cadre de l'évolution de l'offre de soins hospitaliers en adéquation avec l'ensemble du système de santé. La planification sanitaire recoupe les préoccupations de la radioprotection de l'ASN en évitant la multiplication des installations médicales pouvant conduire à des expositions inutiles des patients et des travailleurs.

L'ordonnance du 4 septembre 2003 a confié aux ARH une mission d'inspection du risque sanitaire dans les établissements de santé qui était exercée, auparavant, uniquement par le Préfet. A ce titre, elles interviennent pour délivrer l'autorisation préalable à l'acquisition des équipements lourds. Le tableau ci-dessous présente les deux types d'autorisations à détenir pour pouvoir utiliser les équipements lourds mettant en œuvre des rayonnements ionisants.

	Autorisation pour la pratique de l'activité médicale en fonction des objectifs de la planification sanitaire (Carte sanitaire et SROS)		Autorisation au titre de la radioprotection
Services compétents	ARH	DHOS	DGSNR
Scanner et angioscopie			
Accélérateur de particules			
Gamma caméra			
TEP			
TEP SCAN			

Tableau 3 : « Les deux types d'autorisations requises pour l'utilisation d'un équipement lourd »

1.2.4 Les services de santé environnementale de la DRASS et des DDASS

L'organisation des services centraux du contrôle de la radioprotection a été profondément remaniée depuis la publication du décret du 22 février 2002 créant la DGSNR. Ainsi, certaines missions auparavant confiées aux DRASS et DDASS sont maintenant assurées par les DSNR comme mentionné dans la circulaire n°DGSNR/SD7/04-663 du 29 juillet 2004 du ministre de la santé et de la protection sociale.

1.2.4.1 Les missions des DRASS et DDASS en radioprotection

Les DRASS continuent leurs missions de radioprotection concernant le domaine de la santé environnementale. Elles s'occupent ainsi du contrôle radiologique des eaux destinées à la consommation humaine, de la gestion des risques liés au radon, de l'évaluation de l'impact radiologique des activités nucléaires, de la surveillance radiologique de l'environnement. De plus, elles continuent à exercer leurs missions relatives aux situations d'urgence radiologique : distribution de comprimés d'iode en cas d'accident nucléaire et préparent la gestion des situations d'urgence à caractère radiologique avec l'ASN.

1.2.4.2 Les missions confiées aux DSNR en radioprotection

D'une manière générale, ces missions concernent l'utilisation des sources radioactives et leur contrôle. Les DSNR s'occupent désormais des déchets d'activités de soins susceptibles de contenir des radionucléides, des alertes liées aux portiques des centres de stockage et de traitements des déchets, de la récupération des sources radioactives.

1.2.5 Les services des pharmaciens inspecteurs de santé publique et des médecins inspecteurs de santé publique des DDASS (08, 10, 51, 52)

Réalisant des missions de contrôle dans les officines privées et publiques, les pharmaciens inspecteurs en santé publique contrôlent la conformité réglementaire de l'administration des produits radio pharmaceutiques par les radio pharmaciens des établissements de santé, notamment dans les services de médecine nucléaire.

Auparavant les médecins inspecteurs de santé publique délivraient les agréments des générateurs électriques de rayonnements ionisants médicaux pour la radiologie conventionnelle. Depuis le 20 juin 2004, ces agréments ont été remplacés par des déclarations aux Préfets via les DSNR.

1.2.6 L'ANDRA et la problématique des déchets hospitaliers radioactifs

L'Agence nationale de gestion des déchets radioactifs (ANDRA) a défini des consignes et élaboré un guide d'enlèvement à l'attention des «petits producteurs» de déchets radioactifs dont font partie les établissements de santé. Elle leur fournit des emballages spécifiques (fûts ou bonbonnes en fonction de la nature des déchets) afin de les entreposer sur place en attendant leur prise en charge. Les producteurs doivent respecter une procédure rigoureuse pour assurer la sécurité de chaque phase de suivi et de contrôle des déchets. Ces déchets de faible et moyenne activité à vie courte sont répertoriés, suivis et stockés au Centre de Stockage de l'Aube (CSA).

De nombreux établissements de santé ont recours à des sources de radionucléides artificiels notamment dans les unités de médecine nucléaire à des fins de diagnostics thérapeutiques et de recherche biomédicale. Des déchets radioactifs résultent alors de ces préparations ou de ces manipulations. Leur aspect peut être varié mais la quantité est en général relativement faible (inférieure à 100 tonnes en 2003 pour toute la France).

1.2.7 Les inspecteurs du travail (droit commun, agriculture et transport)

L'inspection du travail est un corps interministériel unique, dont les 1 240 membres sont affectés (soit en "section de contrôle", soit dans d'autres services ou directions diverses) à l'un des trois ministères chargés de l'application du droit du travail : Emploi (80 % d'entre eux), Agriculture (15 %) et Transports (5 %). Ceux qui sont affectés au ministère de l'Emploi sont les plus nombreux et ont une compétence de droit commun sur l'ensemble des entreprises qui ne relèvent pas d'un système particulier d'inspection du travail. Les inspecteurs du travail en Agriculture sont chargés de veiller à l'application aux professions agricoles des dispositions du Code du travail. Enfin les inspecteurs du travail des Transports sont nés de la tutelle de l'Etat sur les chemins de fer et sont chargés du contrôle de la législation du travail dans les entreprises de transport par chemin de fer, par route, air et voies fluviales (transport public).

Les inspecteurs du travail de droit commun (DRTEFP) ont aussi en charge l'examen du Certificat d'aptitude à manipuler les appareils de radioscopie et de radiographie industrielles (CAMARI), examen obligatoire pour tout radiologue industriel¹⁴ (contrôles non destructifs option gammagraphie ou générateur électrique de rayonnements ionisants).

1.2.8 Les inspecteurs DRIRE des ICPE

Les établissements classés au titre des rubriques 1700-1721 de la nomenclature ICPE sont répertoriés par les divisions environnement des DRIRE au niveau régional et départemental (les groupes de subdivisions des DRIRE) pour chaque région administrative.

1.2.9 Les organismes agréés

Les organismes agréés dont la liste est fixée par l'arrêté du 9 janvier 2004 interviennent lors des contrôles techniques périodiques et les contrôles de mise en service des appareils et des installations notamment pour les activités du nucléaire de proximité industriel et médical. A ce titre, le contrôle de second niveau réalisé par la DGSNR permet de lister les établissements réellement contrôlés par rapport aux prescriptions réglementaires des dossiers d'autorisation et de déclaration. Par ailleurs, certains de ces organismes peuvent être agréés pour dispenser une formation de radioprotection notamment pour les personnes compétentes en radioprotection.

1.2.10 La Caisse régionale d'assurance maladie

La CRAM est un organisme de droit privé chargé d'une mission de service public. Pour cela, elle dispose d'une autonomie administrative et financière, mais reste soumise au contrôle de l'Etat et de ses représentants régionaux (DRASS, Préfet de Région). Ses missions se déclinent en 5 grands pôles : la mise à jour du compte retraite des salariés, l'assurance du service de la retraite, l'apport d'une aide et d'un accompagnement social aux assurés fragilisés, la contribution à la politique régionale de santé et la prévention des risques professionnels. C'est principalement cette dernière mission qui rejoint la problématique de la radioprotection dans les établissements industriels et médicaux.

1.2.11 Les autres acteurs à contacter

D'autres acteurs ont été répertoriés mais n'ont pas encore été contactés. Il s'agit des ordres des médecins, des dentistes, des associations et des syndicats professionnels.

¹⁴ Conformément aux exigences de l'Arrêté du 25 Juin 1987 modifié

2 Résultats du repérage des activités du nucléaire de proximité

2.1 Le nucléaire de proximité industriel

2.1.1 Les techniques de radiographie industrielle

La radiographie industrielle est une méthode de contrôle non destructif consistant à réaliser des clichés radiographiques sur un matériau pour mettre en évidence une variation de quantité de matière en utilisant soit le rayonnement gamma émis par les radio-nucléides contenus dans une source scellée, soit les photons X émis par des générateurs électriques. Les défauts d'inhomogénéité se traduisent par une variation de l'atténuation du rayonnement et par une variation du contraste sur la plaque photographique. Les domaines d'utilisation de la radiographie industrielle sont nombreux : contrôles des soudures en génie civil, dans les fonderies, les chaudronneries, les industries du pétrole et du gaz, les constructions mécaniques aéronautiques et navales, l'armement...

2.1.1.1 La gammagraphie

La pièce à radiographier est placée entre la source de photons gamma et un film radiographique disposé dans une cassette souple ou rigide. Reliée à un porte-source, la source scellée émettrice de rayons gamma est placée en position de stockage et de transport au milieu d'une protection biologique adéquate (uranium appauvri et/ou plomb), limitant l'irradiation de l'opérateur (à titre d'indication, la norme NF M 60-551 indique la valeur maximale de 0.1 mGy/h à 1 mètre du projecteur). Après avoir connecté au projecteur la télécommande (manuelle ou automatique) et la gaine d'éjection, l'opérateur installe le film radiographique et procède au balisage de la zone de travail qui est déterminée en fonction de la nature et de l'activité de la source. Puis, il effectue le tir : la source vient se positionner à l'extrémité de l'accessoire d'irradiation. Après un temps de pose pouvant varier de quelques secondes à quelques heures (dépendant de la nature et de l'épaisseur du matériau à radiographier), l'opérateur commande le retour de la source dans le conteneur de stockage et l'enclenchement de plusieurs sécurités.

La gammagraphie présente au moins trois avantages (principe de justification)

- Un pouvoir de pénétration important et une large gamme d'utilisation selon l'activité et la nature de la source (de quelques millimètres d'alliages légers à 50 cm de béton par exemple)
- Un pouvoir de résolution très élevé qui peut rendre visible un défaut de soudure de 0.2 mm sur une tôle d'acier de 20 mm
- Une mobilité : les gammagraphes sont des appareils transportables faciles à utiliser sur chantiers extérieurs

Les radioéléments les plus couramment utilisés¹⁵ en gammagraphie industrielle sont :

- l'iridium 192 (activité comprise entre 1.8 et 4.44 TBq)
- le cobalt 60 (activité de l'ordre de 0.3 GBq)
- le césium 137 (activité comprise entre 0.3 et 80 GBq)

En termes de radioprotection, les «données constructeur» à respecter pour les projecteurs sont fixées par le décret n°85-968 du 27 août 1985. Le tableau suivant reprend ces valeurs pour les quatre classes de projecteurs.

¹⁵ D'après le rapport UNSCEAR de 2000. D'autres radio-nucléides sont aussi employés comme l'yttrbium, le sélénium, le thulium.

Classe de projecteur	Caractéristiques de l'appareil	Débit de dose absorbée max au contact dans l'air	Débit de dose absorbée max à 1m des parois
Projecteur de classe P	Projecteur portatif conçu pour pouvoir être porté par une seule personne	1 mGy/h	0.1 mGy/h
Projecteur de classe M	Projecteur mobile ou portatif, conçu pou pouvoir être déplacé facilement au moyen d'un chariot	2 mGy/h	0.1 mGy/h
Projecteur de classe F	Projecteur fixe ou de mobilité réduite aux limites d'une enceinte spécialisée	2 mGy/h	0.1 mGy/h
Projecteur de classe A	Projecteur spécial conçu pour des déplacements autonomes, ou non, dans des conduits tubulaires	Non prévu par la norme NF M60-551	

Tableau 4 : « Normes de construction des projecteurs de gammagraphie pour la radioprotection »

Le respect de ces débits de dose, couplé à une étude de poste¹⁶ et des techniques de balisages des zones adaptées, permettent d'optimiser la radioprotection.

2.1.1.2 La radiographie par l'utilisation de générateurs électriques de rayonnements ionisants (GERIX)

Après l'accélération des électrons par une différence de potentiel (ddp de 50 à 400kV) entre deux électrodes, l'impact de ceux-ci sur l'anode entraîne une émission de rayonnements X. Le temps de pose varie entre quelques dixièmes de seconde et plusieurs dizaines de minutes suivant le matériau à radiographier et la tension délivrée par le GERIX. On distingue deux grands types d'utilisation :

- Les GERIX à poste fixe : ils sont utilisés dans des casemates d'irradiation pour la radiographie de pièces d'épaisseurs variables. Les sécurités réglementaires limitent en principe les risques d'accident.
- Les GERIX mobiles : Utilisés pour le contrôle radiographique sur chantiers, ils posent des problèmes de radioprotection notamment lorsque le balisage de la zone de tir est mal réalisé : des expositions accidentelles peuvent alors se produire non seulement pour l'opérateur mais aussi pour les autres travailleurs du chantier voire même le public environnant. Un respect impératif des consignes de radioprotection est par conséquent nécessaire.

2.1.1.3 La radiographie X à l'aide d'accélérateurs

Ces appareils, extrêmement puissants et lourds, sont utilisés en poste fixe dans des casemates généralement par des grandes industries de type Framatome. Par contre, des mini accélérateurs de rayonnements X sont mis progressivement sur le marché pour la radiographie des matériaux denses ou épais. De part les énergies délivrées (de l'ordre de 4 MeV), leur emploi implique un respect scrupuleux de la réglementation relative à la radioprotection.

2.1.1.4 La bétagraphie

La radiographie par électron est une technique utilisée pour le contrôle non destructif des feuilles minces de plastiques ou de papier. Généralement, cette technique met en œuvre les rayonnements bêta du carbone 14. Les risques d'irradiation par bétagraphie sont faibles pour l'opérateur, de part les caractéristiques des rayons bêta peu pénétrants.

¹⁶ Dont un exemple est proposé en annexe 8 « Étude de poste pour l'utilisation d'un gammagraphe sur chantier »

2.1.2 Les jauges

2.1.2.1 Les jauges de niveau

Employées pour le contrôle des niveaux des réservoirs liquides et pulvérulents, le remplissage des cuves, les jauges de niveau sont très répandues. Ce sont des appareils à poste fixe constitués d'un bloc émetteur contenant une source radioactive scellée d'activité dépassant rarement 20 GBq et d'un bloc détecteur. Le faisceau de photons gamma émis par la source est atténué par la traversée de l'espace entre ces 2 blocs. Le signal capté par le détecteur permet de renseigner sur la grandeur mesurée. Par conception, le bloc émetteur constitué de plomb assure une protection collective et individuelle de sorte que les débits de dose équivalente ne dépassent généralement pas les 2 μ Sv/h à 1 mètre du bloc. De plus, en fonctionnement normal, il n'y a pas de poste de travail à proximité immédiate de l'appareil : le personnel n'est généralement pas classé.

2.1.2.2 Les jauges d'épaisseurs

Ces jauges mettant en œuvre soit des rayonnements bêta, soit des rayonnements gamma, en fonction du matériau à analyser, sont utilisées pour l'étude de densité principalement dans les activités de contrôle de tuyauteries et des enrobés bitumeux.

2.1.3 Les traceurs industriels

Les traceurs permettent de suivre une population marquée sans en modifier le comportement. En marquant les entités élémentaires (les atomes) ils permettent une détection sensible en utilisant des quantités infiniment petites de radioéléments en sources non scellées. D'un point de vue radioprotection, le danger est essentiellement dû à un risque de contamination accidentelle.

Ces traceurs industriels sont principalement employés dans les activités suivantes :

- La mesure et la distribution du temps de séjour d'un produit dans un réacteur chimique
- La recherche de fuite dans les canalisations enterrées
- Le contrôle de l'étanchéité d'un objet scellé
- La mesure de débits notamment dans les fleuves et les eaux souterraines
- La mesure des usures des pièces usinées

2.1.4 Les applications reposant sur le principe de l'ionisation des gaz

Plusieurs applications industrielles des rayonnements ionisants reposent sur leur aptitude à ioniser les gaz de manière différente suivant leur nature et leur énergie. Parmi ces applications on peut noter : l'élimination de l'électricité statique, les détecteurs de fumée, les anciens paratonnerres radioactifs (utilisation interdite depuis 1986), les peintures luminescentes, les batteries au plutonium 238 qui sont de plus en plus remplacées par les batteries au lithium.

2.1.5 Les applications liées à la recherche scientifique

De nombreux domaines de recherche emploient des radioéléments artificiels parmi lesquels :

- La biologie végétale notamment pour l'étude de du cycle du CO₂ et de l'oxygène dans la respiration cellulaire à partir du carbone 14 et du phosphore 32
- Les études de prospection minières par l'emploi de gamma-densimètres-humidimètres mobiles: équipés de deux sources radioactives scellées (césium 137 et américium 241-beryllium 9), ils permettent de mesurer la densité et l'humidité d'un sol. L'appareil (Césium 137) est posé sur un forage d'environ 40 cm de profondeur dans lequel est introduit mécaniquement le porte source 241 Am-9 Be
- L'hydrologie : des traceurs radioactifs gamma permettent le suivi de la migration des polluants à travers les roches notamment pour l'étude des périmètres de prélèvement en eau potable

2.1.6 Les analyseurs de plomb

Ces appareils portatifs sont utilisés pour mesurer la teneur de plomb dans les peintures des murs de locaux d'habitations par contact direct de l'appareil sur les parois. Les sources radioactives scellées utilisées ne dépassent pas le GBq. Des mesures in situ ont montré que pour un analyseur de plomb équipé d'une source de cobalt 57, les débits de dose côté face avant de l'appareil restait inférieur à 40 µSv/h et que les zones contrôlées et surveillées pouvaient être définies respectivement à 10 cm et à 20 cm du détecteur. Dans certains cas (études de poste), un classement du travailleur peut être requis en catégorie B ainsi que le port d'une bague dosimétrique puisqu'il s'agit principalement d'une exposition des extrémités.

2.1.7 La conservation des denrées alimentaires

La radioconservation alimentaire utilise le rayonnement du cobalt 60 et des accélérateurs de particules d'énergie inférieures à 10 MeV. Cette technique n'entraîne pas de rémanence radioactive au sein des produits bien qu'il existe des réticences de la part de la population. Les produits à irradier sont placés dans une casemate d'irradiation dans leur emballage final. La source est ensuite sortie pour procéder au tir. Le choix des doses dépend des résultats souhaités. Ainsi, les faibles doses servent à inhiber la germination, à désinfecter et à déparasiter. Les moyennes doses permettent la prolongation de la conservation, l'élimination des agents d'altération et des microorganismes pathogènes. Les fortes doses quant à elles, conduisent à la stérilisation industrielle des aliments. D'un point de vue de la radioprotection, cette activité présente des sécurités au niveau des installations de sorte que les risques d'irradiation accidentelle pour les travailleurs sont faibles.

2.2 Le nucléaire de proximité médical

Dans le secteur du «nucléaire de proximité hospitalier», trois grandes disciplines mettent en œuvre des rayonnements ionisants à visée de diagnostic ou dans un but thérapeutique. Il s'agit de la radiologie, de la médecine nucléaire et de la radiothérapie.

2.2.1 Le radiodiagnostic médical et dentaire

Le radiodiagnostic, qui est la plus ancienne des applications médicales des rayonnements ionisants, occupe une place prépondérante dans les diverses activités de l'imagerie médicale. Il se scinde en quatre grandes familles d'activités, toutes basées sur le principe de l'atténuation différentielle dans les organes des **rayons X produit par des générateurs électriques de rayonnements ionisants** (GERIX médicaux). L'énergie moyenne des photons X employés varie entre 20 KeV (cas de la mammographie) et 80 KeV (cas de la scannographie).

2.2.1.1 La radiologie conventionnelle

Elle se décline en six activités:

La radiologie classique	Réalisée dans des locaux fixes et conformes à la norme NF15-161 : c'est le cas des radiologies pulmonaires, des radiologies des os
Les appareils mobiles	Principalement employés pour des radiographies au lit du malade lorsque celui-ci est intransportable ¹⁷
La radiologie réalisée au bloc opératoire	Contribue à la bonne exécution des actes chirurgicaux : de plus en plus, ces appareils mobiles sont équipés d'amplificateur de brillance fournissant sur écran des images en temps réel permettant d'adapter le geste chirurgical
La mammographie	Nécessite des appareils à haute résolution fonctionnant sous une faible tension ce qui favorise les contrastes exigés par la constitution de la glande mammaire
Le panoramique dentaire	Permet d'obtenir sur une même image l'intégralité des deux maxillaires par rotation du tube radiogène autour de la tête du patient durant une dizaine de secondes
Le rétroalvéolaire	Monté le plus souvent sur des bras articulés, ces appareils sont utilisés par des dentistes pour la prise de clichés très localisés de dents. Ils fonctionnent avec des tensions et des intensités faibles et ont des temps de pose très courts (centième de seconde)

Tableau 5 : « Les activités de la radiologie conventionnelle médicale et dentaire »

2.2.1.2 La radiologie interventionnelle

Il s'agit d'un examen de type radioscopique qui, du fait de sa complexité et de sa durée, conduit à des doses qui peuvent être importantes pour les opérateurs et les patients : cette technique doit donc être justifiée par des nécessités médicales et sa pratique optimisée d'un point de vue de la radioprotection.¹⁸

2.2.1.3 L'angiographie numérisée

Cet examen consiste à réaliser des images analogiques avant et après l'administration au patient d'un produit de contraste : la comparaison des superpositions permet le diagnostic.

2.2.1.4 La scanographie

Un faisceau de photons X étroitement collimaté émis par un tube radiogène tournant autour du patient et associé à un système informatique d'acquisition d'images permet la reconstitution en trois dimensions des organes avec une meilleure qualité d'image qu'avec les appareils de radiodiagnostic conventionnel. Les scanners multibarrettes donnent une image beaucoup plus fine de la structure des organes mais délivrent des débits de dose plus élevés aux patients.

¹⁷ Ce type de radiologie utilise des appareils fonctionnant en décharge de condensateur ayant ainsi une tension limitée, ce qui diminue le rayonnement diffusé en termes de radioprotection

¹⁸ L'article 9 de la directive 97/43 impose une vigilance particulière pour cet examen médical

2.2.2 La médecine nucléaire

Cette activité met en œuvre des radio éléments artificiels en sources non scellées dans un but de diagnostic (in vitro et in vivo) ou thérapeutique.

- Le diagnostic in vitro permet de doser certains composés contenus dans les fluides biologiques notamment le sang. Les activités présentes dans des kits d'analyse ne dépassent généralement pas quelques kBq ce qui limite les risques d'exposition pour les travailleurs du laboratoire
- Le diagnostic in vivo est une technique d'imagerie fonctionnelle qui consiste à administrer un radiopharmaceutique adapté à l'organe cible au patient. La localisation dans l'organisme de la substance radioactive se fait par un détecteur spécifique, la caméra à scintillation (gamma caméra) constituée par un cristal d'iodure de sodium couplé à un système d'acquisition et d'analyse par ordinateur.
- La radiothérapie métabolique consiste à délivrer au patient un radiopharmaceutique émetteur de rayonnement bêta qui délivrera une dose importante à un organe cible dans un but curatif ou palliatif. Cette technique met en œuvre des radionucléides à faible activité pour traiter par exemple l'hyperthyroïdie et les métastases osseuses et à forte activité pour soigner les cancers thyroïdiens.

2.2.3 La radiothérapie

La radiothérapie est l'une des techniques employées pour traiter les tumeurs cancéreuses par la destruction des cellules malignes grâce aux rayonnements ionisants. On distingue deux grands type de radiothérapie :

- La radiothérapie externe : L'irradiation est effectuée soit en utilisant un appareil de cobaltothérapie équipé d'une source de cobalt 60 dont l'activité est de l'ordre de 200TBq, soit à l'aide d'un accélérateur de particules produisant des photons gamma d'énergie comprise entre 4 et 25 MeV délivrant des débits de dose variant entre 2 et 6 Gy/h. D'un point de vue de la radioprotection, la conception des locaux est fondamentale et nécessite la mise en œuvre de véritable blockhaus d'irradiation.
- La curiethérapie : Il s'agit d'une autre technique de traitement des tumeurs cancéreuses, notamment de la peau, du sein ou des organes génitaux par l'utilisation de sources scellées. On distingue trois types d'applications :

La curiethérapie à bas débit	Les sources utilisées se présentent généralement sous forme de fils de 0.3 à 0.5 mm de diamètre, de longueur maximale de 14 cm et dont l'activité linéique est comprise entre 50 MBq/cm et 250 MBq/cm. Les débits de dose délivrés sont généralement de 0.4 à 2 Gy/h. Le patient est porteur des sources durant toute la durée de l'hospitalisation
La curiethérapie pulsée à moyen débit	Cette technique permet de délivrer les mêmes doses que pour le bas débit. Comme les activités des sources sont plus importantes, le traitement se fait à l'aide d'un projecteur et par pulses : le patient n'est donc pas porteur des sources en permanence. Les débits de dose délivrés varient entre 2 et 12 Gy/h et les activités maximales sont de 18.5 GBq.
La curiethérapie à haut débit	Cette technique, nécessitant un projecteur, met en œuvre des sources d'activités très élevées (370 GBq) délivrant des doses supérieures à 12 Gy/h. D'un point de vue de la radioprotection, cette technologie nécessite la mise en œuvre de blockhaus d'irradiation

Tableau 6 : « Les différentes technique de curiethérapie »

2.3 Bilan sur la présentation des activités du nucléaire de proximité

Le croisement des différentes données a permis de faire le bilan suivant :

	Type d'activités du nucléaire de proximité	Quantité
Nucéaire de proximité médical	Autorisations des sources scellées et non scellées	17
	Déclaration des GERIX médicaux	982
	Scanners	5
	Service de médecine nucléaire	6 dont 1 TEP
	Accélérateurs (dont téléthérapie)	6 (dont 2)
Nucéaire de proximité industriel et de recherche	Autorisations des sources scellées	101
	Autorisations des sources non scellées	107
	ICPE	30
	Vétérinaires	237

Tableau 7 : « Bilan du repérage du parc du nucléaire de proximité en région Champagne-Ardenne »

Le «repérage administratif» des détenteurs et des utilisateurs de rayonnements ionisants permet de dégager des caractéristiques générales des trois secteurs du nucléaire de proximité :

- Le secteur industriel : il est composé en grande partie de PME-PMI pour lesquelles l'usage des rayonnements ionisants n'est pas l'activité principale et par conséquent on relève un manque de culture de radioprotection
- Le secteur de la recherche scientifique : il est caractérisé par des activités très diverses et évolutives, des personnels aux statuts variés et mobiles, des problèmes humains et financiers, une imbrication des différents risques, notamment chimiques, biologiques et radiologiques ainsi qu'un manque de culture de la prévention des risques.
- Le secteur médical : il est très diversifié puisqu'il s'étend du praticien isolé (tels que les dentistes) au grand CHU en passant par les cabinets de radiologie conventionnelle privés « en ville ». Les activités médicales ont pour particularité de devoir gérer les cibles au point de vue des expositions (travailleurs, public, environnement et patients) dans une logique de gestion globale des risques puisque outre le risque radiologique, le risque infectieux est tout aussi préoccupant.

**CHAPITRE 3 : « IDENTIFICATION DES DANGERS, PROPOSITION D'INDICATEURS POUR
HIERARCHISER LES ACTIVITES, DISPOSITIONS REGLEMENTAIRES POUR GERER LE RISQUE»**

1. Les populations exposées

1.1 Présentation des groupes exposés

De part la diversité de leurs origines, (industrielle, recherche scientifique et médicale), les activités du nucléaire de proximité ont leur propre spécificité de mise en œuvre des rayonnements ionisants. Néanmoins, elles atteignent toutes trois cibles, avec plus ou moins d'intensité : il s'agit des travailleurs, du public et de l'environnement. L'exposition des patients est une des caractéristiques des activités médicales.

1.2 L'exposition des travailleurs

Directement exposés aux rayonnements ionisants, les travailleurs doivent être tenus informés des dangers qu'ils encourent et leurs expositions doivent être régulièrement suivies et comparées aux valeurs exigées par la réglementation. A ce titre, sont définies dans le Code du travail, des limites de doses admissibles pour les expositions professionnelles.

Dose efficace corps entier	20 mSv par an
Dose équivalente annuelle cristallin	150 mSv
Dose équivalente annuelle peau	500 mSv
Dose équivalente annuelle extrémités (mains et pieds)	500 mSv

Tableau 8 : « Les limites de doses admissibles pour les expositions professionnelles »

Pour maîtriser les expositions et dans l'application du principe d'optimisation, il peut être possible pour certains travaux sous rayonnements de déterminer le niveau de dose individuelle permettant ainsi de définir une contrainte de dose¹⁹, celle-ci devant être inférieure aux limites imposées par le Code du travail.

Les expositions professionnelles doivent faire l'objet d'une attention particulière en raison de leurs fréquences (expositions chroniques) et de leurs intensités (expositions aiguës) : ainsi, on rapporte de nombreux cas d'incidents radiologiques pouvant conduire à la mort du travailleur²⁰.

1.3 L'exposition du public

La notion « public » désigne en fait deux groupes d'individus : d'une part, les personnes extérieures à l'établissement utilisant des rayonnements ionisants (sens premier du mot public) mais aussi les travailleurs non exposés ou dont l'exposition est inférieure au seuil des travailleurs classés. Dans les deux cas, les limites de doses admissibles pour le public sont mentionnées dans le tableau ci-après.

Dose efficace	1 mSV (dans des cas particuliers, une dose efficace supérieure peut être acceptée pour une année sous réserve que la moyenne sur 5 ans ne dépasse pas 1 mSV par an)
Dose équivalente annuelle pour le cristallin	15 mSV
Dose équivalente annuelle pour la peau	50 mSV (surface d'1cm ²)

Tableau 9 : « Les limites de dose admissible pour le public »

¹⁹ Sorte de niveau de référence interne à l'établissement et spécifique à une manipulation

²⁰ A ce titre, on peut citer l'incident du vol de source radioactive d'un gammagraphe au Pérou en 2001 qui a touché deux personnes dont un travailleur, conduisant au décès de celui-ci (voir partie 3 paragraphe 4.2.2)

L'exposition du public dépend étroitement du type d'activité et de sa mise en œuvre. En effet, dans un hôpital, il n'est pas rare de devoir prendre en compte l'exposition des visiteurs lors des études des risques radiologiques, par contre, pour un tir de radiologie industrielle effectué en casemate d'irradiation, la probabilité d'exposer une personne du public est beaucoup plus faible.

1.4 L'environnement

Cette cible est surtout sensible aux rejets de substances radioactives par les établissements médicaux²¹ et de recherche. La réglementation impose des valeurs et des concentrations maximales pour les rejets à l'émissaire des établissements ce qui limite, en principe, les risques de dissémination. Cependant, l'environnement étant un vecteur potentiel d'exposition du public, une attention particulière doit être préconisée pour maîtriser les rejets²².

1.5 L'exposition des patients

Dans le domaine médical, les expositions des patients aux rayonnements ionisants se distinguent des trois autres cibles dans la mesure où elles ne font pas l'objet de limitation stricte, même si les principes de justification et d'optimisation demeurent applicables. La situation est d'ailleurs différente selon qu'on considère l'activité de diagnostic ou de la thérapie. En effet, dans le premier cas, il est nécessaire d'optimiser en recherchant la dose minimale permettant l'obtention d'une information pertinente. Dans le second cas, il faut délivrer la dose nécessaire pour détruire la tumeur tout en préservant au maximum les tissus sains.

Actuellement, l'ASN met en place des groupes de travail pour éditer un guide sur les doses délivrées aux patients mais les activités de contrôle des DSNR ne prennent pas en compte cette notion, considérée pour l'instant du ressort des médecins. Ainsi, **dans le mémoire, la catégorie «patient» ne sera pas prise en compte.**

Compte tenu de la fréquence et de l'intensité des expositions, **les travailleurs** seront considérés dans la suite du mémoire, comme la cible principale en terme d'enjeux sanitaires.

2 Types d'expositions et moyens de protection

2.1 L'exposition externe

2.1.1 Caractéristiques

La source du rayonnement étant située à l'extérieur de l'individu, l'exposition peut être globale si elle concerne l'ensemble de l'organisme de façon homogène ou partielle si une ou plusieurs parties sont exposées. Le risque inhérent à ce type d'exposition est l'irradiation externe qui dépend étroitement du pouvoir de pénétration à travers le corps des divers rayonnements émis par la source radioactive. De ce fait, les caractéristiques et notamment la portée des différents rayonnements mis en jeu est nécessaire pour évaluer le risque et s'en protéger. Ainsi, doivent surtout être pris en compte les rayonnements électromagnétiques gamma et X et les rayonnements neutroniques qui sont très pénétrants.

²¹ L'aménagement des unités de médecine nucléaire est encadré par l'arrêté du 30 octobre 1981 – JO du 29 novembre 1981

²² A titre d'information, les rejets des INB sont suivis par les réseaux de surveillance de l'IRSN sur l'ensemble du territoire et permettent de surveiller en temps réel la radioactivité dans l'environnement

A contrario, les rayonnements particuliers de type alpha et bêta ayant des parcours dans l'air faibles (respectivement de 5 cm et de quelques mètres) et de surcroît encore plus faibles dans les tissus mous (respectivement 70 μm et 1 cm), limitent fortement les risques d'irradiation externe.

Parmi les types de rayonnements susceptibles de générer une irradiation, il faut distinguer :

- Le rayonnement primaire émis directement par la source
- Le rayonnement secondaire ou diffusé²³ produit par l'interaction du rayonnement primaire avec la matière rencontrée

2.1.2 Les moyens de protection contre l'exposition externe

Un équilibre doit s'opérer entre la réduction des doses et les protections à mettre en place. Pour cela, trois paramètres permettent de réduire les niveaux d'exposition externe. Il s'agit du **temps** d'exposition, de la **distance** par rapport à la source et des **écrans** à interposer entre la source et les personnes exposées.

➤ La réduction du temps d'exposition

Pour réduire le temps d'exposition, il convient de préparer avec minutie les opérations conduisant à un risque d'exposition externe, avec les personnes compétentes en radioprotection. Les mesures à mettre en œuvre relèvent souvent d'actions de bon sens qui peuvent s'intégrer dans la démarche de prévention des risques de l'établissement. Parmi les mesures fréquemment mises en œuvre vis à vis du facteur temps, on peut citer : le partage du temps d'intervention entre les travailleurs, la répétition en simulation pour vérifier toute la manipulation, l'utilisation de la décroissance radioactive²⁴ des radioéléments.

➤ L'éloignement par rapport à la source

Le débit de dose équivalent obéissant à la loi de l'inverse du carré de la distance (loi en $1/d^2$) (sous réserve que la source soit considérée comme ponctuelle) en s'éloignant de la source, on réduit les niveaux d'exposition. Ainsi, chaque fois qu'une distance est doublée, la dose équivalente est divisée par 4. L'éloignement est donc un moyen efficace de protection contre l'exposition externe mais à l'inverse, il ne faut pas perdre de vue que le débit de dose absorbée croît rapidement lorsqu'on se rapproche des sources. Un exemple de calcul de débit de dose pour des sources ponctuelles est présenté en annexe 5.

➤ L'interposition d'écrans entre l'opérateur et la source

Le choix des matériaux constitutifs des écrans dépend des types de rayonnements émis par les sources mais aussi de l'emplacement des écrans par rapport aux points à protéger. On peut noter à ce titre, qu'un écran se place préférentiellement au plus près des sources radioactives pour diminuer le poids et le coût de la protection. Connaissant le débit de dose équivalente, le lieu d'implantation de l'écran et les caractéristiques de la source, on peut calculer l'épaisseur d'écran nécessaire pour ramener le niveau d'exposition aux valeurs réglementaires.

²³ Le rayonnement diffusé a pour origine les interactions par effets Compton et par production de paires (annihilation des positons créés : problématique que l'on trouve notamment dans la technologie des TEPSCAN dans les services de médecine nucléaire)

²⁴ Le débit de dose absorbé est proportionnel à l'activité de la source : il diminue donc exponentiellement au cours du temps

- Protection contre les rayons alpha : ces rayons étant peu pénétrants, ils ne présentent pas de risque d'exposition externe²⁵ car une épaisseur de moins de 1 millimètre (type feuille de papier) les stoppent
- Protection contre les rayons bêta : les électrons sont arrêtés avec un matériau épais de faible numéro atomique de type plastique ou Plexiglas²⁶
- Protection contre les photons X et Gamma : contrairement aux rayons particuliers, les rayonnements électromagnétiques sont très pénétrants et ne peuvent être totalement arrêtés par des écrans mais sont seulement ralentis. Le radio protectionniste utilise pour ses calculs d'épaisseurs de murs les paramètres de demi ou dixième d'atténuation et doit prendre en compte les rayons diffusés²⁷.

2.2 L'exposition interne : la contamination

2.2.1 Caractéristiques

Aussi appelée contamination radioactive, l'exposition interne est définie comme étant « la présence indésirable de substances radioactives à la surface ou à l'intérieur d'un milieu quelconque y compris le corps humain ». Elle résulte d'une dissémination d'une substance radioactive suite à une erreur de manipulation de sources scellées ou suite à la destruction accidentelle de l'enveloppe de confinement d'une source scellée. En fait, une contamination radioactive doit être considérée comme un incident puisqu'en utilisation normale, une source non scellée disséminable doit être confinée.

Il existe trois grands types de contamination en fonction de la nature et de la forme physico-chimique de la source radioactive (gazeuse, liquide, pulvérulente) et de la cible de la contamination.

2.2.1.1 La contamination surfacique

La radioprotection a coutume de distinguer les contaminations fixées des contaminations non fixées. Les premières sont par définition non transférables et engendrent seulement un risque d'exposition externe : si ce risque est important, une décontamination surfacique s'impose. Dans le cas contraire, il n'est pas nécessaire d'intervenir tant qu'on est sûr que la contamination reste fixée. Les contaminations non fixées quant à elles, peuvent être la source de mise en suspension dans l'air de particules radioactives et conduire ainsi à des exposition corporelles internes : dès que leurs existences sont suspectées, il faut intervenir pour éviter d'entraîner des contaminations atmosphériques.

Pour agir au plus vite, la radioprotection se base sur la détection systématique de toute contamination (fixée et non fixée) pendant et après les manipulations des opérateurs avec des détecteurs adaptés aux radionucléides utilisés. Le contrôle de la non contamination des locaux doit aussi faire l'objet d'une attention particulière.

2.2.1.2 La contamination corporelle externe

Sauf dans le cas des rayonnements alpha (et les bêta de faibles énergies), une contamination corporelle externe engendre toujours une exposition des tissus sous-jacents. Cette exposition peut même atteindre des valeurs très importantes (de l'ordre d'une dose équivalente de 19 mSv/h) pour les bêta de fortes énergies²⁸ (1 MeV). Contrairement à

²⁵ Sauf en cas de plaie ou de blessure

²⁶ Les rayons bêta cèdent leur énergie en ionisant la matière en produisant parfois des rayons X dits « de freinage » qu'il faut aussi penser à arrêter lors de la conception des locaux

²⁷ Un exemple de calcul d'épaisseur de murs pour une unité de radiothérapie est présenté en annexe 7

²⁸ L'exposition des mains doit alors être particulièrement surveillée lorsqu'on manipule une source émettrice de rayonnements

l'exposition externe à distance, celle-ci est permanente jusqu'à ce qu'elle soit éliminée. C'est pourquoi, la détection rapide d'une telle contamination suivie d'une décontamination adaptée revêtent toute leur importance.

La contamination corporelle externe est d'autant plus dangereuse qu'elle peut induire une contamination interne. En effet, par contact de doigts contaminés au nez ou à la bouche, par remise en suspension dans l'air d'une contamination non fixée des cheveux, par diffusion de la substance contaminée à travers la peau, une pénétration dans l'organisme peut se produire.

2.2.1.3 La contamination corporelle interne

La particularité de la contamination interne réside dans le fait qu'elle induise une irradiation interne permanente des tissus vivants et des organes jusqu'à ce que la substance irradiante soit éliminée de l'organisme. Ainsi, le temps d'exposition est le paramètre le plus préoccupant. Généralement, on considère qu'il faut agir au plus sous 24 heures mais au mieux dans les 6 heures après l'incorporation de la substance dans l'organisme²⁹. Les risques sont liés à l'inhalation, à l'ingestion et à la pénétration transcutanée par le biais de plaies par exemple.

Contrairement à l'exposition externe, pour laquelle le rayonnement alpha est inoffensif, pour la contamination corporelle interne, la nuisance biologique est maximale³⁰ : les particules alpha émises deviennent les plus nocives en libérant une grande quantité d'énergie très localement du fait de leur parcours très petit. Les rayonnements bêta et les photons (X et gamma) ont eux, le même effet qu'en exposition externe.

2.2.2 Les moyens de protection contre les contaminations

2.2.2.1 Cas d'une contamination surfacique

Pour éviter les contaminations surfaciques, l'espace de travail doit être préparé et contrôlé régulièrement. En particulier, lors d'emploi de radioéléments en sources non scellées, tout objet se situant dans le local de travail doit être considéré comme contaminé jusqu'au contrôle de non contamination effectué normalement après chaque manipulation. Ces contrôles peuvent être réalisés avec des appareils de détection de type sondes {alpha, bêta et gamma} mais aussi par la technique des frottis surfaciques. Cette dernière méthode, dont le rendement est faible (de l'ordre de 20%), est cependant peu utilisée en industrie en raison des aspérités présentes sur les murs en béton : on l'emploie donc essentiellement en laboratoire.

La protection contre la contamination surfacique passe donc par des contrôles réguliers de non contamination et, le cas échéant, de décontamination. En particulier, ces contrôles doivent être effectués au moins une fois par semaine dans les vestiaires et dans les zones proches de celles où l'on manipule les sources en insistant notamment sur les sols, les poignées de portes, les téléphones, les paillasses des laboratoires³¹.

bêta. C'est le cas des services de médecine nucléaire utilisant le fluor 18 pour la scintillation au TEPSCAN

²⁹ Voir schéma n° 1 en annexe 4 « Effets biologiques des rayonnements ionisants »

³⁰ Pour connaître le degré de radiotoxicité d'un produit, la réglementation précédente avait réparti les radionucléides en 4 groupes prenant en compte le métabolisme de la substance : étaient alors définies des valeurs limites annuelles d'incorporation (VLA) pour chaque radionucléide en fonction de leur radiotoxicité

³¹ C'est notamment le cas des services de médecine nucléaire

2.2.2.2 Cas d'une contamination atmosphérique

➤ Le confinement de la source

La protection collective contre l'aéro-contamination des locaux passe par un confinement des produits radioactifs volatiles. Ce confinement doit être adapté à la nature du contaminant (gaz ou aérosol), aux types de radionucléides manipulés et à la zone de travail. Ainsi, lorsque le risque de contamination atmosphérique provient d'une manipulation sur paillasse, l'utilisation d'une hotte ventilée permet un confinement dynamique. Cette technique, basée sur une aspiration de l'air extérieur vers l'intérieur de la hotte, crée un gradient de circulation d'air : la contamination est ensuite récupérée sur un filtre avant rejet dans l'environnement. Lors de l'emploi de substances très volatiles à fort coefficient de diffusion, le confinement dynamique peut être complété par un confinement statique assuré par une boîte à gants. Dans ce cas, le confinement dynamique a un double rôle : il assure une petite dépression pour palier les éventuels défauts d'étanchéité des gants à leur support mais il doit être suffisant pour qu'en cas d'accident (craquage d'un gant) l'aspiration soit suffisante pour éviter la dispersion de la contamination³².

Lorsque les substances manipulées peuvent engendrer une contamination atmosphérique à grande échelle, une ventilation des locaux doit être mise en place : généralement, une étude de hiérarchisation des confinements dynamiques est réalisée pour maîtriser au mieux les risques. Pour éviter toute propagation de la contamination dans le reste du bâtiment, le confinement dynamique doit être indépendant de la ventilation globale de l'établissement.

➤ Les protections individuelles des voies respiratoires

Il existe deux grands types d'appareils pour la protection des voies respiratoires. D'une part, les masques filtrants pour lesquels c'est le mécanisme de respiration qui assure la dépression nécessaire à la filtration de l'air ambiant. D'autre part, les masques respiratoires à adduction d'air pour lesquels l'air respiré provient d'une bouteille. Il faut cependant noter que ces types d'appareils ont un port limité (par le médecin du travail) à 2 heures et par suite, ils ne doivent être utilisés qu'en cas d'incident.

2.2.2.3 Cas d'une contamination corporelle externe

Pour se protéger d'une contamination corporelle externe, le port de gants en latex est préconisé en particulier lors de la manipulation de sources non fixées. Cette protection peut être complétée par le port d'une coiffe, d'un protège visage, de surchaussures et d'une blouse, ces deux derniers vêtements servant plus pour la protection contre la contamination des habits civils. Le port de vêtements de protection devant être adapté aux types de radionucléides manipulés et à leur mise en œuvre, la « tenue papier » très utilisée en INB l'est beaucoup moins dans les activités du nucléaire de proximité.

³² Il faut noter que l'utilisation de gants ne protège pas de l'exposition externe, en particulier vis à vis des rayonnements bêta dont le parcours est supérieur à l'épaisseur des gants. C'est le cas par exemple de l'emploi de fluor 18 dans les unités TEPSCAN des services de médecine nucléaire

2.3 Application aux activités identifiées en Champagne-Ardenne

Les voies d'exposition sont étroitement liées à la mise en œuvre des rayonnements ionisants. Ainsi, l'utilisation de générateurs électriques de rayonnement ionisant entraîne un risque d'irradiation, exposition qui prend fin dès l'arrêt de l'appareil. A l'opposé, l'utilisation de sources radioactives induit une exposition permanente mais décroissante dans le temps³³ ce qui implique un changement de sources au niveau du procédé et par suite, une augmentation de la probabilité de perte de source. A ce titre, il convient de distinguer les sources scellées, dont le risque principal engendré est l'irradiation, des sources non scellées, plutôt associées à des risques de contamination.

D'une façon générale, on constate que les activités du nucléaire de proximité industriel utilisent des générateurs électriques de rayonnement ionisant et des sources scellées dans leur procédé, induisant préférentiellement un risque d'irradiation pour les opérateurs³⁴. Pour les activités médicales, on peut distinguer deux groupes de risque suivant les services concernés :

- Le risque dominant est l'exposition externe: il s'agit de la radiologie et la radiothérapie
- Le risque principal est la contamination surfacique (fixée ou non) et la contamination interne : c'est le cas de la médecine nucléaire in vitro et in vivo

Les activités de recherche, quant à elles, mettent en œuvre les trois types de procédés et sont concernées par l'ensemble des expositions.

Les tableaux suivants synthétisent les voies d'exposition, les points critiques en terme de radioprotection et les moyens possibles pour prévenir les risques radiologiques pour chaque activité du nucléaire de proximité.

³³ L'activité de la source radioactive est reliée à l'activité nominale par : $A = A_0 \text{ Exp } (-t \cdot \ln 2 / T)$ où t représente le temps de décroissance, T la période radioactive et A_0 l'activité nominale

³⁴ Un risque de contamination peut se produire : c'est le cas de la rupture de la barrière de confinement de l'enveloppe de la source scellée

Activités industrielles recherche	Population exposée	Principales voies d'exposition	Locaux concernés par la zone contrôlée	Analyse des dangers liés à l'activité	Moyen de protection possible
γgraphe en poste fixe	Radiologues	Irradiation	Casemate	➤ Mauvaise manipulation : - Balisage mal fait - Entrée non prévue en ZCs d'un autre travailleur ou du public - Blocage de la source en position tir ➤ Vol ou perte de sources	Épaisseur de mur adaptée Asservissement porte avec tir (voyants lumineux) Maintenance appareils/suivi source Analyse de poste (optimisation)
γgraphe sur chantier extérieurs	Radiologues et public	Irradiation	Suivant balisage autour de la zone de tir obtenu par mesure		Balisage Maintenance appareils/suivi sources Plan de prévention des risques professionnels et information vis à vis des autres travailleurs Stockage sécurisé
GERIX, mini accélérateur et irradiateur alimentaire en poste fixe	Radiologues	Irradiation	Casemate	Balisage mal fait Entrée non prévue en ZCs d'un autre travailleur ou du public	Épaisseur de mur adaptée Asservissement porte avec tir (voyants lumineux) Maintenance appareils Analyse de poste pour optimisation
GERIX et mini accélérateurs mobiles	Radiologues et public	Irradiation	Suivant balisage autour de la zone de tir obtenu par mesure		Balisage Maintenance appareils Plan de prévention des risques professionnels et information vis à vis des autres travailleurs Stockage sécurisé
Jauges	Personnel de maintenance et d'exploitation	irradiation	Balisage autour de l'appareil	Balisage mal fait Manque d'information sur la présence jauge	Balisage Maintenance des appareils/suivi source Information des travailleurs
Détecteur plomb	Utilisateur	Irradiation main	Appareil	Mauvaise manipulation : main en faisceau direct Vol de l'appareil et démontage Banalisation de l'activité : utilisation par des personnes non formées en radioprotection	Stockage sécurisé Formation avant utilisation
Traceurs	Manipulateur, public et environnement	Contamination	Laboratoire, balisage extérieur et effluents	Manipulation sans protection Manque de culture en radioprotection Balisage mal fait Dispersion dans l'environnement	Manipulation sous hotte ventilée ou boîte à gants Formation Balisage adapté
Recherche en laboratoire	Manipulateur, public et environnement	Irradiation et contamination	Laboratoire et effluents	Manipulation sans protection Manque de culture de la radioprotection	Manipulation sous hottes ventilées ou boîte à gants Formation à la radioprotection

Tableau 10 : « Synthèse des voies d'exposition, des risques et des moyens de prévention dans le nucléaire de proximité industriel et de recherche »

Activités du domaine médical	Population exposée	Principales voies d'exposition	Locaux concernés par la zone contrôlée	Analyse des dangers liés à l'activité	Moyen de protection possible
Curiethérapie bas débit	Radiophysicien radiothérapeute	irradiation	Chambre protégée, laboratoire sources scellées	Perte de sources Patient = source radioactive puisqu'il porte sur lui la source scellée durant toute la durée de l'hospitalisation	Registre de traçabilité des sources Épaisseur des murs adaptée aux gamma émis Voyants lumineux quand présence patients
Curiethérapie moyen débit pulsé				Pertes de sources et blocage de la source dans le patient Entrée non souhaitée d'une personne dans la chambre d'irradiation	Registre de traçabilité des sources Épaisseur des murs adaptée aux gamma émis Asservissement voyant lumineux au tir
Curiethérapie haut débit			Blockhaus, laboratoire s.sellées	Perte ou blocage sources dans le patient Entrée non souhaitée d'une personne dans le blockhaus d'irradiation	Registre de traçabilité des sources Épaisseur des murs adaptée aux gamma émis Asservissement voyant lumineux au tir
Radiothérapie externe			Blockhaus d'irradiation	Entrée non souhaitée d'une personne dans le blockhaus d'irradiation	Épaisseur des murs adaptée aux gamma émis Asservissement voyant lumineux au tir
Médecine nucléaire	Radiopharmacien Manipulateur radiologique environnement	Irradiation des mains et contamination	Labo chaud, salle d'injection, salle caméra, salle de repos des patients	Dispersion des radionucléides dans le service Effluents des patients contaminés Déchets radioactifs Laboratoire chaud	Registre de traçabilité des sources Plan de gestion des déchets et effluents radioactifs Travail au laboratoire chaud sous boîte à gants
Scanner et angiographie numérisée	Manipulateur radiologique	Irradiation	Salle de radiologie	Entrée non souhaitée d'une personne dans la salle de radiologie Manipulation sans les protections adaptées Salle de radiologie non protégée contre les RX	Conformité à la norme NF 15-161 d'aménagement des locaux pour la radiologie médicale Tir derrière paravent plombé
Radiologie interventionnelle	Manipulateur radiologique chirurgien	Irradiation notamment des mains	Bloc opératoire	Entrée non souhaitée d'une personne dans la la salle de radiologie Manipulation sans les protections : risques infectieux important Salle de radiologie non protégée contre les RX	Tablier en plomb et paravent plombé Conformité à la norme NF 15-161 d'aménagement des locaux pour la radiologie médicale
Radiologie au bloc	Manipulateur radiologique chirurgien	Irradiation		Entrée non souhaitée d'une personne dans la la salle de radiologie Manipulation sans les protections adaptées Salle de radiologie non protégée contre les RX	
Radiologie, mammo, pano.	Manipulateur radiologique		Salle de radiologie	Manipulations sans les protections adaptées	Tablier en plomb
Radio mobiles			Chambre, couloirs	Manipulations sans les protections adaptées	Tablier en plomb et conformité norme 15-16
Rétro Alvéolaire	Dentiste		Cabinet dentaire	Manipulations sans les protections adaptées	

Tableau 11 : « Synthèse des voies d'exposition, des risques et des moyens de prévention pour le nucléaire de proximité médical »

3. Les indicateurs possibles pour hiérarchiser les activités

3.1 Pour l'exposition externe : le débit de dose

3.1.1 Les caractéristiques

En termes de radioprotection, les risques d'irradiation et de contamination peuvent être directement reliés à la dose absorbée par les tissus vivants lors d'une exposition aux rayonnements ionisants. En fait, autant pour les générateurs électriques de rayonnements ionisants que pour les sources radioactives (scellées ou non), cette dose absorbée est une grandeur aisément quantifiable à travers les mesures de débit de dose par les appareils de détection³⁵. Étant spécifique d'une zone exposée et ne prenant pas en compte les types de rayonnements (alpha, bêta, photons) mis en jeu, la radioprotection a l'habitude de transformer par le calcul la dose absorbée en dose efficace ceps entier. D'un point de vue sanitaire, la notion de dose efficace rend mieux compte des expositions comme l'a ainsi souligné le Conseil supérieur d'hygiène public de France dans son avis de décembre 1999 à l'occasion de la transcription en droit français des directives EURATOM de 1996 et 1997.

Par conséquent, la connaissance du débit de dose à différentes distances de la source radioactive permet de calculer les doses absorbées, équivalentes, efficaces et d'effectuer des comparaisons avec les seuils réglementaires. Ce débit de dose est particulièrement utile lors de la réalisation des études de poste pour estimer et optimiser les doses reçues par les travailleurs et le public.

3.1.2 Limites de l'indicateur

Ainsi, dans une démarche de hiérarchisation des risques radiologiques, les débits de dose mesurés ou estimés par les études de poste peuvent servir d'indicateurs. Cependant, il faut noter que vu la disparité des activités du nucléaire de proximité, les paramètres de mise en œuvre des rayonnements ionisants varient fortement d'une activité à l'autre et au sein d'une même activité. En effet, suivant les types de rayonnements émis, l'intensité et la tension du générateur électrique de rayonnements ionisants, l'activité de la source, le temps d'exposition, l'aménagement des locaux permettant ou non l'émission d'un rayonnement secondaire, l'appareil de détection utilisé, le volume des échantillons, le type de diffuseur... les débits de dose peuvent être totalement différents. Néanmoins, son utilisation, bien réfléchie, permet d'approcher et d'évaluer le risque de manière quantitative.

Remarque : Des exemples de mesures de débit de dose pour les GERIX médicaux sont présentés en annexe 6.

3.2 Pour l'exposition interne : les limites annuelles d'incorporation

3.2.1 Les caractéristiques

Pour quantifier l'importance d'une contamination, on se réfère généralement aux Limites annuelles d'incorporation (LAI) établies pour la plupart des radio éléments artificiels par la littérature pour les voies d'exposition « inhalation » et « ingestion ». Sachant que ces limites varient en fonction de la forme chimique des radioéléments, différents scenarii sont envisageables en termes de cas plus ou moins défavorables.

³⁵ Des photographies d'appareils de détection sont présentés en annexe photographique du mémoire

Par ailleurs, les modèles métaboliques et dosimétriques développés dans la littérature établissent, pour certains radio éléments artificiels, les fonctions de rétention et d'excrétion après incorporation par l'inhalation chez l'adulte. Ils permettent également de déterminer la dose équivalente engagée à l'organisme entier ou à des organes cibles tels que les poumons.

3.2.2 Les limites

Les remarques faites pour le débit de dose restent valables pour les limites annuelles d'incorporation puisqu'en fonction des types, des quantités manipulées et des techniques de mise en œuvre des radioéléments artificiels, les probabilités d'exposition peuvent être totalement différentes. Une attention particulière doit alors être faite pour établir le protocole de hiérarchisation des risques.

A titre d'exemple, dans un service de médecine nucléaire, activité où les risques d'irradiation et de contamination se côtoient, les deux indicateurs peuvent être employés comme le montre le tableau ci après.

REAs	Radio toxicité	Exposition externe en laboratoire chaud en mSv/h en émission gamma				Exposition interne par inhalation			
		Source nue 30cm	Flacon verre 100mL à 1m	Bécher verre 50mL contact	Seringue 5mL contact	LAI inhalation Bq/m ³	LAI ingestion Bq/m ³	Dose engagée corps entier Sv/Bq	Dose engagée poumon Sv/Bq
^{99m} Tc	faible	0.01	0.00067	2.2	13	6*10 ⁹	3*10 ⁹	8.8*10 ⁻¹²	5*10 ⁻¹¹
¹²³ I	moyen	0.018	0.001	2.6	19	2*10 ⁸	10 ⁸	7.4*10 ⁻¹¹	2*10 ⁻⁹
¹³¹ I	forte	0.029	0.0018	6.6	39	2*10⁸	10⁸	8.1*10⁻⁹	2.7*10⁻⁷
²⁰¹ Tl	faible	0.0072	0.00048	1.5	8.9	8*10 ⁸	6*10 ⁸	6.3*10 ⁻¹¹	1.7*10 ⁻¹⁰
⁶⁷ Ga	moyen	0.0087	0.00063	2.1	11	4*10 ⁸	3*10 ⁸	1.5*10 ⁻¹⁰	5.7*10 ⁻¹⁰
⁵¹ Cr	faible	0.0021	0.00014	0.45	2.8	7*10 ⁸	10 ⁹	7.1*10 ⁻¹¹	3.8*10 ⁻¹⁰
¹⁸ F	faible	0.066	0.0048	17	96	3*10 ⁹	2*10 ⁹	2*10 ⁻¹¹	1.3*10 ⁻¹⁰
Risque élevé = ¹⁸ F et ¹³¹ I						Risque élevé = ¹³¹ I			

Tableau 12 : «Expositions externe/interne par radioéléments pour un service de médecine nucléaire »

Pour l'exposition externe, les débits de dose ont été calculés à partir d'une activité nominale fixée à 37 MBq tandis que pour les limites annuelles d'incorporation, les calculs ont été ramenés à l'unité minimale (Bq/m³), libre après de convertir cette valeur avec les débits de ventilation du local.

Cet exemple montre aussi qu'un même radioélément artificiel en source non scellée peut présenter un risque faible d'irradiation, mais vue sa haute radiotoxicité et sa volatilité élevée, il peut engendrer un risque de contamination important. C'est le cas de l'iode 131. A contrario, un radioélément artificiel faiblement radiotoxique peut être à l'origine d'une exposition externe importante, comme pour le fluor 18 couplé au FDG utilisé dans les unités de TEPSCAN : l'utilisation d'un protège seringue plombé est alors nécessaire lors de l'administration du radiopharmaceutique au patient pour protéger les doigts du manipulateur radiologique.

3.3 Les résultats du suivi dosimétrique des travailleurs exposés

3.3.1 Le suivis dosimétriques effectué par l'IRSN

Si l'optimisation de la radioprotection doit être mise en œuvre au jour le jour au sein des installations par les personnes compétentes en radioprotection³⁶, au niveau national l'IRSN dispose des données d'ensemble permettant d'observer et d'analyser les niveaux d'exposition et de proposer des actions pour améliorer les conditions de travail dans les différents secteurs d'activité où les travailleurs sont exposés aux rayonnements ionisants. Ces données sont actuellement en cours de centralisation dans une base appelée SISERI qui regroupe les résultats de :

- La surveillance de l'exposition externe par dosimétrie passive X, gamma ou bêta au moyen de dosimètres portés au niveau du thorax mais aussi au poignet, aux doigts, au cou ou à l'abdomen
- La dosimétrie des neutrons rapides et thermiques
- La dosimétrie opérationnelle X, gamma par dosimétrie électronique et neutrons par dosimétrie à bulles
- La surveillance de l'exposition interne par analyses radiotoxicologiques des urines ou des selles ou encore par mesures directes d'anthropogammamétrie : ce type de suivi concerne les travailleurs qui manipulent des sources non scellées ou qui travaillent en milieu radioactif
- La carte de suivi médical A ou B : elles ne comportent pas de données dosimétriques mais elles renseignent sur l'identification du travailleur et son secteur d'activité

Au total près de 500 000 travailleurs ayant bénéficié à un moment de leur vie professionnelle d'un suivi dosimétrique ont été identifiés et les nouvelles données à collecter et à archiver chaque année concernent plus de 250 000 travailleurs dont 170 000 dans le nucléaire de proximité. Pour ce qui est de la dosimétrie opérationnelle, dont les résultats quotidiens doivent être transmis chaque semaine à l'IRSN, les quantités de données seront considérables lorsque les différents secteurs d'activité auront mis en pratique cette surveillance qui est obligatoire depuis 1999.

Tous ces travaux n'ont qu'un seul et même but, celui de garantir que l'exposition des travailleurs aux rayonnements ionisants soit aussi faible que possible et sans risque pour leur santé.

3.3.2 Les résultats publiés par l'IRSN en 2002

L'IRSN publie annuellement les résultats du suivi dosimétrique des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants. Pour l'année 2002, les résultats sont présentés ci après :

Activités du nucléaire de proximité	Nombre de travailleurs surveillés	Somme des doses en homme.Sv	Nombre de travailleurs pour lesquels Dose efficace > 20mSv/an
Médecine	110 959	7.61	29
Dentistes	24 606	0.56	1
Vétérinaires	4 098	0.13	3
Industrie classique	23 991	20.68	36
Recherche	6 994	0.12	0
Divers	4 944	0.72	0
Total	175 592	29.82	69

Tableau 13 : « Suivi des travailleurs exposés pour le nucléaire de proximité en 2002 »

³⁶ Voir le dernier paragraphe du mémoire sur les dispositions réglementaires pour la prévention des risques radiologiques

	Secteur d'activité	Nb de personnes surveillées	Répartition par intervalle de dose efficace en mSv				Doses totales (H.Sievert)
			<1	1-6	6-20	> 20	
Nucéaire de proximité	Radiologie	92 317	91 264	905	126	23	5.62
	Radiothérapie	7 383	7 233	126	22	2	0.74
	Médecine nucléaire	3 679	3 404	253	19	3	1.06
	Sources non scellées in vitro	2 812	2 804	8	0	0	0.05
	Dentaire	24 606	24 515	77	10	4	0.56
	Médecine du travail	4 768	4 752	14	0	2	0.14
	Vétérinaires	4 098	4 079	16	1	2	0.13
	Industries classiques	23 991	20 581	2 126	1 248	36	20.68
	Recherche	6 994	6 974	18	2	0	0.12
	Divers hors INB	4 944	4 795	119	27	3	0.72
INB	Centrales nucléaires EDF	10 071	16 684	2 974	413	0	11.25
	Cycle du combustible COGEMA	5 824	5 569	165	90	0	1.24
	Recherche et expertise (CEA...)	13 166	13 023	141	2	0	1.81
	Entreprises extérieures	38 348	33 572	3 405	1 366	5	23.1
Total		253 001	239 249	10 347	3 326	79	67.22

Tableau 14 : « Suivi des travailleurs exposés pour tout le nucléaire en 2002 » - Sources IRSN

Les tableaux précédents mettent en évidence un nombre très important de salariés dont la dosimétrie est inférieure au seuil de 1 mSv correspondant à la dose annuelle « public ». Il montre aussi le poids relatif des différentes activités dont la contribution aux doses est la plus importante. Ainsi, les activités du nucléaire de proximité industriel et la radiologie conventionnelle représentent les expositions totales les plus élevées avec respectivement 20.68 et 5.62 équivalent homme.Sievert, tendance que l'on retrouve pour la répartition par intervalle des doses efficaces. On note que pour ces deux activités le dépassement du seuil de 20 mSv (dose annuelle maximale tolérée par le Code du travail) s'est produit en 2002 respectivement pour 36 et 23 travailleurs.

Pour les équipements lourds mettant en œuvre des rayonnements ionisants, la grande majorité des travailleurs a reçu en 2002 des doses correspondant à la catégorie « public », le reste se répartissant par ordre décroissant dans les tranches 1-6 et 6-20 mSv. Par contre, on peut noter le dépassement du seuil 20 mSv pour cinq personnes des services de radiothérapie et de médecine nucléaire. Le personnel des laboratoires d'analyse médicale utilisant des sources non scellées in vitro, est, quant à lui, peu exposé à la vue de ces résultats dosimétriques.

Les domaines de la recherche et des activités vétérinaires semblent avoir leur majorité des expositions inférieures à 1 mSv : on note tout de même 2 dépassements du seuil de 20 mSv.

La hiérarchisation des activités par rapport au suivi dosimétrique des travailleurs pour l'année 2002 montre que les activités de radiologie médicale et industrielle sont les plus exposantes, suivies par les équipements lourds du médical. En fait, les effectifs par tranche de dose auraient dû être comparés au nombre de travailleurs classés en catégories A et B pour chaque activité pour pouvoir analyser la pertinence du classement des travailleurs par les chefs d'établissement. Il faut aussi remarquer que ces résultats sont basés sur le suivi dosimétrique des travailleurs exposés. Or, cette liste n'est probablement pas exhaustive vu que la nouvelle réglementation qui a renforcé le suivi dosimétrique a été publiée en 2002, ce qui pourrait remettre en question les constats énoncés précédemment. Par la suite, une comparaison avec des données plus récentes serait souhaitable.

3.4 Proposition de l'INVS de mise en place un suivi des doses délivrées aux patients

Un suivi des doses reçues par les patients lors des expositions médicales aux rayonnements ionisants et des pathologies potentiellement associées pourrait être mis en place prochainement. En effet, le rapport de l'INVS intitulé «Exposition aux rayonnements ionisants d'origine médicale» publié en 2004, étaye les objectifs de la mise en place d'un tel système de surveillance en soulignant l'intérêt pour l'identification des sous-populations particulièrement exposées, pour orienter les politiques de prévention et en suivre l'efficacité dans le temps et pour faciliter la production d'informations utiles aux recherches épidémiologiques.

Ce système de surveillance s'inscrira dans une démarche comparable à la base de données SISERI des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants et à ce titre, pourra servir d'indicateur pertinent pour estimer les priorités de radioprotection à l'égard des patients dans le nucléaire de proximité médical.

3.5 Importance de la typologie de mise en œuvre des rayonnements ionisants

La hiérarchisation des risques radiologiques en fonction des effets sanitaires qu'ils engendrent, peut être effectuée par l'emploi d'indicateurs mais aussi en regardant au cas par cas la mise en œuvre des rayonnements ionisants au sein des installations. Ce risque dépend notamment de la spécificité technique de l'activité, des flux du personnel, de la conception des locaux, de la probabilité de la perte ou du vol d'une source radioactive.

➤ Risques radiologiques = fonction des caractéristiques des sources

L'utilisation des rayonnements ionisants en sources scellées ou non conditionne les voies d'exposition possibles pour les groupes exposés et requiert des moyens de protection différents. Par exemple, le poste de travail d'un manipulateur utilisant des radioéléments artificiels très radiotoxiques et volatiles doit être mis sous une boîte à gants. L'irradiation par gammagraphie en poste fixe avec un GMA 2500 quant à elle nécessite un blockhaus d'irradiation.

➤ Risques radiologiques = fonction du flux de personnes dans l'installation

La notion de flux de personne est très importante dans l'évaluation des risques radiologiques tant au-niveau des expositions externes que les expositions internes. En effet, plus les travailleurs sont nombreux dans une installation, plus le risque est fort : des consignes de sécurité et des plans de prévention doivent permettre d'y remédier et d'informer le personnel sur les dangers encourus. D'autre part, les déplacements favorisent la dispersion des radionucléides en cas de contamination : la mise en dépression et la ventilation des locaux sont des moyens de prévention possibles.

➤ Risques radiologiques = fonction de la mobilité des appareils

Les risques d'accidents radiologiques augmentent avec la mobilité des appareils : ainsi, la réglementation spécifique aux transports des matières radioactives doit être respectée. C'est le cas, par exemple, du transport des gammagraphes d'un chantier à un autre, des livraisons des radionucléides pour les laboratoires, des transports des déchets radioactifs.

➤ Risques radiologiques = fonction de la superpositions des autres risques

La superposition des risques dans une installation accroît leur probabilité : les moyens de protection ne peuvent être adaptés à tous les risques à la fois et un compromis doit nécessairement s'opérer. C'est le cas par exemple du port des bagues thermoluminescentes en radiologie interventionnelle qui, outre la gêne qu'elles occasionnent quant à la précision du geste chirurgical, peuvent accroître le risque infectieux.

Les résultats du suivi dosimétrique permettent de classer les domaines « médecine » et « d'industries classiques » comme des activités pour lesquelles les doses délivrées aux travailleurs sont particulièrement élevées. Conjointement, les visites de terrain et les diverses études bibliographiques montrent que parmi ces deux activités, la gammagraphie et les unités de médecine nucléaire sont deux problématiques particulièrement sensibles en matière de radioprotection.

4. Deux problématiques particulièrement sensibles pour la radioprotection

4.1 La gammagraphie

4.2.1 Bilan des incidents en France

Le bilan des incidents a régulièrement été tenu à jour en France par l'OPRI et est actuellement actualisé par l'IRSN. En matière de gammagraphie, cet office distinguait deux grandes catégories d'incidents, la première relative à des dysfonctionnements ou à des erreurs de manipulation de gammagraphes, la seconde concernait les pertes et les vols d'appareils. En 26 ans³⁷, l'OPRI a dénombré 87 incidents pour la première catégorie et 17 pour la seconde.

4.2.2 Principales causes des dysfonctionnements et des mauvaises manipulations

Parmi les points critiques en terme de radioprotection, le blocage de la source à l'extérieur de l'appareil après le tir de radiologie est l'un des dysfonctionnements les plus courants et les plus dangereux. La maintenance des appareils et des accessoires est primordiale pour prévenir ce d'accident.

Par ailleurs, une étude ergonomique sur la gammagraphie réalisée par EDF en 2002 confortée par un rapport de l'UNSCEAR montre que les principales causes d'accidents en gammagraphie sont liées à :

- L'individu : la gammagraphie s'effectue souvent de nuit avec des phases de micro sommeil, de façon répétitive (routine) et dans des conditions de pénibilité notamment au niveau de la posture de travail, ce qui réduit la vigilance des opérateurs
- L'équipement : des problèmes de maintenance et de matériel adapté nuisent à la sécurité des travailleurs
- L'environnement de travail : les postes de travail sont souvent d'accès difficiles, l'éclairage est souvent défaillant

³⁷ De 1975 à 2000

- L'organisation de la radioprotection : le balisage des zones contrôlées est souvent absent, la personne compétente en radioprotection n'élabore pas les consignes de sécurité et ne dispense pas la formation nécessaire
- Le suivi des sources radioactives est souvent mal effectué

4.2.2 Conséquences de la perte ou d'un vol de source radioactive

Des pertes de sources et des vols de sources peuvent se produire, induisant des conséquences sanitaires non seulement sur les travailleurs exposés mais aussi sur le public. En effet, lorsqu'une source est ramassée sur un chantier par un opérateur et que celui-ci la ramène chez lui, une irradiation du public est possible. A ce titre, citons deux exemples d'accidents radiologiques :

➤ L'accident de Sétif en Algérie en 1978

Le 5 mai 1978, une source d'iridium 192 de 1 TBq tombe d'un camion sur la route reliant Alger à Sétif. Elle est retrouvée deux jours plus tard par deux enfants de 3 et 7 ans qui la manipulent pendant quelques heures. 3 semaines plus tard, la grand-mère confisque la source et la ramène à son domicile. Toute la famille sera exposée pendant près de 6 semaines. Le débit de dose est estimé à 70 mGy/h à 1 mètre. Les expositions sont de type externe prolongé et la gravité est fonction du temps de séjour dans la maison et de la distance par rapport à la source. L'estimation des doses corps entier varie de 11 à 25 Gy : la grand-mère décédera.

➤ L'accident de Yanango au Pérou en 1999

Dans l'après-midi du 20 février 1999, à la centrale hydroélectrique de Yanago, un ouvrier soudeur ramasse un petit objet brillant et le met dans la poche arrière de son pantalon. Il continue son travail pendant environ 6 heures (temps d'exposition). Le soir, il constate une rougeur douloureuse sur sa cuisse droite. Dans la soirée, l'équipe qui a en charge de vérifier les soudures à l'aide de la gammagraphie s'aperçoit de la disparition de la source. 10 heures après le début de l'exposition, l'équipe arrive au domicile de l'ouvrier qui est immédiatement transporté à l'hôpital. 4 jours après l'accident, les lésions de type brûlures au 1^{er} degré occupent déjà une zone de 4 cm de diamètre. Les lésions s'aggravent au cours du premier mois. Le patient présente une lésion grave et nécrotique de 10 cm avec une perte de substance de 2 cm de profondeur : il décédera en 2001. L'exposition est de type externe localisée aiguë (25 Gy au nerf sciatique et 15 Gy à l'artère fémorale).

Compte tenu des risques engendrés par l'utilisation de gammagraphes, une attention particulière doit être faite sur cette activité en termes de radioprotection. Les études de postes étant des outils d'optimisation des doses trop souvent absents des pratiques de la gammagraphie, les contrôles de radioprotection pourront vérifier leur mise en œuvre ainsi que le suivi des sources radioactives. A ce titre un exemple d'étude de poste est donné en annexe 8.

4.2 Les services de médecine nucléaire

4.2.1 Les caractéristiques

Compte tenu de la présence simultanée des risques d'irradiation, notamment des mains et des doigts des radiopharmaciens et des manipulateurs radiologiques, et des diverses contaminations, les services de médecine nucléaire doivent, dès la conception des locaux, choisir du matériel spécifique en terme de radioprotection. Une attention particulière doit aussi être faite pour la réalisation des diverses procédures afin d'organiser, en toute

sécurité, le bon fonctionnement de l'unité, en particulier, au niveau des frontières entre les zones chaudes et les zones froides. Les divers documents assurant la traçabilité des sources radioactives ainsi que la gestion des déchets et des effluents radioactifs sont des problématiques qui présentent un vif intérêt pour éviter les dispersions des radionucléides.

4.2.2 Le matériel spécifique

Compte tenu des caractéristiques des radioéléments manipulés en service de médecine nucléaire, l'utilisation d'enceinte blindée de stockage et de manipulation, de protèges seringue plombés, de poubelles blindées pour les déchets radioactifs sont obligatoires. Pour pouvoir se contrôler, le personnel doit avoir à sa disposition des détecteurs de contamination adaptés aux radionucléides utilisés ainsi que des activimètres. Des études d'estimation des volumes de déchets produits doivent être réalisées et le local de stockage des déchets doit contenir des conditionnements adaptés aux radioéléments présents : mise en place de rayonnages, de bacs de rétention, de matériels de contrôle de la radioactivité. Une réflexion sur la hiérarchisation de la dépression des locaux (laboratoire chaud, salle d'injection, salle de repos du patient, salle de détection) doit être mise en place ainsi que des ventilations adaptées aux différentes salles de l'unité.

4.2.3 La traçabilité

Plusieurs registres doivent être tenus pour s'assurer de la bonne gestion et du suivi des sources, des déchets et des effluents. En particulier, des registres comptabilisant :

- Les mouvements de sources radioactives réceptionnées et utilisées dans le service
- Les déchets solides radioactifs produits en mentionnant pour chaque sac, la nature, l'activité à la date de mise en dépôt dans le local de stockage, la date d'élimination, l'activité résiduelle à cette date et le devenir final des déchets
- Les effluents liquides en indiquant pour chaque cuve de stockage, les dates de mise en service, les dates de fin de remplissage et de vidange ainsi que les dates des contrôles périodiques de l'activité des effluents
- Les résultats des contrôles de radioprotection

4.2.4 L'organisation du service

Pour assurer la radioprotection du personnel médical mais aussi des patients et des visiteurs, une réflexion approfondie doit être conduite pour éviter les risques de contamination. Notamment, les conditions de prise en charge des patients, les dispositions retenues pour les accès en zone contrôlée et zone surveillée, la gestion du flux de circulation des personnes dans les différentes salles du service, la réception et l'utilisation des radioéléments, doivent faire l'objet de consignes écrites. La personne compétente en radioprotection doit assurer des formations en matière de radioprotection et mettre en place des protections adaptées aux différents postes de travail. Une attention particulière doit être réalisée sur le risque d'exposition des mains et des doigts des radiophysiciens et des manipulateurs radiologiques, notamment lors de l'emploi de l'iode 131 et du fluor 18.

Pour s'assurer du respect des prescriptions réglementaires en termes de radioprotection, les divers contrôles de l'ASN interviennent tout au long de la mise en œuvre des rayonnements ionisants par les établissements du nucléaire de proximité, assurant ainsi, une gestion du risque radiologique avec les divers acteurs concernés.

5 La gestion du risque radiologique par l'inspection de la radioprotection

5.1 Dispositions réglementaires pour la prévention du risque radiologique

Les dispositions relatives à la protection du personnel dans les établissements mettant en œuvre des rayonnements ionisants, sont encadrées par le décret n° 2003-296 du 31 mars 2003, codifié à la section 8 du chapitre 1 du Code du travail.

Ce texte renforce la responsabilité du chef d'établissement à l'égard de la radioprotection pour qu'il donne des moyens à la personne compétente en radioprotection de réaliser ses missions. Une attention particulière est aussi donnée à l'évaluation des risques radiologiques et des mesures à mettre en œuvre. On peut notamment citer : la délimitation des zones, le classement des travailleurs, l'importance de la personne compétente en radioprotection, le suivi des sources.

5.1.1 La délimitation des zones et le classement des travailleurs exposés

5.1.1.1 La délimitation des zones

Le chef d'établissement doit définir des zones spécialement réglementées pour des raisons de radioprotection dès lors que l'exposition de son personnel est susceptible de dépasser une dose efficace annuelle de 1 mSv et des doses équivalentes supérieures à $1/10^{\text{ème}}$ des limites annuelles admissibles pour des expositions professionnelles fixées dans le décret du 31 mars 2003³⁸.

5.1.1.2 Les zones surveillées

Ce sont des zones pour lesquelles, en conditions normales de travail, l'exposition du personnel est susceptible de dépasser une dose efficace annuelle de 1mSv tout en restant inférieure à 6mSv ou de dépasser une dose équivalente supérieure à $1/10^{\text{ème}}$ des limites annuelles admissibles tout en restant inférieure à $3/10^{\text{ème}}$ de ces limites.

5.1.1.3 Les zones contrôlées

Ce sont des zones à accès réglementé pour lesquelles, en conditions normales de travail, l'exposition du personnel est susceptible de dépasser une dose efficace annuelle de 6 mSv tout en restant inférieure à 20 mSv ou bien de dépasser une dose équivalente supérieure à $3/10^{\text{ème}}$ des limites annuelles admissibles.

Dès lors qu'un travailleur est susceptible d'intervenir dans une zone surveillée ou une zone contrôlée, des consignes de radioprotection doivent être mises en place notamment :

- Une formation renouvelée tous les trois ans sur les effets potentiels des rayonnements ionisants et les moyens de protection
- L'employeur doit lui remettre une notice rappelant les risques liés au poste de travail occupé et les règles de sécurité à suivre
- Un suivi dosimétrique adapté à la zone d'intervention : ainsi, en zone surveillée, le port d'une dosimétrie passive (film photographique) individuelle et nominative est obligatoire. Cette dosimétrie passive doit être complétée en zone contrôlée par une dosimétrie opérationnelle

³⁸ Article R 231-81 du Code du travail

Délimitation des zones	Dose efficace en mSv/an	Dose équivalente / limites annuelles en mSV/an	Dosimétrie
Zone contrôlée	Entre 6 et 20	$> 3/10^{\text{ème}}$ mais $< 20\text{mSV}$	Passive et opérationnelle
Zone surveillée	Entre 1 et 6	Entre $1/10^{\text{ème}}$ et $3/10^{\text{ème}}$	Passive
Zone non réglementée	< 1	$< 1/10^{\text{ème}}$	

Tableau 15 : « Limites des doses réglementaires pour les zone contrôlée et zone surveillée »

Une fois délimitées, ces zones doivent être bien individualisées, clairement signalées et former un ensemble cohérent : la délimitation des zones engendre aussi l'élaboration de consignes de sécurité spécifiques réalisées par la personne compétente en radioprotection

5.1.1.2 Le classement des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants

Le tableau suivant présente les 3 types de classement possible pour les travailleurs d'un établissement mettant en œuvre des rayonnements ionisants.

Classement des travailleurs	Dose efficace en mSv/an	Dose équivalente / limites annuelles en mSv/an
A	Entre 6 et 20	$> 3/10^{\text{ème}}$ mais $< 20\text{mSv}$
B	Entre 1 et 6	Entre $1/10^{\text{ème}}$ et $3/10^{\text{ème}}$
Non classé = public	< 1	$< 1/10^{\text{ème}}$

Tableau 16 : « Classement des travailleurs et limites des doses réglementaires associées »

En fait, seules, les études de postes menées conjointement par le chef d'établissement et la personne compétente en radioprotection avec l'avis du CHSCT peuvent conduire à la délimitation des zones et au classement des travailleurs dans l'une ou l'autre des catégories. Lorsque ce choix est réalisé le suivi dosimétrique adapté doit se mettre en place avec la communication des données au médecin du travail et à l'IRSN.

5.1.2 Les rôles de la personne compétente en radioprotection

Une personne compétente en radioprotection (ou, le cas échéant, un service compétent en radioprotection), doit être désigné dans tout établissement soumis au Code du travail dès lors qu'il y a mise en œuvre de rayonnements ionisants. C'est l'employeur qui procède à cette désignation en vertu de l'article 231-106 du Code du travail. Cette désignation doit être explicite et formelle puisque le nom de la personne compétente en radioprotection doit être porté à la connaissance des travailleurs intéressés et mentionnés sur les formulaires administratifs qui le prévoient.

La personne compétente en radioprotection, qui doit être formée par un organisme accrédité ou par des personnes certifiées³⁹, joue un rôle important dans l'évaluation des risques radiologiques et dans l'optimisation des doses reçues par les travailleurs de l'établissement : son rôle est à la fois administratif, technique et pédagogique. Ainsi, elle agit sous la responsabilité de l'employeur notamment en:

³⁹ Cf. l'arrêté du 29 décembre 2003 relatif aux modalités de formation de la personne compétente en radioprotection et de la certification du formateur

➤ Réalisant les études de poste des travailleurs exposés

Pour que les expositions collectives et individuelles soient maintenues aussi bas qu'il est raisonnablement possible (en dessous des limites réglementaires), la personne compétente en radioprotection identifie les sources, les voies et les personnes exposées et caractérise le danger en fonction des matériels, des procédés utilisés et de l'organisation des postes de travail. Elle évalue notamment les doses individuelles et collectives avant toute opération impliquant un risque d'exposition pour le personnel : à ce titre, elle a accès aux données dosimétriques individuelles.

➤ Définissant les mesures de protection adaptées à mettre en œuvre en fonction des études de poste

Ces mesures doivent être adaptées aux types d'exposition des travailleurs et la personne compétente en radioprotection doit s'assurer de leur mise en application. Pour pouvoir pleinement jouer son rôle, la personne compétente en radioprotection doit avoir accès aux procédures administratives liées à la radioprotection pour les valider et les décliner à l'échelle des travailleurs.

➤ Recensant les situations ou les modes de travail susceptibles de justifier une exposition subordonnée à la délivrance de l'autorisation spéciale

Il s'agit des demandes de dérogation dans certaines conditions aux valeurs limites d'exposition.

➤ Définissant les moyens nécessaires requis en cas de situation anormale

La personne compétente en radioprotection doit élaborer un plan d'intervention en cas d'accident, être apte à le mettre en œuvre et prendre les premières mesures d'urgence.

➤ Participant à la formation à la sécurité des travailleurs exposés

➤ Réalisant les contrôles techniques d'ambiance mensuels

➤ Participant à la délimitation des zones (surveillée et contrôlée) avec le chef d'établissement

5.2 La gestion du risque radiologique par l'inspection de la radioprotection

5.2.1 Les régimes d'autorisations et des déclarations des activités

5.2.1.1 Les activités industrielles et de recherche

Les activités industrielles et de recherche sont soumises à autorisation délivrée au titre du ministère de la santé, sauf dans les cas d'exemption définis par l'article R. 1333-27 du Code de la santé publique. Cette autorisation, dont la durée maximale de validité est fixée à 5 ans renouvelables, est délivrée personnellement au responsable de l'installation qui ne peut la transférer.

Nature de l'activité	Procédure et autorité compétente	Observations
Fabrication de sources radioactives ou d'appareils en contenant	Autorisation du ministre chargé de la santé via la DGSNR	Sauf si l'activité nucléaire est classée dans les rubriques 1700-1721 de la nomenclature ICPE au-dessus du seuil de déclaration préfectorale
Fabrication de produits ou dispositifs contenant des sources radioactives		
Utilisation de sources radioactives		
Utilisation de GERIX et des accélérateurs de particules	Autorisation du ministre chargé de la santé via la DGSNR	Exemption possible si les critères fixés à l'article R. 1333-27 sont respectés
Import /export de sources radioactives ou d'appareils en contenant		
Distribution de sources radioactives ou appareils en contenant		Exemption possible si les critères fixés à l'article R. 1333-27 sont respectés

Tableau 17« Procédures administratives pour le nucléaire de proximité industriel et de recherche »

Des critères d'exemption à ces procédures s'appliquent :

- Pour les radionucléides, si les quantités totales mises en jeu ou leur concentration par unité de masse sont inférieures aux seuils fixés en annexe du décret n° 2002-460 du 4 avril 2002 pour autant que la masse totale ne dépasse pas 1 tonne
- Pour les GERIX, s'ils sont de type certifié conforme aux normes et ne créent, en fonctionnement normal, en aucun point situé à une distance de 0.1 m de leur surface accessible, un débit de dose équivalente supérieur à 1µSv/h, ou s'il s'agit d'appareils fonctionnant sous une différence de potentiel inférieure ou égale à 30 kV sous les mêmes conditions de limite de débit de dose équivalent

Par ailleurs, la CIREA, qui était chargée de donner son avis sur les questions relatives aux radioéléments artificiels jusqu'en 2002 avait fixé, pour les activités soumises à autorisation, des Conditions particulières d'emploi (CPE) destinées à informer le futur titulaire de cette autorisation des conditions d'application de la réglementation dans le domaine d'activité concerné. Dans l'attente de la parution d'un texte d'une portée au moins équivalente, les CPE sont toujours en vigueur conformément au Code de la santé publique.

5.2.1.2 Les activités radiologiques et biomédicales

Contrairement aux activités industrielles et de recherche pour lesquelles seule la procédure d'autorisation existe, les activités médicales sont soumises suivant leurs spécificités soit au régime d'autorisation, soit à la déclaration⁴⁰.

Activité visée dans le code de la santé publique	Type d'installations	Procédure applicable	Article du CSP
Utilisation de GERIX médicaux à des fins de diagnostic hors équipements lourds	Radiologie conventionnelle médicale et dentaire	Déclaration en DSNR	R. 1333-22
Équipements lourds ⁴¹	Scanners, angiographie numérisée	Autorisation DGSNR	R. 1333-24
Détention et utilisation de REAs ou de produits et appareils en contenant	Médecine nucléaire, téléthérapie, curiethérapie	Autorisation DGSNR	
Utilisation de radiothérapie	Accélérateurs de particules	Autorisation DGSNR	

⁴⁰ La procédure de déclaration se substitue à celle de l'agrément mise en place par l'arrêté du 23 avril 1969 anciennement délivré par les médecins inspecteurs de santé publique des DRASS

⁴¹ Ces installations sont désormais soumises à une autorisation d'utilisation au titre de la réglementation de la radioprotection qui s'ajoute à cette délivrée en application de la procédure des équipements matériels lourds des ARH : voir partie 1 du mémoire

Tableau 18 : « Procédures administratives pour les activités du nucléaire de proximité médical »

Outre les contrôles de ces procédures, divers contrôles périodiques doivent être réalisés en fonction des installations.

➤ Pour les GERIX médicaux et dentaires

Nature des contrôles	Code de la santé publique Art. R. 1333-7 à R. 1333-43 Contrôle de l'organisation et des dispositifs techniques	Code du travail Art. R 231-84 Contrôles des sources et des appareils, des protections, des alarmes, des mesures
Contrôle de réception dans les établissements		Personne compétente en radioprotection, IRSN ou organismes agréés
Contrôle avant la mise en service	GERIX médicaux : organismes agréés	
Après dépassement des limites d'exposition public ou travailleur	DSNR	Inspection du travail et/ou DSNR
Mise en demeure	DSNR	
Après modification	Installation de radiologie : organismes agréés	Personne compétente en radioprotection, IRSN ou organismes agréés
Périodique		
Contrôle d'ambiance en zone réglementaire		

Tableau 19 : « Les différents contrôles opérés au titre du CSP ou du CT pour les GERIX »

➤ Pour les unités de radiothérapie et de médecine nucléaire

Nature des contrôles	Code de la santé publique Art. R. 1333-7 à R. 1333-43 Contrôle de l'organisation et des dispositifs techniques	Code du travail Art. R 231-84 Contrôles des sources et des appareils, des protections, des alarmes, des mesures
Contrôle de réception dans les établissements		Personne compétente en radioprotection, IRSN ou organismes agréés
Contrôle avant la mise en service	DGSNR	
Après dépassement des limites d'exposition public ou travailleur	DGSNR ou DSNR	Inspection du travail et/ou DSNR et/ou DGSNR
Mise en demeure	DSNR	
Après modification	DGSNR	Personne compétente en radioprotection, IRSN ou organismes agréés
Périodique	DSNR ou DGSNR	
Contrôle d'ambiance en zone réglementaire		
Cessation d'activité : contrôle du devenir des sources scellées	DGSNR et DSNR	

Tableau 20 : « Les différents contrôles opérés au titre du CSP et du CT pour la radiothérapie et la médecine nucléaire »

5.2.1.3 Les mouvements de sources et inventaire

Tout mouvement de sources radioactives doit faire l'objet d'un enregistrement à l'IRSN conformément aux prérogatives du Code de la santé publique.

Nature du mouvement de sources radioactives	Article du Code de la santé publique
Cession / acquisition de radionucléides sous forme scellée ou non	R. 1333-46 et R. 1333-47
Importation et exportation de radionucléides de statut communautaire	R. 1333-46 et R. 1333-48
Importation et exportation de radionucléides de statut non communautaire : enregistrement préalable au 1 ^{er} Becquerel	R. 1333-49
Suivi permettant de connaître à tout moment l'inventaire des produits détenus et un relevé trimestriel des livraisons doit être adressé par le fournisseur à l'IRSN	R. 1333-50

Tableau 21 : « Nature des mouvements de sources nécessitant un enregistrement à l'IRSN »

Le suivi des sources radioactives est un élément important pour la radioprotection puisqu'une perte de source peut être à l'origine d'incidents radiologiques. Il est donc souhaitable que ce thème soit repris lors des contrôles de la DSNR.

5.3 La coordination des différents acteurs pour gérer le risque radiologique

Conjointement à la phase de repérage des activités du nucléaire de proximité, la DSNR de Châlons en Champagne a démarré la mise en place de la gestion du risque radiologique. Dans un premier temps, cette démarche a consisté à présenter aux différents acteurs institutionnels locaux les nouvelles missions de l'ASN en matière de radioprotection, les enjeux et les problématiques associés, ainsi que les modalités de travail et d'informations réciproques avec les autres entités concernées.

Dans ce cadre, la cellule «radioprotection » de la DSNR a rencontré les acteurs de santé publique (ARH, DRASS, DDASS), l'Inspection du travail (DRTEFP, inspections du travail de l'agriculture et des transports), l'inspection des Installations Classées (DRIRE), un organisme de prévention (CRAM), ainsi qu'un organisme de contrôle technique agréé. Dans un climat d'entente administrative, et non de partage des responsabilités, des axes de collaboration ont pu émerger pour favoriser une gestion efficace et coordonnée des risques.

Ainsi, des inspections conjointes avec les inspecteurs du travail et les inspecteurs des installations classées ont déjà été réalisées (cimenterie CALCIA, fabrique de craie OMYA). Un groupe de travail ARH-DSNR relatif à la gestion globale des risques en milieu hospitalier a pu être mis en place. Parallèlement, ces deux entités ont rédigé et cosigné une lettre-circulaire qui explique les nouvelles procédures d'autorisation au titre du ministre de la santé, pour l'acquisition et l'utilisation des équipements lourds. Par ailleurs, des actions de sensibilisation des industriels sont menées et un groupe de travail CRAM-DSNR doit définir les modalités d'intégration des dangers des rayonnements ionisants dans le document unique⁴² des entreprises. Une collaboration a aussi pu être établie avec l'échelle nationale puisque des visites de repérage croisées avec les inspecteurs des Sous-directions SD1 et SD9 de la DGSNR sont planifiées et des contacts avec l'unité de suivi des sources radioactives de l'INRS sont également organisés.

⁴² Le document unique est demandé par le décret 2001-1016 du 5 novembre 2001 qui a introduit l'article suivant dans le code du travail : Art. R. 230-1. - L'employeur transcrit et met à jour dans un document unique les résultats de l'évaluation des risques pour la sécurité et la santé des travailleurs à laquelle il doit procéder en application du paragraphe III (a) de l'article L. 230-2. Cette évaluation comporte un inventaire des risques identifiés dans chaque unité de travail de l'entreprise ou de l'établissement.

CONCLUSION

Le repérage du parc du nucléaire de proximité en région Champagne-Ardenne montre d'une part, la grande diversité des activités mettant en œuvre des rayonnements ionisants, d'autre part, la complexité des problématiques de protection et de gestion des risques radiologiques en fonction des voies d'exposition et des différentes populations exposées. A ce titre, une attention particulière doit être faite vis à vis des travailleurs, puisque, outre les cas d'exposition aiguë, pouvant engendrer des effets sanitaires parfois très graves, ces personnes sont soumises à des expositions chroniques, pouvant dépasser les seuils réglementaires. Un moyen efficace d'optimisation des doses reçues est la réalisation systématique d'études des postes de travail.

Ce repérage montre aussi qu'une distinction doit être effectuée au niveau des problématiques du nucléaire de proximité industriel et médical. En effet, l'emploi de sources non scellées dans le nucléaire de proximité industriel étant limité, le risque sanitaire principal est celui de l'irradiation externe par les sources scellées émettrices de rayonnements gamma. A cet égard, une attention particulière sera apportée à la gammagraphie industrielle, technique à l'origine de plusieurs accidents radiologiques. A contrario, la radioprotection dans les établissements de santé ne peut être totalement identifiée à celle développée dans les unités industrielles en raison, d'une part, des types de radioéléments utilisés, de leurs modalités de manipulation, des rejets générés, de la spécificité des générateurs électriques X utilisés, d'autre part, par la présence du risque infectieux. En effet, la radioprotection dans les activités médicales nécessite une démarche globale d'évaluation et de gestion des risques pour répondre efficacement aux problématiques de santé publique.

Pour hiérarchiser ces diverses activités en fonction des risques sanitaires qu'elles sont susceptibles d'engendrer, l'utilisation d'indicateurs de danger ou d'études statistiques sur le suivi des travailleurs exposés, peuvent être des moyens pertinents pour dégager des tendances sanitaires. Par contre, lors des contrôles de radioprotection, les analyses des risques devront être faites au cas par cas, en s'adaptant non seulement à la spécificité technique de l'activité mais aussi à sa mise en œuvre dans l'établissement. Ainsi, afin de mieux appréhender les gestions du risque radiologique, des visites conjointes avec d'autres inspecteurs régaliens, ou des actions de sensibilisation sont planifiées par la DSNR.

La mission repérage en région Champagne-Ardenne étant bien avancée, la DSNR prévoit de démarrer celle de la région Picardie à l'automne 2004.

BIBLIOGRAPHIE

Articles de périodiques

VISSEAU H., VUILLEZ J.-P., GIRAUD J.-Y. *Etude dosimétrique et optimisation de la radioprotection en scintigraphie au ^{18}F -FDG*. Médecine nucléaire – Imagerie fonctionnelle et métabolique, 2004, Vol.28, n°5, pp. 205-217

VINCENT R., BONTHOUX F. et al. *Méthodologie d'évaluation simplifiée du risque chimique : un outil d'aide à la décision*. Cahiers de notes documentaires – Hygiène et sécurité du travail, 2^{ème} trimestre 2004, n°195, pp. 7-30

ASN. Contrôle – Le contrôle de l'utilisation des rayonnements ionisants. *La revue de l'Autorité de sûreté nucléaire*, Novembre 2001, n°143, pp. 33-97

ASN. Contrôle – La radioprotection des patients. *La revue de l'Autorité de sûreté nucléaire*, Octobre 2002, n°148, pp. 41-91

ASN. Contrôle - La radioprotection des travailleurs. *La revue de l'Autorité de sûreté nucléaire*, Mai 2004, n°158, pp. 35-105

FRITSCH P., LEGALL B.. Le comportement biologique des toxiques nucléaires - Toxicologie radiologique et chimique. *Clefs CEA*. Été 2003, n°48, pp. 19-82

Ouvrage papier

ASN. *La sûreté nucléaire et la radioprotection en France en 2003*, Paris, Mars 2003, 481 pp.

BOURGUIGNON M., PIRARD P et al. *Exposition aux rayonnements ionisants d'origine médicale – Proposition pour la mise en place et le développement d'activité de surveillance épidémiologique en population générale*. Paris: INVS, 2002, 61 pp.

DGSNR SD7. *Priorités en radioprotection* – Proposition pour une meilleure protection des personnes contre les dangers des rayonnements ionisants. Paris : ASN, mars 2004, 85 pp.

DELACROIX D., GUERRE J.-P, LEBLANC P. *Radionucléides et radioprotection - Guide pratique pour la manipulation de substances radioactives dans les laboratoires de faible et moyenne activité*. 4^e ed Saclay : CEA, 2004

DUGRILLON D. *Eléments de radioprotection n°1 – Notion de physique atomique*. 2^e ed Orléans : CRAM du centre service prévention des risques professionnels, 1996. 56 pp.

DUGRILLON D. *Eléments de radioprotection n°2 –Grandeurs et unités de mesure utilisées en radioprotection*. 2^e ed Orléans : CRAM du centre service prévention des risques professionnels, 1996. 16 pp.

DUGRILLON D. *Eléments de radioprotection n°3 –Radioprotection et personne compétente en radioprotection*. Orléans : CRAM du centre service prévention des risques professionnels, 1996. 28 pp.

DUGRILLON D. *Eléments de radioprotection n°4 – Base de la radioprotection*. Orléans : CRAM du centre service prévention des risques professionnels, 1996. 30 pp.

DUGRILLON D. *Eléments de radioprotection n°5 – Radioexposition externe*. Orléans : CRAM du centre service prévention des risques professionnels, 1996. 30 pp.

DUGRILLON D. *Eléments de radioprotection n°6 – Effets des radiations ionisantes sur l'organisme humain*. Orléans : CRAM du centre service prévention des risques professionnels, 1996. 24 pp.

GAMBINI D.-J., GRANIER R. *Manuel pratique de radioprotection*. 2^e ed Paris : technique et documentation, 1997, 482 pp.

IPSN. *Rapport d'activité 2001 de l'Institut de protection et de sûreté nucléaire - Département de protection de la santé de l'homme et de dosimétrie*. Fontenay aux Roses : IPSN, Août 2002, 151 pp.

PICHONNEAU A. *Les travailleurs dans le domaine de la gammagraphie industrielle : situation normale et situation accidentelle – Effets biologiques et dosimétrie*. Paris : Conservatoire national des arts et métiers département des sciences nucléaires, Juin 2003, 50 pp.

TUBIANA M., LALLEMAND J. *Radiobiologie et radioprotection*. Que sais-je, Mai 2002, 125 pp.

VIDAL J.-P. *Principes généraux et dispositions opérationnelles de radioprotection*. Paris : ASN, Septembre 2003, 41 pp.

Autres types de documentation

- Procès verbaux des contrôles techniques des organismes agréés en radioprotection
- Rapports d'inspection de la DGSNR-SD1, SD9 et autres DRIRE
- Dossiers de demande d'autorisation de la DGSNR-SD1 et SD9
- Rapports de mise en service des équipements lourds au titre de la demande d'autorisation DGSNR-SD9
- Dossiers d'agrément pour les GERIX médicaux
- SROS et CROSS des DRASS et DDASS

Réglementation

- **Code de la santé publique : « Protection de la population »**

Partie	Thème
Législative	➤ Principes généraux de la radioprotection : L. 1333-1 à L. 1333-20 ➤ Sanctions pénales : L. 1336-5 à L. 1336-9 ➤ Contrôle technique et administratif : L. 1421-1 à L. 1421-6
Réglementaire	➤ Mesures générales de protection de la population : R. 1333-1 à 54 ➤ Régime général des autorisations et déclarations : R. 1333-17 à R. 1333-20, R. 1333-21 à R. 1333-30, R. 1333-26 à R. 1333-28 et R. 1333-29 à R. 1333-51 ➤ Disposition, suivi reprise et élimination des sources radioactives : R. 1333-52 à R. 1333-53 ➤ Contrôle : R. 1333-54 ➤ Protection de personnes exposées à des rayonnements ionisants à des fins médicales ou médico-légales : R. 1333-55 à R. 1333-74 ➤ Situations d'urgence radiologique et d'exposition durable aux rayonnements ionisants : R. 1333-75 à R. 1333-93

- **Code de la santé publique : « Contrôle des dispositifs médicaux »**

Partie	Thème
Législative	➤ Matéiovigilance : L. 5212-1 et L. 5212-2
Réglementaire	➤ Champ d'application, définitions et mise en œuvre de l'obligation de maintenance et du contrôle des dispositifs médicaux : D. 665-5-1 à D. 665-5-12

➤ **Code du travail : « Protection des travailleurs »**

Partie	Thème
Législative	➤ Dispositions propres au travail temporaire : L. 122-3-17 et 124-22 ➤ Réglementation du travail, sécurité et conditions de travail, dispositions générales : L. 231-1 à L. 231-7-1
Réglementaire	➤ Champs d'application et principes de radioprotection : R. 231-73 à R. 231-80 ➤ Règles techniques d'aménagement des locaux de travail : R. 231-81 à R. 231-87 ➤ Règles applicables aux travailleurs exposés aux rayonnements ionisants : R. 231-88 à R. 231-97 ➤ Mesures des surveillances médicales des travailleurs exposés : R. 231-98 à R. 231-102 ➤ Règles concernant les situations anormales de travail : R. 231-103 à R. 231-105 ➤ Organisation fonctionnelle de la radioprotection : R. 231-106 à R. 231-113

➤ **Décrets**

- Décret n°2002-460 du 4 avril 2002 relatif à la « Protection des personnes contre les dangers des rayonnements ionisants »
- Décret n°2002-270 du 24 mars 2003 relatif à la « Protection des personnes exposées à des rayonnements ionisants à des fins médicales et médico-légales »
- Décret n°2003-296 du 31 mars 2003 relatif à la « Protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants »
- Décret n°2003-295 du 31 mars 2003 relatif aux « Interventions en situation d'urgences radiologiques et en cas d'exposition durable »

➤ **Arrêtés**

Numéro	Du	Contenu	Mot clé
SANC0323 527A	01/09/03	Modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants	Dose efficace
SANC0323 527A	01/09/03	Annexe 1	
SANY0324 697A	02/12/03	Fixant des seuils d'exemption d'autorisation pour les activités nucléaires mentionnées à l'article R. 1333-26 du code de la santé publique	Seuils d'exemption
SANY0420 211A	09/01/04	Définissant les modalités d'agrément des organismes chargés des contrôles en radioprotection en application de l'article R. 1333-44 du code de la santé publique	Modalités d'agrément des organismes habilités
J.O n° 64 du 16 mars 2004 page 5117	12/02/04	Relatif aux niveaux de référence diagnostiques en radiologie et en médecine nucléaire	Niveaux de référence en radiologie ou médecine nucléaire
SANY0324 119A	13/10/03	Relatif aux niveaux d'intervention en situation d'urgence radiologique	
SANY0420 298A	21/01/04	Relatif à l'information des personnes exposées aux rayonnements ionisants lors d'un acte de médecine nucléaire	Informations des patients médecine nucléaire
SOCT0312 131A	29/12/03	Relatif aux modalités de formation de la personne compétente en radioprotection et de la certification du formateur	Formation PCR et certification du formateur
SANY0420 798A	02/03/04	Fixant les conditions particulières d'emploi applicables aux dispositifs destinés à la radiographie industrielle utilisant le rayonnement gamma	CPE gammagraphie

LISTES DES ANNEXES

<i>Annexe 1 : « Principales unités employées en radioprotection »</i>	54
<i>Annexe 2 : « Définition des termes utilisés dans le mémoire »</i>	58
<i>Annexe 3 : « Réorganisation des pouvoirs publics en matière de radioprotection »</i>	61
<i>Annexe 4: « Effets biologiques des rayonnements ionisants »</i>	63
<i>Annexe 5 : « Exemple de calcul de débit de doses pour une source nue »</i>	65
<i>Annexe 6 : « Mesures de débits de dose pour la radiologie conventionnelle »</i>	67
<i>Annexe 7 : « Exemple de calcul d'épaisseur de mur pour une unité de radiothérapie »</i>	75
<i>Annexe 8 : « Etude de poste pour l'utilisation d'un gammagraphe sur chantier »</i>	78
<i>Annexe 9 : « Appréciation du référent professionnel »</i>	81

Annexe 1 : « Principales unités employées en radioprotection »

- **Activité (A)** : l'activité A d'une quantité d'un radionucléide à un état énergétique déterminé et à un moment donné est le quotient de dN par dt, où dN est le nombre probable de transitions nucléaires spontanées avec émission d'un rayonnement ionisant à partir de cet état énergétique dans l'intervalle de temps dt.

$$A = \frac{dN}{dt}$$

L'unité d'activité d'une source radioactive est le becquerel (Bq).

- **Becquerel** : c'est l'unité d'activité : 1 becquerel (Bq) représente une transition nucléaire spontanée par seconde, avec émission d'un rayonnement ionisant.
- **Dose absorbée (D)** : c'est l'énergie communiquée à la matière par unité de masse. Son unité est le joule par kilogramme (J/kg) ou le Gray noté **Gy**
- **Dose équivalente (H_T)** : à dose absorbée égale, les différentes variétés de rayonnements produisent des effets biologiques différents. La prise en compte de l'effet biologique s'effectue en pondérant la dose absorbée dans un organe par la qualité du rayonnement : on obtient la dose équivalente notée **H_T** dont l'unité est le Sievert noté **Sv**. Cette dose équivalente n'est pas une quantité physique mesurable directement. On l'obtient par le calcul, en multipliant la dose absorbée par un coefficient, appelé facteur de pondération noté **W_R**. Il varie de 1 à 20 suivant le type de rayonnements ionisants comme le montre le tableau ci dessous :

Type de rayonnements ionisants	W _R
Photons gamma et X	1
Particules bêta	1
Particules alpha	20
Neutrons (selon l'énergie)	5 à 20

Valeurs des facteurs de pondération W_R

- **Dose équivalente engagée H_T(t)** : intégrale sur le temps (t) du débit de dose équivalente au tissu ou à l'organe T qui sera reçu par un individu à la suite de l'incorporation de matière radioactive. Pour une incorporation d'activité à un moment t₀, elle est définie par la formule :

$$H_T(t) = \int_{t_0}^{t_0 + \tau} \dot{H}_T(t) dt$$

où :

H_T(t) est le débit de dose équivalente à l'organe ou au tissu T au moment t, τ la période sur laquelle l'intégration est effectuée.

Dans H_T(t), t est indiqué en années. Si la valeur de t n'est pas donnée, elle est implicitement, pour les adultes, de cinquante années. L'unité de dose équivalente engagée est le sievert (Sv).

- **Dose efficace (E)** : tous les organes ne sont pas sensibles de la même manière aux rayonnements ionisants. Pour les effets tardifs de types cancers et affections génétiques radio-induits on introduit la notion de dose efficace. Elle correspond à la dose équivalente qui, si elle était uniforme au niveau de l'organisme entier, entraînerait le même risque

tardif sur la santé que les doses équivalentes différentes reçues au niveau de différents organes. La notion de dose efficace est surtout utilisée lorsque l'exposition de l'organisme n'est pas homogène. La dose efficace est la somme des doses équivalentes pondérées dans tous les tissus et les organes du corps par un facteur de pondération noté W_T .

$$H_E = \sum W_T \cdot H_T$$

Organe exposé	W_T (CIPR 60)	Organe exposé	W_T (CIPR 60)
Gonades	0.20	Foie	0.05
Seins	0.05	Œsophage	0.05
Moelle osseuse rouge	0.12	Thyroïde	0.05
Colon	0.12	Surface osseuse	0.01
Poumons	0.12	Peau	0.01
Estomac	0.12	Reste de l'organisme	0.05
Vessie	0.05	Total	1

Valeurs des facteurs de pondération W_T

La dose efficace s'exprime en sievert mais cette unité n'a pas la même signification selon le niveau de doses dans lequel on se situe comme le précise le Conseil supérieur d'hygiène public de France dans son avis du 15 décembre 1999.

- Aux doses élevées, c'est à dire à partir de 0.5 Sv, le sievert permet de quantifier le risque réel avec une précision acceptable

- Aux doses moyennes, la précision de la quantification du risque décroît rapidement et l'incertitude atteint des valeurs élevées pour des doses inférieures à 0.2 Sv. Le sievert doit alors être considéré comme un indicateur de risque possible se situant entre zéro et cette valeur et plus comme une valeur supérieure du risque

- Aux faibles doses, qui correspond au domaine usuel de la radioprotection, l'incertitude atteint des valeurs disproportionnées faisant perdre toute signification statistique et sanitaire à l'indicateur. Les débits de dose pertinents en radioprotection sont des millions de fois inférieurs à ceux qui ont servi de référence pour déterminer les coefficients de risque. Dans ce domaine, le sievert ne peut en aucun cas être utilisé pour calculer le nombre de cancers dans une population (travailleur ou public) exposée aux rayonnements ionisants. La dose efficace a ici une autre signification : elle devient **un indicateur opérationnel pour le suivi des expositions, en référence aux limites réglementaires**. Les limites de dose réglementaires n'ont pas de signification sanitaire réelle et ne doivent pas être comprises comme des seuils de dangerosité lesquels sont beaucoup plus élevés

- **Dose efficace engagée $E(t)$** : somme des doses équivalentes engagées dans les divers tissus ou organes $H_T(t)$ par suite d'une incorporation, multipliées chacune par le facteur de pondération W_T approprié. Elle est donnée par la formule :

$$E(t) = \sum W_T H_T(t)$$

Dans $E(t)$, t désigne le nombre d'années sur lequel est faite l'intégration. L'unité de dose efficace engagée est le sievert (Sv).

- **Gray** : c'est l'unité de dose absorbée : 1 gray (Gy) correspond à un joule par kilogramme
(1 Gy = 1 J. kg⁻¹)
- **Sievert** : unité commune utilisée à la fois pour la dose équivalente, la dose équivalente engagée, la dose efficace et la dose efficace engagée.

Annexe 2 : « Définition des termes utilisés dans le mémoire »

Par ordre alphabétique

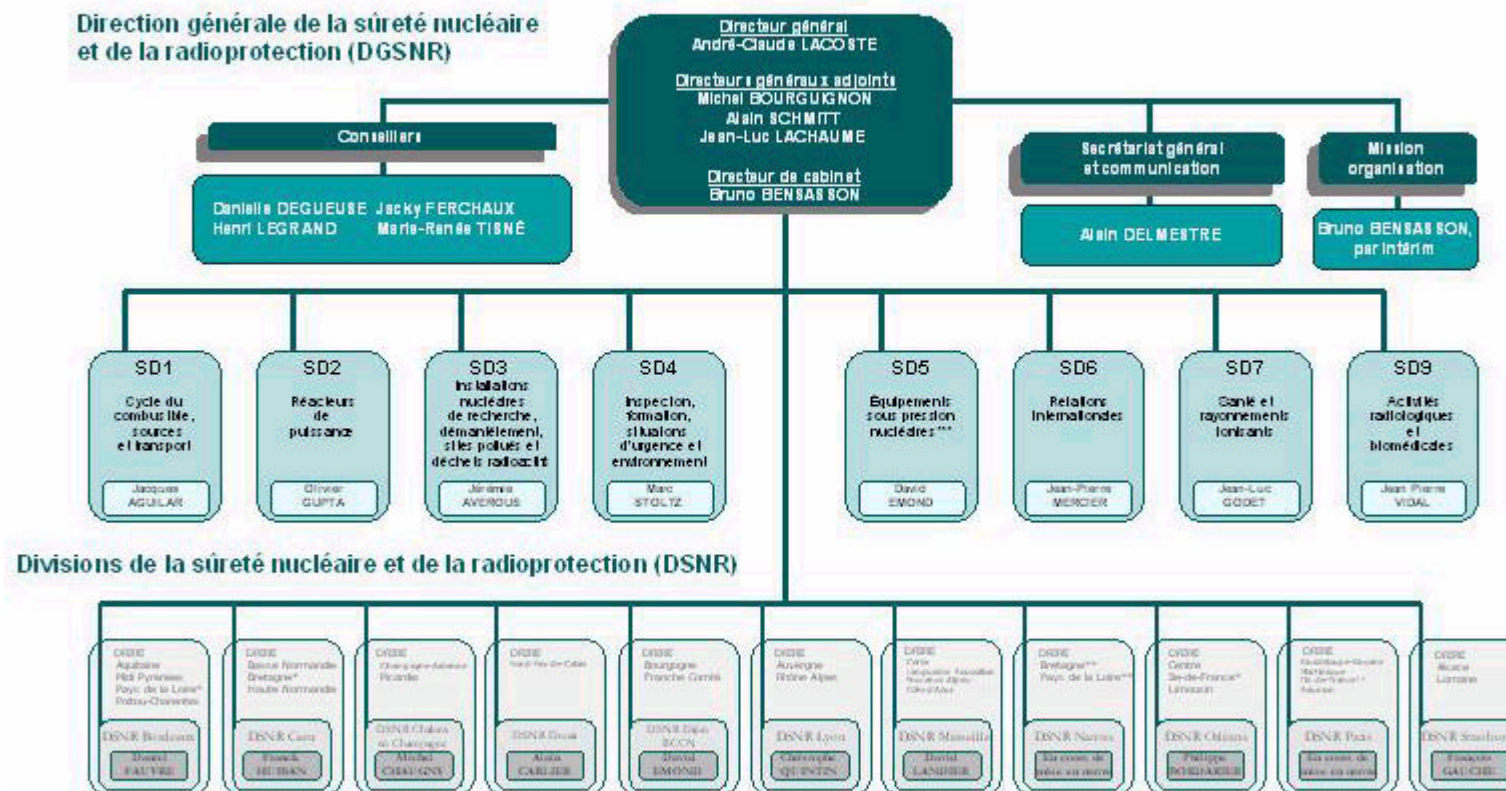
- **Accélérateur** : appareillage ou installation dans lesquels des particules sont soumises à une accélération émettant des rayonnements ionisants d'une énergie supérieure à 1 mégaélectronvolt (MeV).
- **Activation** : opération rendant radioactif un élément chimique en l'exposant à des rayonnements ionisants.
- **Contamination radioactive** : contamination d'une matière, d'une surface, d'un milieu quelconque ou d'un individu par des substances radioactives. Dans le cas particulier du corps humain, cette contamination radioactive comprend à la fois la contamination externe cutanée et la contamination interne par quelque voie que ce soit.
- **Dosimétrie externe** : ensemble des méthodes et techniques permettant de mesurer la dose externe. Lorsque la dose externe est mesurée à partir d'appareils (dosimètres) à lecture différée et reproductible, il s'agit de dosimétrie passive ». Lorsque la dose externe est mesurée à partir de dosimètres lus en temps réel, il s'agit de dosimétrie opérationnelle ».
- **Dosimétrie interne** : ensemble des méthodes et techniques permettant de mesurer la dose interne. La dosimétrie interne repose notamment sur des examens anthropogammamétriques et des analyses radio-toxicologiques prescrits par le médecin du travail.
- **Exposition** : fait d'être exposé à des rayonnements ionisants. Termes utilisés :
 - L'exposition externe : exposition résultant de sources situées en dehors de l'organisme.
 - L'exposition globale : exposition du corps entier considérée comme homogène.
 - L'exposition interne : exposition résultant de sources situées dans l'organisme.
 - L'exposition partielle : exposition portant essentiellement sur une partie de l'organisme ou sur un ou plusieurs organes ou tissus.
 - L'exposition totale : somme de l'exposition externe et de l'exposition interne.
- **Exposition externe** : exposition résultant de sources situées en dehors de l'organisme.
- **Exposition interne** : exposition résultant de sources situées dans l'organisme.
- **Exposition professionnelle d'urgence** : exposition de travailleurs volontaires participant à une intervention pour porter secours à des personnes en danger ou, dans le cadre d'une situation d'urgence radiologique, pour prévenir l'exposition d'un grand nombre de personnes.
- **Groupe de référence de la population** : groupe d'individus dont l'exposition à une source est assez uniforme et représentative de celle des individus qui, parmi la population, sont plus particulièrement exposés à ladite source.
- **Incorporation** : activité des radionucléides pénétrant dans l'organisme à partir du milieu ambiant.

- **Limites de dose** : valeurs maximales de référence pour les doses résultant de l'exposition des travailleurs, des femmes enceintes ou allaitant, des apprentis et des étudiants, ainsi que des autres personnes mentionnées à l'article R.1333-8, aux rayonnements ionisants visés par le présent décret et qui s'appliquent à la somme des doses concernées résultant de sources externes de rayonnement pendant la période spécifiée et des doses engagées résultant de l'incorporation pendant la même période.
- **Nucléide** : espèce atomique définie par son nombre de masse, son numéro atomique et son état énergétique nucléaire.
- **Radioactivité** : phénomène de transformation spontanée d'un nucléide avec émission de rayonnements ionisants.
- **Radionucléide** : nucléide radioactif.
- **Rayonnements ionisants** : transport d'énergie sous la forme de particules ou d'ondes électromagnétiques d'une longueur d'ondes inférieure ou égale à 100 nanomètres, soit d'une fréquence supérieure ou égale à 3×10^{15} hertz, pouvant produire des ions directement ou indirectement.
- **Source** : appareil, substance radioactive ou installation pouvant émettre des rayonnements ionisants ou des substances radioactives.
- **Source naturelle** : source de rayonnement ionisant d'origine naturelle terrestre ou cosmique.
- **Source radioactive non scellée** : source dont la présentation et les conditions normales d'emploi ne permettent pas de prévenir toute dispersion de substance radioactive.
- **Source radioactive scellée** : source dont la structure ou le conditionnement empêche, en utilisation normale, toute dispersion de matières radioactives dans le milieu ambiant.
- **Substance radioactive** : toute substance qui contient un ou plusieurs radionucléides dont l'activité ou la concentration ne peut être négligée du point de vue de la radioprotection. Les substances radioactives sont soit naturelles, soit artificielles.
- **Travailleurs exposés** : travailleurs, salariés ou non, soumis dans le cadre de leur activité professionnelle à une exposition à des rayonnements ionisants susceptible d'entraîner des doses supérieures à l'un quelconque des niveaux de doses égaux aux limites de dose fixées pour les personnes du public.
- **Zone contrôlée** : zone soumise à une réglementation spéciale pour des raisons de protection contre les rayonnements ionisants et de confinement de la contamination radioactive et dont l'accès est réglementé.
- **Zone surveillée** : zone faisant l'objet d'une surveillance appropriée à des fins de protection contre les rayonnements ionisants.

Annexe 3 : « Réorganisation des pouvoirs publics en matière de radioprotection »



Organigramme de l'Autorité de sûreté nucléaire



*: seulement pour le contrôle des INB

** : seulement pour le contrôle de la radioprotection hors INB

***: SD5 placée au sein de la DRIRE Bourgogne

Organigramme au 01/07/2004

Annexe 4: « Effets biologiques des rayonnements ionisants »

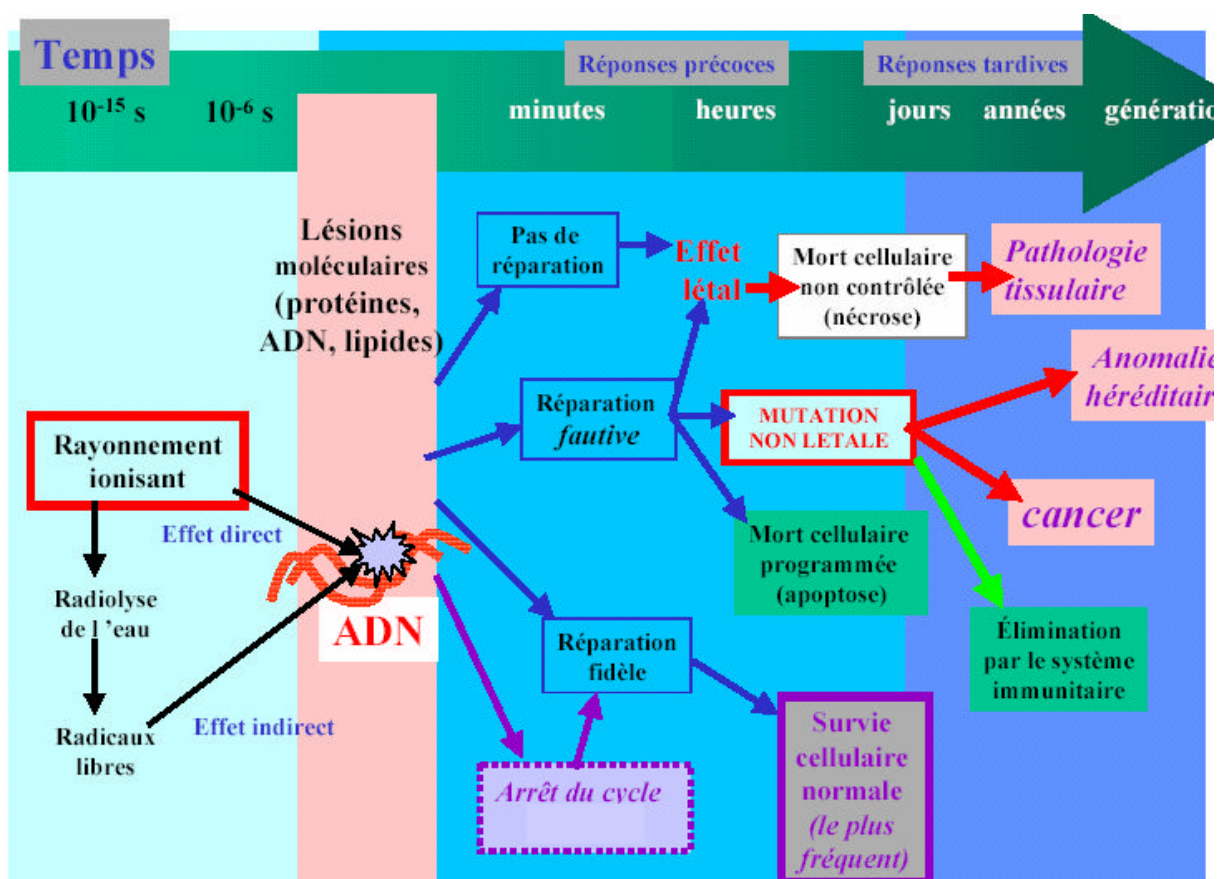


Figure 1 : « Effets des rayonnements ionisants sur les cellules du corps humain »

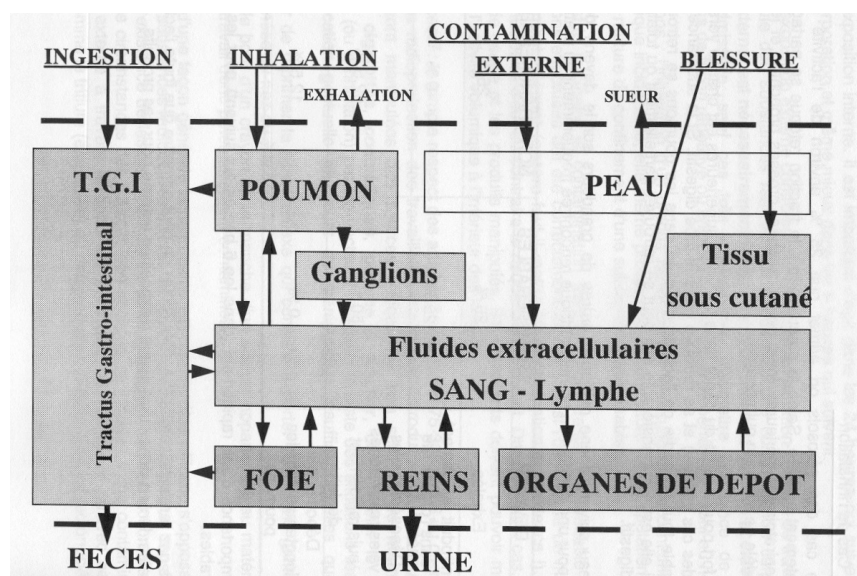


Figure 2: Cheminement possible dans l'organisme d'un composé radioactif en fonction de son mode d'introduction - (source : M. Ammerich 2001 DGSNR)

Annexe 5 : « Exemple de calcul de débit de doses pour une source nue »

1. Source d'iridium 192

Soit une source d'iridium 192 d'activité nominale 3.7 TBq émettant des photons gamma selon les énergies suivantes : 317 keV à 83%, 468 keV à 48% et 604 keV à 8% . On cherche à connaître les débits de dose absorbée de cette source à différentes distances d'exposition pour les travailleurs. Le calcul passe d'abord par la détermination du débit de dose à 1 mètre puis, l'atténuation des photons pour d'autres distances se calcule avec la loi de l'inverse du carré de la distance.

1.1 A 1 mètre

On utilise la formule établie pour les photons :

$$D^{\circ}\gamma(1m) = 1.3.10^{-10} \cdot \text{Activité} \cdot \text{Energie} \cdot \text{Pourcentage d'émission}$$

Application numérique

$$D^{\circ}\gamma_1(1m) = 126 \text{ mGy/h}$$

$$D^{\circ}\gamma_2(1m) = 108 \text{ mGy/h}$$

$$D^{\circ}\gamma_3(1m) = 23 \text{ mGy/h}$$

Le débit de dose absorbé à 1 mètre de la source est donc de 257 mGy/h
soit **0.3 Gy/h**

1.2 A différentes distances d'exposition

Loi en $1/d^2$:

$$D_1 \cdot d_1^2 = D_2 \cdot d_2^2 \text{ avec } D_1 = 0.3 \text{ Gy/h et } d_1 = 1 \text{ m}$$

$$\text{Si } d_2 = 5 \text{ cm}$$

$$\text{Alors } D_2 = \mathbf{120 \text{ Gy/h}}$$

$$\text{Si } d_2 = 50 \text{ cm}$$

$$\text{Alors } D_2 = \mathbf{1.2 \text{ Gy/h}}$$

$$\text{Si } d_2 = 2 \text{ m}$$

$$\text{Alors } D_2 = 0.075 \text{ Gy/h soit } \mathbf{75 \text{ mGy/h}}$$

2. Source de cobalt 60

Les calculs précédents peuvent être réitérés par exemple pour une source de cobalt 60 d'activité nominale égale à 37 GBq et émettant selon les énergies suivantes : 1.17 MeV à 100% et 1.33 MeV à 100%.

$$D^{\circ}\gamma_1(1m) = 5.6 \text{ mGy/h}$$

$$D^{\circ}\gamma_2(1m) = 6.4 \text{ mGy/h}$$

Le débit de dose absorbé à 1 mètre de la source est donc de **12 mGy/h**

A différentes distances d'exposition

$$\text{Si } d_2 = 5 \text{ cm}$$

$$\text{Alors } D_2 = 4800 \text{ mGy/h soit } \mathbf{4.8 \text{ Gy/h}}$$

$$\text{Si } d_2 = 50 \text{ cm}$$

$$\text{Alors } D_2 = \mathbf{48 \text{ mGy/h}}$$

$$\text{Si } d_2 = 2 \text{ m}$$

$$\text{Alors } D_2 = \mathbf{3 \text{ mGy/h}}$$

$$\text{Si } d_2 = 10 \text{ m}$$

$$\text{Alors } D_2 = 0.12 \text{ mGy/h soit } \mathbf{120 \text{ }\mu\text{Gy/h}}$$

Ces calculs montrent que l'éloignement est un moyen efficace de protection contre les rayonnements ionisants mais ils montrent aussi que le débit de dose absorbée croît rapidement lorsqu'on s'approche des sources. Par conséquent, il ne faut jamais toucher une source avec les doigts. De plus, en terme de radioprotection, ces calculs montrent que les débits de doses dépendent étroitement des caractéristiques des sources (type de rayonnement, activité nominale, activité en décroissance...).

Remarque : A titre d'exemple, sachant que les travailleurs rentrant en zone contrôlée ne doivent pas prendre plus de 20 mSv/an, une transcription approximative de cette valeur réglementaire en termes de débit de dose (l'arrêté zonage n'étant pas encore publié, on n'a pas de valeur de débit de dose indicatrice) donne 20 mSv/2000 heures de travail soit **10 $\mu\text{Sv/h}$** . Dans le cas de la source précédente, pour respecter la valeur de 10 $\mu\text{Sv/h}$, il faut s'écarter de la source de 35 mètres.

Annexe 6 : « Mesures de débits de dose pour la radiologie conventionnelle »

Résultats d'un contrôle d'ambiance d'un GERIX type radiologie classique exemple n°1

Règle d'aménagement du local	NF 15-160
Poste de travail	Derrière le paravent plombé
Diffuseur	Eau 20*20
Paramètre du tir	Tension = 77 kV
	Intensité = 14 mA

Localisation des points de mesure	Résultats de la mesure en $\mu\text{Sv/h}$	Valeur maximale admissible	Populations exposées
Derrière la porte de la salle	2	720	Travailleur classé ou non, public
Derrière le mur du local technique	<1	216	Travailleur classé ou non, public
Derrière le mur du couloir	<1	720	Travailleur classé ou non, public
Derrière le mur du parking	<1	720	Public
Derrière la fenêtre hauteur 1.7 mètres	2.5	720	Public
Derrière le paravent plombé	10	720	Manipulateur radiologique = travailleur classé

Résultats d'un contrôle d'ambiance d'un GERIX type radiologie classique exemple n°2

Fonctionnement	En graphie
Poste de travail	Au pupitre derrière le paravent plombé
Diffuseur	Eau 25*25*15
Distance foyer - diffuseur	100 cm
Caractéristique du tir	Tension = 100 kV
	Intensité = 100 mA

Zone contrôlée	
Zone surveillée	
Protection individuelle	Tabliers en plomb et gants anti X
Protection collective	NF 15-160

Sur table horizontale

Localisation des points de mesure	Résultats de la mesure en $\mu\text{Sv/h}$	Valeurs maximales admissibles en $\mu\text{Sv/h}$	Populations exposées
Dans le champ direct sans diffuseur	6 800		Manipulateur radiologique
Au contact du diffuseur	480		
Au contact du diffuseur sous gants de plomb	35		
A 50 cm du diffuseur	46		
A 50 cm du diffuseur sous tablier plombé	1		
A 1.7 m devant le paravent	4.6		
Derrière le pupitre	0.1	5.6	
A 1 m derrière le paravent	0.1	5.6	Travailleurs classés ou non, public
Dans l'ensemble des locaux environnant	<0.1	5.6	
Dans les déshabillloirs et les WC	<0.1	85	

Tir sur potter mural

Localisation des points de mesure	Résultats de la mesure en $\mu\text{Sv/h}$	Valeurs maximales tolérées en $\mu\text{Sv/h}$	Populations exposées
Dans le champ direct sans diffuseur	1 600		Manipulateur radiologique
Au contact du diffuseur	240		
A 1 m du diffuseur coté angle paravent	4		
Au pupitre derrière le paravent	0.1	5.6	
Entre le paravent et le mur	1.2	5.6	
Derrière la porte	<1	8.5	
Derrière le mur potter	1.2	1.6	

Résultats d'un contrôle d'ambiance d'un GERIX type appareil mobile en chambre

Règle d'aménagement du local	NF 15-160
Distance foyer-diffuseur	80 cm
Diffuseur	Eau 25*25*15
Paramètre du tir	Tension = 73 kV
	Débit d'intensité = 5 mA seconde

Zone contrôlée	4 mètres
Zone surveillée	5 mètres

Protection individuelle	Tablier en plomb
-------------------------	------------------

Localisation des points de mesure	Populations exposées	Résultats de la mesure en $\mu\text{Sv/h}$
Faisceau direct		180
A 50 cm du faisceau	➤ Manipulateur radiologique	1
A 1 mètre du faisceau	➤ Travailleurs non classé	0.2
Derrière l'axe de la potence	➤ Visiteur (dans les couloirs et dans la chambre)	10
Hors axe	➤ Voisins du patient (même chambre)	500
Embout du cordon de commande à 2.5 m		15

Résultats d'un contrôle d'ambiance d'un GERIX type ampli de brillance mobile au bloc opératoire

Type de radiologie	Interventionnelle mobile
Fonctionnement	En scopie et en graphie
Poste de travail	Derrière le paravent plombé
Diffuseur	Eau 25*25*15
Distance foyer - diffuseur	80 cm

Zone contrôlée	4 mètres
Zone surveillée	7 mètres

Protection individuelle	Tabliers en plomb
-------------------------	-------------------

En scopie : tension = 100 kV et intensité = 1 mA

Localisation des points de mesure	Résultats de la mesure en $\mu\text{Sv/h}$	Populations exposées
Contact diffuseur	10 000	➤ Manipulateur radiologique ➤ Chirurgien ➤ Infirmière + autres personnels hospitaliers
50 cm du diffuseur	900	
50 cm du diffuseur avec tablier	50	
2 mètres du diffuseur derrière pupitre	100	
2 mètres du diffuseur	25	
4 mètres du diffuseur	20	

En graphie : tension = 100 kV et intensité = 100 mA secondes

Localisation des points de mesure	Résultats de la mesure en $\mu\text{Sv/h}$	Populations exposées
Tir direct sans diffuseur	9500	➤ Manipulateur radiologique ➤ Chirurgien ➤ Infirmière + autres personnels hospitaliers
Contact diffuseur	50	
50 cm du diffuseur	400	
2 mètres du diffuseur derrière pupitre	5	
2 mètres du diffuseur	1	

Résultats d'un contrôle d'ambiance d'un GERIX type rétroalvéolaire dentaire

Poste de travail	Au fauteuil
Diffuseur	Eau 20*20
Caractéristiques du tir	Tension = 55 kV Intensité = 8 mA
Temps d'exposition	0.63 secondes (très court)

Protection individuelle	Tablier en plomb + gants anti X
-------------------------	---------------------------------

Faisceau direct

Localisation des points de mesure	Résultats de la mesure en $\mu\text{Sv/h}$	Valeur maximale admissible $\mu\text{Sv/h}$	Populations exposées
Tir sur la fenêtre donnant sur la rue	10 000	48 000	Public
Tir vers la cloison de la salle d'attente	<1	14 545	Public
Tir sur la fenêtre donnant sur le jardin	9 000	48 000	Public

Faisceau diffusé

Localisation des points de mesure	Résultats de la mesure en $\mu\text{Sv/h}$	Valeur maximale admissible $\mu\text{Sv/h}$	Populations exposées
Derrière la porte et la fenêtre donnant sur le trottoir	4	24 000	Public
Derrière le mur donnant sur le trottoir	<1	24 000	Public
Derrière le mur de la salle d'attente	<1	7 272	Public
Derrière le mur du bureau	<1	24 000	Public
Derrière la porte de la salle d'attente	2	7 272	Public
Derrière la porte du bureau	3	24 000	Public

Annexe 7 : « Exemple de calcul d'épaisseur de mur pour une unité de radiothérapie »

Pour s'adapter aux tumeurs à soigner, les accélérateurs de particules possèdent deux modes de fonctionnement en fonction des pénétrations des rayonnements : un mode en photons gamma et un mode en électrons. Les ondes électromagnétiques étant plus pénétrantes, les mesures lors d'un contrôle de radioprotection doivent être effectuées en mode rayons gamma. Le principe de l'accélération des particules est identique aux GERIX dans le fait que l'intensité d'entrée permet de régler le nombre d'électrons mis en jeu et la tension, leur vitesse donc leur énergie. Initialement, l'accélérateur crée uniquement des électrons (rayonnement primaire) qui interagissent avec la plaque métallique pour donner des photons gamma d'énergie égale à 2/3 de l'énergie nominale.

Soit un accélérateur de particules ayant les caractéristiques suivantes :

Caractéristiques constructeur	Energie des photons = 25 MeV
	Energie des électrons = 21 MeV
	Unités moniteurs = 300 soit un débit de dose dans l'air à 1 mètre $D^{\circ}_{1m} = 180 \text{ Gy/h}$
Utilisation de l'accélérateur	Energie des photons = 15 MeV
	Energie des électrons = 14 MeV

On se place dans l'hypothèse où l'accélérateur se situe à 5 m de chaque Calcul mur dont on veut calculer l'épaisseur.

1) Calcul du débit de dose dans l'air du rayonnement émis :

On utilise la loi en $1/d^2$ vue en annexe 5.

$$D^{\circ}_{\text{air}} = 180 \text{ Gy/h} \times 1/52$$

$$D_{\text{air}} = 7.2 \text{ Gy/h}$$

2) Calcul de l'épaisseur du mur pour respecter un débit de dose de $10 \mu\text{Sv/h}$ derrière le mur (poste de travail du radiophysicien)

Connaissant les épaisseurs dixièmes ($x_{1/10}=0.276$ pour un béton barité littérature), on cherche à calculer le nombre de couches pour avoir l'épaisseur du mur.

$$\frac{D_{\text{réglementation}}}{D_{\text{air}}} = 0.1^n = \frac{10 \times 10^{-6}}{7.2}$$

$$n = \frac{\log\left(\frac{10 \times 10^{-6}}{7.2}\right)}{\log(0.1)} = 5.86$$

$$\text{épaisseur} = 5.86 \times 0.276 = 1.61 \text{ mètres}$$

Pour atténuer le faisceau de photons gamma de 180 Gy/h à $10 \mu\text{Sv/h}$, on peut placer un écran en béton barité de 1.61 mètres d'épaisseur.

Annexe 8 : « Etude de poste pour l'utilisation d'un gammagraphe sur chantier »

L'article R 231-75 du Code du travail mentionne la nécessité pour le chef d'établissement de réaliser une analyse des postes de travail qui doit être renouvelée périodiquement et à l'occasion de toute modification de conditions pouvant affecter la santé et la sécurité des travailleurs. La gammagraphie industrielle étant une activité du nucléaire de proximité présentant un risque important d'irradiation, les études de postes revêtent toute leur importance.

Cet exemple concerne une analyse de poste de travail lors de la prise de clichés radiologiques en chantier extérieur et en situation normale de travail, mais dans un scénario de **conditions les plus pénalisantes** telle qu'un tir hors fouille avec l'embout d'irradiation placé à l'extérieur du tube pour une pose de pipeline sans interposition d'écran de protection. Les paramètres employés sont extraits de la norme NFM 62-103⁴³ notamment pour le calcul du débit horaire de dose équivalente à une distance d (en mètres) d'une source d'¹⁹²Ir d'activité A (en TBq) :

$$D_{(Gy/h)} = \frac{A * Cy}{d^2}$$

Caractéristique de l'appareil	➤ Projecteur portatif de type GAM 80 ➤ Télécommande mécanique = 9 mètres ➤ Gaine d'éjection = 3 mètres ➤ Embout d'irradiation avec collimateur amovible
Caractéristiques de la source	➤ Iridium 192 ➤ Activité = 2TBq
Durée du cliché	➤ 3 minutes
Constante spécifique d'ionisation	➤ Cy = 0.108 Gy/h par TBq à 1 mètre

Remarque : Les doses calculées ci-après sont des **doses efficaces** car on considère que la totalité de l'organisme de l'opérateur est exposé : le facteur de pondération de dose équivalente est aussi pris égal à 1 puisqu'il s'agit d'un rayonnement gamma (on considère les autres types de rayonnements émis comme minoritaires).

En analysant la manipulation à effectuer, on peut distinguer deux phases : d'une part la phase d'éjection de la source, d'autre part le repli de l'opérateur durant le tir.

➤ Phase a : Phase d'éjection de la source

Lors de la prise du cliché, l'opérateur doit éjecter la source à l'aide de la manivelle de la télécommande mécanique : la source circule entre le projecteur et l'embout d'irradiation. Cette phase correspond à une exposition maximale pour l'opérateur. La distance entre le poste de manœuvre et la source dépend de la configuration de la prise de clichés et de l'encombrement du chantier : l'éloignement maximum autorisé par les longueurs des accessoires {gaine d'éjection - télécommande mécanique} est souhaité d'un point de vue radioprotection.

⁴³ Norme AFNOR M 62-103 (septembre 1998) : « radioprotection - Installations de radiologie gamma industrielle - Atténuation des rayonnements ionisants par les écrans de protection ». Cette norme traite de l'évaluation des atténuations du rayonnement par les parois d'une enceinte contenant une installation de radiologie gamma industrielle

Les hypothèses de calcul sont :

- distance {poste de travail phase a et source} : $d = 10$ mètres
- temps de la manœuvre sortie de source = 3 secondes
- temps de la manœuvre entrée de source = 3 secondes

d'où $D = 2 \cdot 0.108 / 100$ soit $2,1 \cdot 10^{-3}$ Gy/h (ou 2100 μ Gy/h)

La dose reçue par l'opérateur sur les 2 manœuvres est donc $2100 \cdot 6 / 3600 = 3.5$ μ Gy/h/cliché

➤ Phase b : Repli de l'opérateur durant le tir

Après avoir procédé à l'éjection de la source, l'opérateur s'éloigne au meilleur poste de repli possible pendant toute la durée du cliché. On note qu'en pratique, il recherchera des structures métalliques susceptibles d'apporter une protection complémentaire de l'atténuation des RX dans l'air, mais on n'en tient pas compte dans ce calcul.

On suppose que l'opérateur se recule de 40 mètres. Le débit horaire maximum résiduel au repli sans utiliser un collimateur est alors de $2 \cdot 0.108 / 40^2 = 0.13 \cdot 10^{-3}$ Gy/h soit **130 μ Gy/h**.

Pour une durée de prise de cliché de 3 minutes, la dose reçue par l'opérateur est de $130 \cdot 3 / 60 = 6.5$ μ Gy/ cliché sans collimateur

Remarque : On peut considérer que l'emploi d'un collimateur atténue d'un facteur 15 la dose efficace reçue par l'opérateur.

➤ Cumul des doses pour l'ensemble de la manipulation

Sans collimateur : $6.5 + 3.5 = 10$ μ Gy = 10 μ Sv/cliché

Avec collimateur : $0.5 + 3.5 = 4$ μ Gy = 4 μ Sv/cliché

➤ Evaluation de la dose efficace annuelle reçu par l'opérateur

Compte tenu des conditions opératoires en chantiers extérieurs (mise en place du matériel par exemple) on prend l'estimation de 20 films de 3 minutes par jour par opérateur. Sur 200 jours de travail on a 4000 tirs radiologiques correspondant à 200 heures d'exposition. en prenant comme autre hypothèse de travail : 5% des clichés réalisés sans collimateurs et 95% des clichés réalisés avec collimateur, on obtient la dose efficace :

$$4000 \cdot (10 \cdot 5\% + 4 \cdot 95\%) = 17\,200 \text{ } \mu\text{Sv} \text{ soit } \mathbf{17.2 \text{ mSv/an /opérateur}}$$

Cette valeur reste inférieure à la valeur réglementaire de 20 mSv/an pour un travailleur exposé aux rayonnements ionisants (article R 231-76 du Code du travail). La personne compétente en radioprotection de l'établissement pourra procéder au classement de l'opérateur (catégorie A/B) et mettre en place un suivi dosimétrique adapté au type de zones (contrôlées et surveillées) dans lequel l'opérateur va travailler.

Remarque : Cette étude de poste peut être considérée comme majorante puisqu'on s'est placé dans l'hypothèse de tirs réalisés en pleine nature sans protection.

Annexe 9 : « Appréciation du référent professionnel »



DIRECTION RÉGIONALE DE L'INDUSTRIE,
DE LA RECHERCHE ET DE L'ENVIRONNEMENT

CHAMPAGNE-ARDENNE

Division de la Sûreté Nucléaire et de la Radioprotection
2, rue Grenet Tellier
51038 CHALONS-en-CHAMPAGNE



Division de
Châlons-en-Champagne

N. Réf : DSNR-CHALONS-n° 181-2004

Châlons, le 18 août 2004

Téléphone : 03.26.69.33.06

E-mail : alain.thizon@asn.minefi.gouv.fr

Télécopie : 03.26.69.33.22

Monsieur le Directeur
École Nationale de la Santé Publique
Avenue du Professeur Léon Bernard
35 043 RENNES Cedex

OBJET Mémoire de Melle Chrystel BRENAUT

Monsieur le Directeur,

Le mémoire de Chrystel Brenaut s'est déroulé au sein d'une structure en pleine réorganisation et en phase de repérage pour les futures tâches d'inspection concernant la radioprotection du nucléaire de proximité.

Elle a, tout au long du mémoire, fait preuve d'initiative, d'adaptabilité, de dynamisme, de capacités d'organisation et de hiérarchisation. Elle a participé à la rédaction des documents d'organisation de la division en application des décrets, arrêtés et directives diverses tout récemment édités.

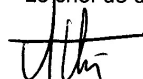
Les inspections de repérage auxquelles elle a participé ont montré sa bonne préparation et son aisance tant dans le milieu industriel que le milieu médical.

Sa capacité déjà affirmée, son assimilation de la législation et des règles élémentaires de la radioprotection, son appréhension des enjeux sanitaires ont permis de lui faire mener des sessions de sensibilisations aux organismes dont la DRIRE doit coordonner l'action comme les CRAM, la DRASS, les DRASS, l'ARH, les inspections du travail. Au cours des débats qui suivaient, elle a toujours su répondre avec satisfaction aux questions des divers acteurs de la santé publique.

Chrystel BRENAUT présente une excellente aptitude pour l'exercice d'une fonction à responsabilité dans la radioprotection du nucléaire de proximité. Elle fait preuve d'un très bon état d'esprit et de capacités relationnelles appréciées.

Veuillez agréer, Monsieur le Directeur, l'expression de ma considération distinguée.

P/LA DIRECTRICE et par délégation,
Le chef de division par intérim,



A. THIZON

www.asn.gouv.fr

MINISTÈRE DE L'ÉCONOMIE, DES FINANCES ET DE L'INDUSTRIE - MINISTÈRE DÉLÉGUÉ À L'INDUSTRIE,
AUX PETITES ET MOYENNES ENTREPRISES, AU COMMERCE, À L'ARTISANAT ET À LA CONSOMMATION
MINISTÈRE DE L'EMPLOI ET DE LA SOLIDARITÉ - MINISTÈRE DÉLÉGUÉ À LA SANTÉ
MINISTÈRE DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE ET DE L'ENVIRONNEMENT

Annexe photographique A : « Appareils de détection et suivi dosimétrique »



Mesure par chambre d'ionisation- Babyline
(mesure du débit de dose au contact)



Mesure au contact du colis avec un radiomètre



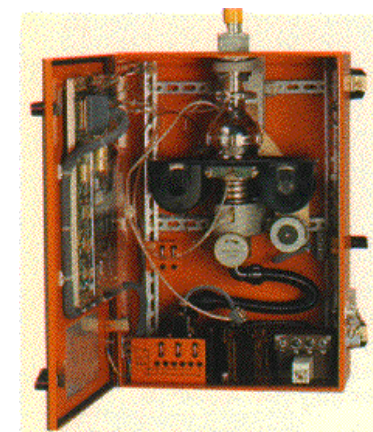
Compteur Geiger-Müller compensé
(mesure du débit de dose équivalente)



Détecteur à chambre d'ionisation



Activimètre



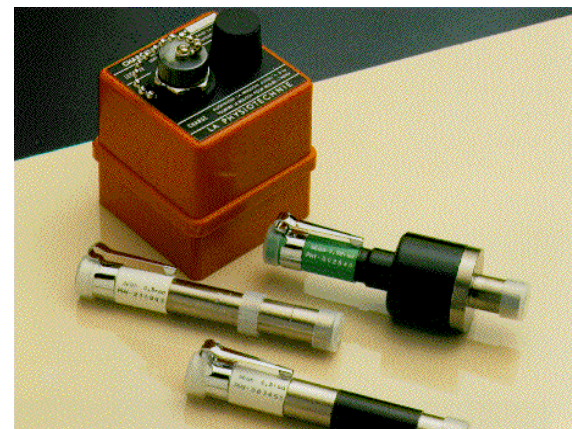
Mesure des aérosols et des gaz



Dosimètre passif film « poignet »



Dosimètre passif film poitrine



Stylo dosimètre



Bague thermoluminescente

Annexe photographique B : « Les activités du nucléaire de proximité industriel »



Stockage de sources scellées



Sources non scellées



Sources scellées en capsules



Sources et porte-source pour un appareil de gammagraphie industrielle



Sources et porte-source pour un appareil de gammagraphie industrielle



Sources d'étalonnage de spectromètres



Tir gammagraphique en casemate d'irradiation



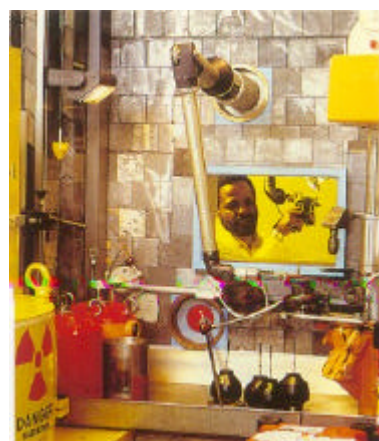
Transport d'un gammagraphe par route



Tir gammagraphique en tuyauterie



GAM 80 CEGELEC chargé en ^{192}Ir
(environ 800 appareils en France)



Cellule de chargement de sources neuves



Gammagraphe mobile GMA 2500 chargé en ^{60}Co



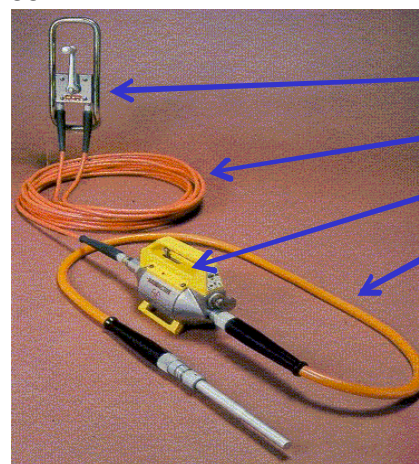
Porte source dans son intégrité en position de stockage et obturation complète et verrouillée



Porte source dans son intégrité en position de stockage et obturation complète mais non verrouillée



Obturation non complète, porte source en position de stockage ou non

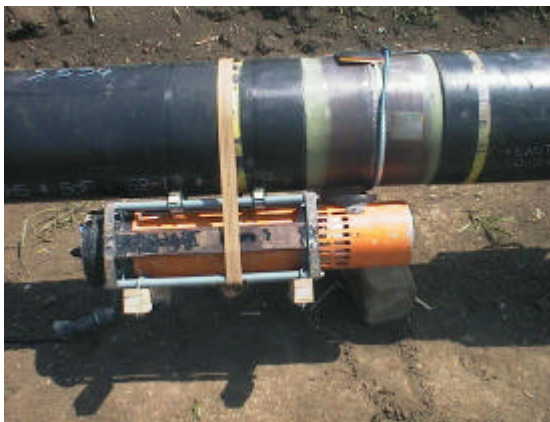


- Manivelle
- Câble de télé-commande
- Projecteur
- Embout d'irradiation

Gammagraphe et ses accessoires



Utilisation d'un générateur électrique de rayonnements ionisants en casemate d'irradiation



Utilisation d'un générateur électrique de rayonnements ionisants sur chantier extérieur



Générateur électrique de rayonnements ionisants industriel



Irradiateur pour la conservation des denrées alimentaires



Accélérateur linéaire



Mesure d'épaisseur de tissus



Mesure de débit



Mesure de remplissage



Gammadensimètre



Détecteur de plomb



Jauge de niveau

Annexe photographique C : « Les activités du nucléaire de proximité médical »



Entreposage de déchets radioactifs hospitaliers



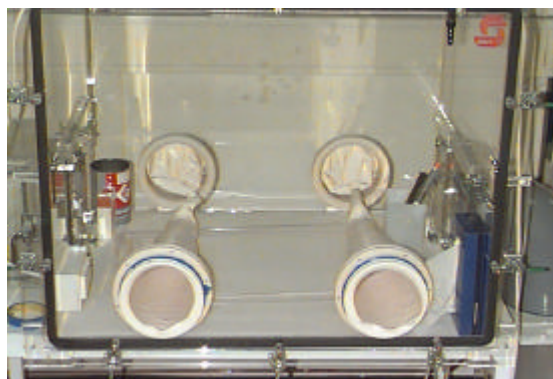
Entreposage de déchets radioactifs hospitaliers



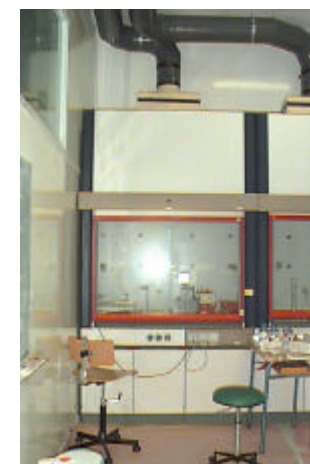
Protection plombée du flacon et pince de manipulation à distance



Boîte à gants
(protection contre la contamination)



Boîte à gants
(protection contre la contamination)



Hotte ventilée
(protection contre la contamination)



Installation de radiologie conventionnelle



Mammographe



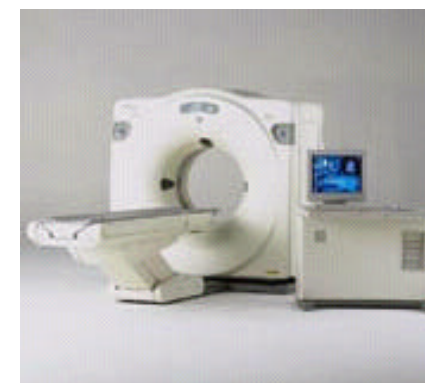
Installation de coronarographie



Appareils mobiles au bloc opératoire



Rétroalvéolaire



Scanographie



Radiothérapie – Appareil de télégammathérapie équipé d'une source de cobalt 60



Radiothérapie - Accélérateur de particules



Sources de césium 137



Protèges seringues plombés



Gamma caméra ou caméra à scintillation



Tomographie à émission de positons (TEP)