

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

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Faire avancer la sûreté nucléaire

La radioprotection des travailleurs

Exposition professionnelle aux rayonnements ionisants
en France : bilan 2011

PRP-HOM/2012-007

Pôle radioprotection, environnement, déchets
et crise

RESUME

Le bilan de la surveillance des expositions professionnelles aux rayonnements ionisants concerne l'ensemble des secteurs d'activité soumis à un régime d'autorisation ou de déclaration, y compris ceux de la défense : activités médicales et vétérinaires, domaine nucléaire, industrie non nucléaire et domaine de la recherche, ainsi que les secteurs concernés par une exposition à la radioactivité naturelle.

L'effectif suivi en 2011 dans le cadre des activités soumises à autorisation ou à déclaration est en augmentation de 4 % par rapport à 2010, avec un effectif de 343 988, ce qui confirme la tendance des années précédentes. Parallèlement, la dose collective¹ mesurée par dosimétrie externe passive augmente de 3 % en 2011, atteignant 64,2 homme.Sv. La dose individuelle moyenne sur l'ensemble de l'effectif surveillé reste stable (0,19 mSv). Parmi les 14 035 travailleurs ayant reçu plus de 1 mSv (limite annuelle réglementaire fixée pour la population générale), 1 929 travailleurs (0,6%) ont reçu une dose supérieure à 6 mSv², donnée stable par rapport à l'année précédente. Douze travailleurs ont reçu une dose externe annuelle supérieure à 20 mSv (limite réglementaire de la dose efficace fixée pour les travailleurs). Des inégalités importantes dans la répartition des doses sont observées selon les domaines d'activité. Ainsi, le domaine médical et vétérinaire, qui regroupe la majorité des effectifs surveillés (62%), présente une dose individuelle moyenne faible (0,1 mSv en 2011), alors que les travailleurs du nucléaire et de l'industrie non nucléaire, représentant 29 % des effectifs suivis, reçoivent les doses individuelles moyennes les plus élevées (respectivement 0,37 et 0,52 mSv en 2011). Dans le domaine de la recherche, les doses individuelles restent en moyenne inférieures à 0,1 mSv. Le nombre de cas avérés de contamination interne reste faible : en 2011, 9 travailleurs ont eu une dose efficace engagée³ supérieure à 1 mSv. La plus forte dose engagée enregistrée est égale à 3,2 mSv.

Concernant l'exposition à la radioactivité naturelle, ce rapport présente également le bilan dosimétrique des personnels navigants de l'aviation civile, soumis au rayonnement cosmique, qui inclut les données de 21 195 travailleurs de 5 compagnies aériennes. La dose individuelle moyenne est stable par rapport à 2010 (2,0 mSv) et la dose individuelle maximale s'élève à 4,7 mSv.

ABSTRACT

The annual statistics of occupational radiation exposure includes all civilian or military activities under authorisation or declaration (i.e. medical and veterinary activities, nuclear

¹ La dose collective est la somme des doses individuelles reçues par un groupe de personnes données. A titre d'exemple, la dose collective de 10 personnes ayant reçu chacune 1 mSv est égale à 10 homme.mSv.

² Conformément au code du travail, les travailleurs exposés à plus de 6 mSv/an sont classés en catégorie A, ceux exposés à moins de 6 mSv/an en catégorie B.

³ En cas de contamination interne par un radionucléide, la dose dite engagée est celle délivrée sur toute la durée pendant laquelle le radionucléide est présent dans l'organisme. Par défaut, la période d'engagement considérée est de 50 ans.

industry, defence, non nuclear industry and research), as well as activities concerned by the enhanced exposure to natural radiation.

The number of workers monitored in activities under authorisation or declaration increased to 343 988 in the year 2011, i.e. 4% more than in 2010. In the same time, the collective dose of workers monitored with passive dosimetry increased to 64.2 man.Sv, i.e. 3% more than in 2010. The average annual individual dose is 0.19 mSv, which is very similar to the year 2010. Among the 14 035 workers having received more than 1 mSv (legal dose limit for the public), 1 929 workers (0.6%) received more than 6 mSv. Twelve workers received more than 20 mSv (dose limit for the workers in the French regulation). Important differences are observed between the occupational activities: in the medical and veterinary field (62% of the monitored workers) the average dose is low (0.1 mSv); the average doses in the nuclear field and in the non nuclear industry (29% of the monitored workers) are higher, respectively 0.37 and 0.52 mSv. In the research field, the average dose remains low, below 0.1 mSv. In 2011, 9 workers had a committed effective dose higher or equal to 1 mSv, the maximum dose being of 3.2 mSv.

The annual statistics also consider the results of aircrew dosimetry: in 2011, 21 195 aircrew members of 5 civilian airline companies received an averaged dose of 2.0 mSv, the maximum individual dose being equal to 4.7 mSv.

MOTS-CLES

Travailleurs, doses, bilan des expositions, secteurs d'activité, poste de travail, incidents

SOMMAIRE

1.	INTRODUCTION	13
2.	LA SURVEILLANCE DE L'EXPOSITION DES TRAVAILLEURS AUX RAYONNEMENTS IONISANTS	14
2.1.	Rappels réglementaires	14
2.2.	Modalités de la surveillance	15
2.2.1.	SURVEILLANCE DE L'EXPOSITION EXTERNE DANS LES ACTIVITES SOUMISES A AUTORISATION OU A DECLARATION.....	16
2.2.2.	SURVEILLANCE DE L'EXPOSITION INTERNE DANS LES ACTIVITES SOUMISES A AUTORISATION OU A DECLARATION.....	19
2.2.3.	SURVEILLANCE DE L'EXPOSITION AU RAYONNEMENT COSMIQUE.....	25
2.2.4.	CENTRALISATION DES RESULTATS DE LA SURVEILLANCE INDIVIDUELLE DES TRAVAILLEURS DANS SISERI.....	27
2.3.	Moyens et actions de l'IRSN en lien avec la surveillance de l'exposition des travailleurs	34
2.3.1.	ACTIONS DANS LE CADRE DE L'AGREMENT DES ORGANISMES.....	34
2.3.2.	SUIVI DES INCIDENTS ET EVENEMENTS DE RADIOPROTECTION.....	37
2.3.3.	AUTRES ACTIONS	37
3.	METHODOLOGIE SUIVIE POUR ETABLIR LE BILAN ANNUEL DE L'EXPOSITION DES TRAVAILLEURS AUX RAYONNEMENTS IONISANTS	40
3.1.	Bilan des expositions externes	40
3.2.	Bilan des expositions internes	41
3.3.	Vers l'utilisation de SISERI pour l'établissement du bilan annuel des expositions des professionnelles	43
4.	EXPOSITION DES TRAVAILLEURS AUX RAYONNEMENTS IONISANTS DANS LES ACTIVITES CIVILES SOUMISES A UN REGIME D'AUTORISATION OU DE DECLARATION ET DANS LES ACTIVITES DE DEFENSE	44
4.1.	Résultats généraux	45
4.1.1.	BILAN DES EXPOSITIONS EXTERNES	45
4.1.2.	BILAN DES EXPOSITIONS INTERNES	53
4.1.3.	DEPASSEMENTS DES LIMITES ANNUELLES REGLEMENTAIRES DE DOSE	58
4.1.4.	SUIVI DES EVENEMENTS ET INCIDENTS DE RADIOPROTECTION.....	60
4.2.	Exposition des travailleurs du domaine médical et vétérinaire	63
4.2.1.	BILAN DES EXPOSITIONS EXTERNES.....	63
4.2.2.	BILAN DES EXPOSITIONS INTERNES	68
4.2.3.	DEPASSEMENTS DES LIMITES ANNUELLES REGLEMENTAIRES DE DOSE	69
4.2.4.	SUIVI DES EVENEMENTS ET INCIDENTS DE RADIOPROTECTION.....	69
4.2.5.	CONNAISSANCE DES POSTES DE TRAVAIL.....	70
4.2.6.	CALCULS DE RADIOPROTECTION POUR LES BUNKERS DE RADIOTHERAPIE	72

4.3. Exposition des travailleurs du domaine nucléaire	77
4.3.1. BILAN DES EXPOSITIONS EXTERNES.....	77
4.3.2. BILAN DES EXPOSITIONS INTERNES	81
4.3.3. DEPASSEMENTS DES LIMITES ANNUELLES REGLEMENTAIRES DE DOSE	87
4.3.4. SUIVI DES EVENEMENTS ET INCIDENTS DE RADIOPROTECTION.....	88
4.4. Exposition des travailleurs du domaine industriel (non nucléaire)	91
4.4.1. BILAN DES EXPOSITIONS EXTERNES.....	91
4.4.2. BILAN DES EXPOSITIONS INTERNES	94
4.4.3. DEPASSEMENTS DES LIMITES ANNUELLES REGLEMENTAIRES DE DOSE	95
4.4.4. SUIVI DES EVENEMENTS ET INCIDENTS DE RADIOPROTECTION.....	95
4.5. Exposition des travailleurs du domaine de la recherche	97
4.5.1. BILAN DES EXPOSITIONS EXTERNES.....	97
4.5.2. BILAN DES EXPOSITIONS INTERNES	99
4.5.3. DEPASSEMENTS DES LIMITES ANNUELLES REGLEMENTAIRES DE DOSE	101
4.5.4. SUIVI DES EVENEMENTS ET INCIDENTS DE RADIOPROTECTION.....	101
5. EXPOSITION DES TRAVAILLEURS A LA RADIOACTIVITE NATURELLE	103
5.1. Industries « NORM »	103
5.1.1. BILANS DES ETUDES REÇUES.....	103
5.1.2. BILAN DES ANALYSES REALISEES PAR L'IRSN.....	104
5.2. Radon	106
5.3. Exposition au rayonnement cosmique	108
6. ENJEUX ACTUELS EN RADIOPROTECTION.....	110
6.1. Zonage radiologique	110
6.2. Evaluation du débit d'équivalent de dose en champs pulsés.....	111
6.3. Conséquences de l'abaissement de la limite de dose au cristallin	111
6.4. Surveillance de l'exposition interne aux radionucléides de période courte	112
6.5. Harmonisation des pratiques en Europe : participation aux travaux du groupe HERCA.....	113
6.6. Actions liées à l'accident de Fukushima réalisées auprès des travailleurs	113
7. CHIFFRES CLEFS DE LA SURVEILLANCE DES EXPOSITIONS PROFESSIONNELLES AUX RAYONNEMENTS IONISANTS.....	116
8. CONCLUSIONS.....	117
9. REFERENCES	119
ANNEXE I : NOMENCLATURE DES SECTEURS D'ACTIVITE	121

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Tableau 1 - Valeurs limites d'exposition	14
Tableau 2 - Panorama des dosimètres externes passifs utilisés en France en 2011	19
Tableau 3 - Limites de détection observées pour les principales techniques de dosimétrie interne mises en œuvre en France en 2011	24
Tableau 4 - Bilan synthétique des doses externes passives - 2011	45
Tableau 5 - Répartition entre port mensuel et port trimestriel suivant les domaines d'activité	47
Tableau 6 - Exposition interne : surveillance de routine dans les différents domaines d'activité en 2011	54
Tableau 7 - Exposition interne : surveillance spéciale ou de contrôle dans les différents domaines d'activité en 2011	56
Tableau 8 - Dépassements des limites annuelles réglementaires de doses : bilan 2011	58
Tableau 9 - Evolution des événements « travailleurs » sur la période 2004 - 2011	61
Tableau 10 - Surveillance de l'exposition externe (toutes composantes de rayonnements) dans le domaine médical et vétérinaire	64
Tableau 11 - Surveillance de routine par des analyses radiotoxicologiques urinaires dans le domaine médical et vétérinaire	68
Tableau 12 - Examens réalisées à la suite d'un incident ou d'une suspicion de contamination (surveillance spéciale ou de contrôle) dans le domaine médical et vétérinaire	68
Tableau 13 - Répartition des événements « travailleurs » du domaine médical selon les secteurs d'activité	69
Tableau 14 - Valeurs estimées des doses efficaces annuelles (en mSv) aux points V et P pour un accélérateur de 25 MV, d'après le calcul analytique et d'après la simulation de Monte Carlo	74
Tableau 15 - Surveillance de l'exposition externe (toutes composantes de rayonnements) dans le domaine nucléaire	78
Tableau 16 - Secteur d'activité de rattachement des établissements intervenant dans le domaine du nucléaire (exposition interne)	82
Tableau 17 - Surveillance de routine par des analyses radiotoxicologiques urinaires dans le domaine du nucléaire	83
Tableau 18 - Surveillance de routine par des analyses radiotoxicologiques des selles dans le domaine du nucléaire	84
Tableau 19 - Surveillance de routine par des analyses radiotoxicologiques de prélèvements nasaux dans le domaine du nucléaire	84
Tableau 20 - Surveillance de routine par des examens anthroporadiométriques dans le domaine du nucléaire	85
Tableau 21 - Bilan détaillé des mesures anthroporadiométriques réalisées par EDF pour les travailleurs des centrales nucléaires suivis en 2011	86
Tableau 22 - Examens réalisés à la suite d'un incident ou d'une suspicion de contamination (surveillance spéciale ou de contrôle) dans le domaine du nucléaire	87
Tableau 23 - Répartition des événements ayant impliqué des travailleurs dans les différents secteurs d'activité du nucléaire	88
Tableau 24 - Événements du domaine nucléaire en fonction des critères de l'annexe 7 du guide de déclaration ASN concernant les INB et le transport de matières radioactives	89
Tableau 25 - Surveillance de l'exposition externe (toutes composantes de rayonnements) dans l'industrie non nucléaire	92
Tableau 26 - Surveillance de routine par des analyses radiotoxicologiques urinaires dans l'industrie non nucléaire	94
Tableau 27 - Examens réalisés à la suite d'un incident ou d'une suspicion de contamination (surveillance spéciale ou de contrôle) dans l'industrie non nucléaire	95
Tableau 28 - Répartition des événements du domaine industriel non nucléaire suivant les secteurs d'activité	95
Tableau 29 - Surveillance de l'exposition externe (toutes composantes de rayonnements) dans le domaine de la recherche	98
Tableau 30 - Surveillance de routine par des analyses radiotoxicologiques urinaires dans le domaine de la recherche	100
Tableau 31 - Surveillance de routine par des examens anthroporadiométriques dans le domaine de la recherche	100

Tableau 32 - Examens réalisées à la suite d'un incident ou d'une suspicion de contamination (surveillance spéciale ou de contrôle) dans le domaine de la recherche.....	101
Tableau 33 - Doses efficaces ajoutées compilées par l'IRSN (période 2005-2011)	105
Tableau 34 - Bilan 2011 des doses individuelles annuelles des personnels navigants de l'aviation civile (compagnies Air France, Regional, Air Calédonie International, Unijet et DARTA) .	108
Tableau 35 - Bilan 2011 des doses individuelles annuelles des personnels navigants de l'aviation militaire	109
Figure 1 - Seuils utilisés pour la surveillance de l'exposition interne des travailleurs.....	23
Figure 2 - Le système SISERI	29
Figure 3 - Répartition par domaine d'activité des établissements ayant transmis des données de dosimétrie opérationnelle en 2011, avec le détail de la répartition par secteur d'activité dans le domaine médical et vétérinaire.....	30
Figure 4 - Répartition par secteur d'activité des données de dosimétrie opérationnelle transmises à SISERI en 2011	31
Figure 5 - Progression du nombre de personnes compétentes en radioprotection (PCR) et de médecins du travail (MDT) ayant accès à SISERI depuis sa mise en service	32
Figure 6 - Répartition par secteur d'activité des personnes compétentes en radioprotection (PCR) ayant accès à SISERI en 2011	32
Figure 7 - Fantôme anthropomorphe COU (RDS).....	36
Figure 8 - Répartition des effectifs surveillés et des doses collectives pour la dosimétrie des neutrons en 2011	48
Figure 9 - Evolution des effectifs surveillés et de la dose collective, de 1996 à 2011	49
Figure 10 - Evolution des effectifs surveillés et des doses collectives pour l'exposition spécifique aux neutrons de 2005 à 2011.....	49
Figure 11 - Importance relative de la surveillance de l'exposition aux extrémités par dosimétrie par bague ou au poignet en 2011, suivant les domaines d'activité	51
Figure 12 - Répartition des effectifs surveillés et des doses enregistrées pour la dosimétrie bague en 2011	52
Figure 13 - Répartition des effectifs surveillés et des doses enregistrées pour la dosimétrie au poignet en 2011	52
Figure 14 - Nombre d'examens suivant les types d'analyses mises en œuvre pour assurer la surveillance de l'exposition interne dans les grands domaines d'activité en 2011 (surveillance de routine)	54
Figure 15 - Evolution du nombre d'examens réalisés dans le cadre de la surveillance de routine entre 2006 et 2011 (tous secteurs d'activité confondus).....	55
Figure 16 - Evolution, de 2006 à 2011, du nombre de travailleurs ayant une dose engagée supérieure à 1 mSv	57
Figure 17 - Evolution, de 1996 à 2011, du nombre de travailleurs surveillés dont la dose externe annuelle est supérieure à 20 mSv	59
Figure 18 - Répartition par domaine d'activité du nombre de travailleurs surveillés dont la dose externe annuelle est supérieure à 20 mSv (période 2004-2011)	59
Figure 19 - Répartition des événements « travailleurs » selon les domaines d'activité.....	60
Figure 20 - Evolution de l'effectif surveillé et de la dose collective dans le domaine des activités médicales et vétérinaires (période 1996-2011).....	66
Figure 21 - Répartition des doses enregistrées pour la dosimétrie bague en 2011 dans le domaine des activités médicales et vétérinaires.....	67
Figure 22 - Dose équivalente (μ Sv) reçue aux extrémités (au doigt le plus exposé) par tâche pour 1 GBq de fluor 18 manipulé	71
Figure 23 - Plan d'un projet de construction d'un bunker de radiothérapie, avec une chicane courte et des percements droits du linteau au-dessus de la porte d'entrée pour le passage de deux conduits de ventilation : vue de haut (gauche), coupes verticales A-A (milieu) et B-B (droite)	73
Figure 24 - Coupe verticale d'un bunker pour un projet de construction de deux bunkers de radiothérapie selon le système de murs « sandwichs »	75
Figure 26 - Répartition des doses enregistrées en 2011 pour la dosimétrie neutrons dans le nucléaire civil et militaire	80
Figure 27 - Evolution de l'effectif surveillé et de la dose collective dans le nucléaire civil et militaire (période 1996-2011).....	80
Figure 28 - Répartition des analyses réalisées dans le domaine du nucléaire (surveillance de routine).....	83

Figure 29 - Evolution de l'effectif surveillé et des doses collectives dans l'industrie non nucléaire (période 1996-2011)	93
Figure 30 - Evolution de l'effectif surveillé et des doses collectives dans le domaine de la recherche (période 1996-2011)	99
Figure 31 - Répartition des examens réalisés dans le domaine de la recherche (surveillance de routine)	100
Figure 32 - Vues du laboratoire mobile d'anthroporadiamétrie LMA.....	112
Figure 33 - Vues du laboratoire mobile d'anthroporadiamétrie VLA	113
Figure 34 - Répartition des examens anthroporadiométriques réalisés entre le 14 mars 2011 et le 19 décembre 2011 en fonction des activités des personnes mesurées.....	114

PRINCIPALES ABREVIATIONS

AFNOR : Association française de normalisation
ASN : Autorité de Sûreté Nucléaire
CEA : Commissariat à l'Énergie Atomique et aux énergies alternatives
CEI : Commission Electrotechnique Internationale
CIPR : Commission Internationale de Protection Radiologique
CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique
COFRAC : Comité Français d'Accréditation
DAM : Direction des Applications Militaires du CEA
DGT : Direction Générale du Travail
DSND : Délégué à la Sûreté Nucléaire et à la radioprotection pour les activités et installations intéressant la Défense
HERCA : Heads of the European Radiological protection Competent Authorities
INES : International Nuclear Event Scale
INB : Installation Nucléaire de Base
INBS : Installation Nucléaire de Base Secrète
INRA : Institut National de la Recherche Agronomique
INSERM : Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale
IPHC : Institut Pluridisciplinaire Hubert CURIE
IPN : Institut de Physique Nucléaire d'Orsay
IRSN : Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
ISO : International Standard Organization
LBM : Laboratoire de Biologie Médicale
LAMR : Laboratoire d'Analyses Médicales Radiotoxicologiques de l'IRSN
LDI : Laboratoire de Dosimétrie de l'IRSN
MDT : Médecin du Travail
NORM : Naturally Occuring Radioactive Materials
OSL : Optically Stimulated Luminescence
PCR : Personne Compétente en Radioprotection
RNIPP : Répertoire National d'Identité des Personnes Physiques
RPL : RadioPhotoLuminescent dosemeter
SISERI : Système d'Information de la Surveillance de l'Exposition aux Rayonnements Ionisants
SPRA : Service de Protection Radiologique des Armées
SST : Service de Santé au Travail
TLD : ThermoLuminescent Dosemeter

1. INTRODUCTION

L'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) a été créé par la loi n° 2001-398 du 9 mai 2001 ; ses missions ont été précisées par le décret n° 2002-254 du 22 février 2002, modifié le 7 avril 2007 pour tenir compte de la loi n° 2006-686 du 13 juin 2006, relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire. Comme les agences de sécurité sanitaire, l'Institut joue un rôle actif dans le domaine de l'évaluation des risques pour la santé humaine. Il a, entre autres missions, celle d'information du public dans ses domaines de compétences : les risques nucléaires et radiologiques.

L'Institut, qui rassemble plus de 1700 salariés parmi lesquels de nombreux experts, ingénieurs et chercheurs de compétences variées (physiciens, chimistes, géologues, médecins, biologistes, épidémiologistes...), réalise des recherches, des expertises et des travaux afin de maîtriser les risques associés aux sources de rayonnements ionisants utilisées dans l'industrie, la recherche ou la médecine, ou encore aux rayonnements naturels. Plus précisément, l'IRSN exerce ses missions d'expertise et de recherche dans les domaines suivants :

- la sûreté des installations nucléaires, y compris celles intéressant la défense,
- la sûreté des transports de matières nucléaires et fissiles,
- **la protection des travailleurs** et de la population contre les rayonnements ionisants,
- la protection de l'environnement contre les rayonnements ionisants,
- la protection et le contrôle des matières nucléaires et des produits susceptibles de concourir à la fabrication d'armes,
- la protection des installations et des transports contre les actions de malveillance.

Des activités de recherche, souvent réalisées dans le cadre de programmes internationaux, permettent à l'IRSN de maintenir et de développer son expertise et d'asseoir sa position internationale de spécialiste des risques dans ses domaines de compétence, en particulier celui de la radioprotection des travailleurs.

Dans ce domaine, l'IRSN apporte un appui technique au ministère chargé du travail [Direction Générale du Travail (DGT)], à l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) ainsi qu'au Délégué à la sûreté nucléaire et à la radioprotection pour les activités et installations intéressant la défense (DSND). L'Institut mène également des études pour ses propres besoins d'expertise ou pour répondre à des demandes extérieures.

Au titre de sa mission de veille permanente en matière de radioprotection, l'IRSN assure une surveillance de l'exposition des travailleurs aux rayonnements ionisants. L'objet de ce document est de présenter le bilan des expositions professionnelles établi par l'IRSN pour l'année 2011, compte tenu notamment de la nature des activités professionnelles, conformément aux dispositions de l'article R. 4451-128 du code du travail.

2. LA SURVEILLANCE DE L'EXPOSITION DES TRAVAILLEURS AUX RAYONNEMENTS IONISANTS

2.1. RAPPELS REGLEMENTAIRES

Conformément aux dispositions du code du travail (articles R.4451-1 et 2), une surveillance de l'exposition des travailleurs aux rayonnements ionisants est mise en œuvre dès lors que ceux-ci sont susceptibles d'être exposés à un risque dû aux rayonnements ionisants résultant :

- d'activités nucléaires soumises à un régime d'autorisation ou de déclaration ;
- de la présence sur le lieu de travail de radionucléides naturels non utilisés pour leurs propriétés radioactives ;
- de la présence de rayonnements cosmiques.

Cette surveillance s'applique à tous les travailleurs, salariés ou non salariés (article R.4451-9 du code du travail).

A des fins de mise en place de la surveillance du travailleur, l'employeur procède à une analyse des postes de travail qui est renouvelée périodiquement et qui doit comprendre une étude dosimétrique de ces postes (article R.4451-11 du code du travail). Sur la base de ces analyses, l'employeur procède au classement du travailleur. Le travailleur susceptible de recevoir, dans les conditions habituelles de travail, une dose efficace supérieure à 6 mSv par an ou une dose équivalente supérieure aux 3/10^{èmes} des limites annuelles d'exposition est classé en catégorie A, sinon il est classé en catégorie B (articles R.4451-44 et 46 du code du travail).

Dès lors qu'il est classé en catégorie A ou B, le travailleur bénéficie d'un suivi dosimétrique individuel et d'une surveillance médicale renforcée. Le suivi dosimétrique individuel a notamment pour objectif de vérifier que le travailleur ne dépasse pas l'une des limites annuelles réglementaires de dose.

Les limites annuelles applicables en France (articles R.4451-12 et 13 du code du travail) sont rappelées dans le tableau 1.

Tableau 1 - Valeurs limites d'exposition

	Corps entier (Dose efficace)	Main, poignet, pied, cheville (Dose équivalente)	Peau (Dose équivalente sur tout cm ²)	Cristallin (Dose équivalente)
Travailleur	20 mSv	500 mSv	500 mSv	150 mSv
Jeune travailleur (de 16 à 18 ans)	6 mSv	150 mSv	150 mSv	45 mSv

Le suivi dosimétrique individuel est obligatoirement mensuel pour les travailleurs classés en catégorie A ; il est soit trimestriel, soit mensuel pour ceux classés en catégorie B (arrêté du 30 décembre 2004 relatif à la carte individuelle de suivi médical et aux informations individuelles de dosimétrie des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants). Il doit être adapté au type de risque d'exposition

du travailleur (article R. 4451-62 du code du travail). Lorsque le travailleur est exposé à un risque d'exposition externe, il est suivi par une dosimétrie externe passive. Il ne doit être doté que d'un seul type de dosimètre passif par type de rayonnement mesuré et par période de port. La mesure de rayonnements de nature différente peut rendre nécessaire le port simultané de plusieurs dosimètres qui, lorsque cela est techniquement possible, sont rassemblés dans un même conditionnement. Selon les circonstances de l'exposition, et notamment lorsque celle-ci n'est pas homogène, le port de dosimètres supplémentaires doit permettre d'évaluer les doses équivalentes à certains organes ou parties du corps (tête, poignet, main, pied, doigt, abdomen, cristallin, etc.) et de contrôler ainsi le respect des valeurs limites de doses équivalentes fixées aux articles R. 4451-12 et 13 du code du travail. Lorsque le travailleur est exposé à un risque d'exposition interne, le suivi est effectué par des mesures radiotoxicologiques et/ou anthroporadiométriques qui permettent *in fine*, le cas échéant, de calculer la dose efficace engagée.

Le personnel navigant exposé à un risque d'exposition externe dû aux rayonnements cosmiques, dont l'évaluation sur un an montre que cette exposition est susceptible de dépasser 1 mSv par an, est suivi au moyen d'une dosimétrie calculée (arrêté du 8 décembre 2003 fixant les modalités de mise en œuvre de la protection contre les rayonnements ionisants des travailleurs affectés à l'exécution de tâches à bord d'aéronefs en vol). Enfin, les travailleurs susceptibles d'être exposés au radon doivent avoir un suivi individuel de leur exposition, dès lors que les mesures d'activité volumique du radon dans l'ambiance de travail dépassent 1 000 Bq/m³ (Arrêté du 8 décembre 2008 portant homologation de la décision 2008-DC-0110 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 26 septembre 2008 relative à la gestion du risque lié au radon dans les lieux de travail). S'agissant de la surveillance des travailleurs exposés à la radioactivité naturelle renforcée (industries NORM⁴), celle-ci doit être mise en place dès lors qu'ils sont susceptibles d'être exposés à une dose annuelle supérieure à 1 mSv.

2.2. MODALITES DE LA SURVEILLANCE

La dosimétrie individuelle doit être adaptée au poste de travail en permettant l'évaluation « aussi correcte que raisonnablement possible » des doses reçues par le travailleur affecté à ce poste, compte tenu des situations d'exposition et des contraintes existantes :

- La dosimétrie externe consiste à estimer les doses reçues par une personne exposée dans un champ de rayonnements ionisants (rayons X, gamma, bêta, neutrons) générés par une source extérieure à la personne. Cette estimation est réalisée :
 - au moyen de dosimètres passifs portés par les travailleurs sur une période mensuelle ou trimestrielle et adaptés aux différents types de rayonnements, qui permettent de connaître la dose reçue par le corps entier (dosimètres portés à la poitrine) ou par une partie du corps (peau, doigts, cristallin), en différé après lecture par un organisme de dosimétrie agréé. Par ailleurs, lorsque le travailleur intervient dans une zone réglementée contrôlée, il doit en outre porter un dosimètre électronique (dosimétrie active ou opérationnelle) ;

⁴ NORM : Naturally Occurring Radioactive Material (Cf. § 5.1)

- par le calcul, pour ce qui concerne les doses de rayonnements cosmiques reçues en vol par les personnels navigants, au moyen du système SIEVERT (§ 2.2.3).
- La dosimétrie interne vise à évaluer la dose reçue à la suite d'une incorporation de substances radioactives. En milieu professionnel, la surveillance individuelle est assurée par des examens anthroporadiométriques (mesures directes de la contamination interne corporelle) et des analyses radiotoxicologiques (dosages réalisés sur des excréta). Lorsque l'exposition est avérée et jugée significative, un calcul de dose est réalisé.

Il existe une différence importante entre le suivi de l'exposition externe et le suivi de l'exposition interne. Le suivi de l'exposition externe repose sur des mesures directes et bien standardisées (en dehors du cas particulier des personnels navigants pour qui la dose est évaluée par un calcul). Dans tous les cas, la détermination de la dose externe est possible. Le suivi de l'exposition interne a davantage pour but de vérifier l'absence de contamination que d'estimer systématiquement la dose interne, le calcul de la dose engagée impliquant une démarche plus complexe qui fait intervenir de nombreux paramètres souvent déterminés avec une incertitude importante. Ce calcul n'est par conséquent réalisé que dans les cas où la contamination mesurée est jugée significative (Cf. § 2.2.2.3).

En application de l'article R. 4451-64 du code du travail, les mesures ou les calculs nécessaires à la surveillance de référence des travailleurs exposés sont réalisés par l'un des organismes suivants :

- l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire ;
- un service de santé au travail titulaire d'un certificat d'accréditation ;
- un organisme ou un laboratoire de biologie médicale (LBM) titulaire d'un certificat d'accréditation et agréé par l'Autorité de sûreté nucléaire.

2.2.1. SURVEILLANCE DE L'EXPOSITION EXTERNE DANS LES ACTIVITES SOUMISES A AUTORISATION OU A DECLARATION

2.2.1.1. Les organismes de dosimétrie individuelle

A la fin de l'année 2011, les organismes ayant un agrément pour la surveillance individuelle de l'exposition externe des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants sont au nombre de 8 : ALGADE, AREVA NC La Hague, AREVA NC Marcoule, DOSILAB, IPHC de Strasbourg, IPN d'Orsay, LANDAUER Europe, et le SPRA. A ces organismes s'ajoute le laboratoire de l'IRSN non soumis à agrément. Leurs coordonnées sont disponibles sur le site internet SISERI (www.irsn.fr/SISERI/index.php?page=information/agrement).

2.2.1.2. Les différentes techniques

Les techniques utilisées en 2011 sont les suivantes :

- Le dosimètre thermoluminescent (TLD)

De manière simplifiée, la thermoluminescence est la propriété que possèdent certains matériaux (le fluorure de lithium par exemple) de libérer, lorsqu'ils sont chauffés, une quantité de lumière qui est proportionnelle à la dose de rayonnements ionisants à laquelle ils ont été exposés. La mesure de cette quantité de lumière permet, moyennant un étalonnage préalable, de déterminer la dose de rayonnements ionisants absorbée par le matériau thermoluminescent. Le dosimètre TLD permet de détecter les rayonnements X, γ , β , et les neutrons moyennant l'utilisation de matériaux appropriés.

- Le dosimètre basé sur la luminescence stimulée optiquement (OSL)

La technologie OSL, tout comme pour le TLD, repose sur le principe de lecture d'une émission de lumière par le matériau irradié, mais après une stimulation par diodes électroluminescentes au lieu du chauffage. Contrairement au TLD, l'OSL autorise la relecture du dosimètre. En effet, comme seule une petite fraction du dosimètre est stimulée, les dosimètres OSL peuvent être ré-analysés plusieurs fois. Les dosimètres OSL sont sensibles aux rayonnements X, γ et β .

- Le dosimètre utilisant la radio photo luminescence (RPL)

Dans le cas de la technologie RPL, les rayonnements ionisants incidents arrachent des électrons à la structure d'un détecteur en verre. Ces électrons sont ensuite piégés par des impuretés contenues dans le verre. Il suffit alors de placer le dosimètre sous un faisceau ultra-violet pour obtenir une « désexcitation » et donc une émission de lumière proportionnelle à la dose. Ce dosimètre offre également des possibilités de relecture. Il permet la détection des rayonnements X, γ et β .

- Le détecteur solide de traces

Ce dosimètre est l'une des deux techniques de dosimétrie des neutrons les plus utilisées, l'autre étant la technique TLD (Cf. plus haut). Le détecteur solide de traces (plastique dur, en général du CR-39⁵) est inséré dans un étui muni d'un « radiateur » qui, suivant sa composition, permet la détection des neutrons sur une large gamme d'énergie.

⁵ Columbia Resin 39

Surveillance de l'exposition aux neutrons

Cette surveillance concerne en France un peu plus de 10 % de l'effectif total surveillé par dosimétrie externe passive. Ces travailleurs interviennent principalement dans différents secteurs d'activité du nucléaire (fabrication et retraitement du combustible, décontamination des châteaux de transport du combustible irradié,...) mais une exposition aux neutrons est également possible auprès d'accélérateurs de particules utilisés dans le domaine médical, la recherche ou l'industrie, lorsque l'énergie de ces particules est élevée.

Les neutrons produisent des effets biologiques plus importants que les rayonnements X et γ pour une dose donnée, et contrairement à ces derniers, les effets des neutrons sont fortement dépendants de leur énergie (d'un facteur 5 à 20 selon les énergies). Suivant les postes de travail, la gamme d'énergie des neutrons auxquels peuvent être exposés les travailleurs est très étendue : de 10^{-3} à 10^8 eV. A ceci s'ajoute le fait que, de par leur nature, les neutrons ne sont pas aisément détectables.

Jusqu'en 2000, la dosimétrie des neutrons avait le statut de « dosimétrie complémentaire » et ce n'est qu'ensuite que les valeurs de dose issues des rayonnements photoniques et neutroniques ont commencé à être comptabilisées séparément. De la même façon, les techniques de dosimétrie des neutrons ont évolué au cours du temps. A partir de 2004, les détecteurs solides de traces nucléaires commencent à être utilisés, remplaçant peu à peu les « dosimètres à bulles » considérés comme peu fiables du fait de leur grande sensibilité aux conditions environnementales.

Aujourd'hui, les deux techniques utilisées pour la dosimétrie passive des neutrons sont (Cf. tableau 2) :

- les dosimètres à albédo qui utilisent des détecteurs thermoluminescents. Fortement dépendants du spectre en énergie des neutrons, leur utilisation doit être réservée aux lieux de travail où le spectre neutronique est bien connu et stable ;
- les dosimètres à détection solide de traces nucléaires.

Parallèlement, les travailleurs doivent, lors de toute intervention en zone contrôlée, être équipés d'un dosimètre opérationnel (électronique) permettant également la détection des neutrons.

2.2.1.3. Le seuil d'enregistrement des doses externes passives

La réglementation⁶ fixe les règles de mise en œuvre de la dosimétrie externe passive. Elle impose notamment l'utilisation de grandeurs opérationnelles⁷, à savoir les équivalents de dose individuels $H_p(10)$, $H_p(0,07)$ et $H_p(3)$, qui correspondent respectivement à la mesure de dose en profondeur dans les tissus (risque d'exposition du corps entier), à la mesure de dose à la peau (risque d'exposition de la peau et des extrémités) et à la mesure de la dose au cristallin, même si cette dernière n'est pas encore mise concrètement en œuvre, faute de dispositifs parfaitement adaptés.

⁶ Arrêté du 30 décembre 2004 relatif à la carte individuelle de suivi médical et aux informations individuelles de dosimétrie des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants.

⁷ Selon les recommandations de l'ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements).

Selon la réglementation, le seuil d'enregistrement (plus petite dose non nulle enregistrée) ne peut être supérieur à 0,1 mSv et le pas d'enregistrement ne peut être supérieur à 0,05 mSv (valeurs applicables depuis le 1^{er} janvier 2008). Le seuil d'enregistrement est à distinguer de la notion de seuil de détection du dosimètre qui caractérise la valeur à partir de laquelle, compte-tenu des performances techniques du dosimètre, la valeur mesurée est considérée comme valide.

Tableau 2 - Panorama des dosimètres externes passifs utilisés en France en 2011

Secteur d'activité ou établissement	Dosimètres corps entier	Seuil* (en mSv)	Dosimètres poignets	Seuil* (en mSv)	Dosimètres Bagues	Seuil* (en mSv)
ALGADE	X et γ : TLD	0,1	-	-	-	-
AREVA NC La Hague	X, β , γ et neutrons : TLD	0,1 (0,34 pour neutrons)	X, β , γ et neutrons : TLD	0,1 (pour photons)	-	-
AREVA NC Marcoule	X, β , γ et neutrons : TLD	0,1 (0,33 pour neutrons)	X, β , γ et neutrons : TLD	0,5	-	-
DOSILAB	X, β , γ : TLD	0,1	X, β , γ : TLD	0,1	X, β , γ : TLD	0,1
IPHC	X, β , γ : RPL	0,1	X, β , γ : RPL	0,1	-	-
IPN	X, β , γ : RPL	0,05	-	-	-	-
	Neutrons : détecteur solide de traces	0,1	-	-	-	-
IRSN	X, β , γ : RPL	0,05	X, β , γ : TLD	0,1	X, β , γ : TLD	0,1
	Neutrons : détecteur solide de traces	0,1	Neutrons : détecteur solide de traces	0,1		
LANDAUER EUROPE	X, β , γ : OSL	0,05	X, β , γ : OSL	0,1	X, β , γ : TLD	0,1
	Neutrons : détecteur solide de traces (standard ⁸ ou équipé d'un radiateur en téflon ⁹)	0,1	Neutrons : détecteur solide de traces	0,1	-	-
SPRA	X, β , γ : OSL	0,1	X, β , γ : OSL	0,1	-	-
	Neutrons : détecteur solide de traces	0,2	-	-	-	-

* Ce seuil correspond à la valeur minimale de dose enregistrée (seuil d'enregistrement retenu par le laboratoire).

2.2.2. SURVEILLANCE DE L'EXPOSITION INTERNE DANS LES ACTIVITES SOUMISES A AUTORISATION OU A DECLARATION

La surveillance de l'exposition interne concerne les personnels travaillant dans un environnement susceptible de contenir des substances radioactives (manipulation de sources non scellées, opérations de décontamination,...). Les voies possibles d'incorporation de ces composés radioactifs sont l'inhalation, l'ingestion, la pénétration transcutanée et la blessure. L'irradiation des tissus et des organes se poursuit tant que le radionucléide est présent dans l'organisme. De ce fait, l'exposition interne est appréciée en évaluant la dose engagée reçue en 50 ans (pour un adulte) au niveau d'un organe, d'un tissu ou de l'organisme entier par suite de l'incorporation d'un ou plusieurs radionucléides.

En pratique, sont concernés les travailleurs des installations nucléaires des domaines civil et militaire, des services de médecine nucléaire et des laboratoires de recherche utilisant des traceurs

⁸ Mesure des neutrons intermédiaires et rapides.

⁹ Permettant la mesure supplémentaire des neutrons thermiques.

radioactifs (recherche médicale, radiopharmaceutique et biologique essentiellement). La surveillance des personnels travaillant dans des installations nucléaires est assurée par les services de santé au travail (SST). Dans le domaine nucléaire, les analyses prescrites sont effectuées par les laboratoires de biologie médicale (LBM) - ou par les SST dans certains cas - des entreprises exploitantes : défense, CEA, AREVA, EDF. S'agissant des professionnels du domaine médical et de la recherche, les examens prescrits par les médecins du travail sont pour la plupart réalisés par l'IRSN.

La surveillance individuelle de l'exposition interne est mise en œuvre par le chef d'établissement dès lors qu'un travailleur opère dans une zone surveillée ou contrôlée où il existe un risque de contamination. Le choix et la périodicité des examens sont déterminés par le médecin du travail, en fonction de la nature et du niveau de l'exposition, ainsi que des radionucléides en cause. Cette surveillance consiste soit en des examens anthroporadiométriques qui permettent une mesure *in vivo* directe de l'activité des radionucléides présents dans l'organisme, soit en des analyses radiotoxicologiques, c'est-à-dire des dosages de l'activité des radionucléides présents dans des échantillons d'excrétas (urines, fèces, prélèvements nasaux par mouchages). Ces techniques ne sont pas nécessairement exclusives et peuvent être mises en œuvre conjointement pour un meilleur suivi de l'exposition. Des considérations pratiques doivent également être prises en compte : par exemple, le fait que l'examen anthroporadiométrique nécessite de faire déplacer le travailleur vers l'installation fixe de mesure. Les mesures peuvent être réalisées à intervalle régulier, à l'occasion d'une manipulation inhabituelle ou encore en cas d'incident. La norme ISO 20553 [1] définit les programmes optimaux de surveillance individuelle : de routine (ou systématique), spéciale, de contrôle et de chantier.

Dans la grande majorité des cas, la mesure vise davantage à s'assurer de l'absence de contamination chez le travailleur qu'à calculer une dose interne. Le cas échéant, le calcul de la dose engagée est réalisé sous la responsabilité du médecin du travail, à partir des résultats des mesures anthroporadiométriques et des analyses radiotoxicologiques, grâce à des modèles tenant compte de la répartition du radionucléide dans l'organisme et de son devenir en fonction du temps (Cf. § 2.2.2.3).

2.2.2.1. Les organismes impliqués dans la surveillance de l'exposition interne

A la fin de l'année 2011, les LBM ayant un agrément pour la surveillance individuelle de l'exposition interne des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants (radiotoxicologie et/ou anthroporadiométrie) sont au nombre de 9 : AREVA NC La Hague, CEA Cadarache, CEA DAM Ile-de-France, CEA DAM Valduc, CEA Grenoble, CEA Marcoule, CEA Saclay, EDF Saint-Denis et le SPRA. Les agréments sont délivrés sur décision de l'ASN pour une durée de 5 ans maximum.

A ces organismes s'ajoutent les laboratoires de l'IRSN et les services de santé au travail (SST), non soumis à agrément.

2.2.2.2. Les méthodes de mesure de contamination

Les examens anthroporadiométriques

L'anthroporadiométrie consiste à quantifier l'activité retenue à un instant donné dans l'organisme entier ou dans un organe spécifique (poumons, thyroïde, etc.) en détectant les rayonnements X ou γ associés à la désintégration du(es) radionucléide(s) incorporé(s). Les mesures du corps entier sont particulièrement bien adaptées aux émetteurs de rayonnements d'énergie supérieure à 200 keV (produits de fission et d'activation). Les mesures pulmonaires des émetteurs de rayonnements X et γ de basse énergie permettent de déterminer la rétention d'activité en cas d'exposition aux actinides (le plutonium 239 par exemple) ; cette technique reste cependant limitée par sa faible sensibilité. Enfin, la mesure thyroïdienne à l'aide de détecteurs spécifiques est mise en œuvre pour les isotopes de l'iode.

Les mesures anthroporadiométriques sont réalisées dans des cellules blindées, afin de réduire le bruit de fond radiatif ambiant, à l'aide de systèmes de mesure possédant un ou plusieurs détecteurs. Il s'agit soit de détecteurs semi-conducteurs de type Germanium Hyper Pur (Ge HP), soit de détecteurs à scintillation de type iodure de sodium dopé au thallium (NaI(Tl)).

L'identification des radionucléides présents est obtenue en comparant, à des énergies caractéristiques, les pics d'absorption totale à ceux des spectres des radionucléides enregistrés dans les bibliothèques de données nucléaires. L'activité est déterminée par comparaison entre l'aire des pics obtenus lors des mesures de personnes et les valeurs de référence obtenues lors de mesures de fantômes anthropomorphes utilisés pour l'étalonnage du système de détection. Cette technique est donc sensible à l'étalonnage : celui en énergie, réalisé à l'aide de sources étalons, et celui en efficacité, réalisé à l'aide de fantômes anthropomorphes dans lesquels on place des sources d'activité connue.

Les analyses radiotoxicologiques

Les analyses radiotoxicologiques ont pour objet la mesure de la concentration d'activité présente dans un échantillon d'excréta. Les échantillons sont le plus souvent constitués de prélèvements d'urines, de selles ou de mucus nasal. Il faut préciser que l'analyse des prélèvements nasaux n'a pas vocation à être utilisée dans le cadre d'une estimation dosimétrique ; il s'agit essentiellement d'une méthode de dépistage. Des analyses à partir d'échantillons sanguins, salivaires ou de phanères peuvent également être réalisées.

Les émetteurs α peuvent être détectés par comptage α global ou par spectrométrie α . Le comptage α réalisé à l'aide de compteurs proportionnels à gaz ou de détecteurs à scintillation (ZnS) permet de déterminer rapidement le niveau d'activité, dans le contexte d'un incident par exemple. Seule la spectrométrie α permet de réaliser une analyse isotopique de l'échantillon, à l'aide d'un détecteur composé d'une diode en silicium ou d'un compteur à gaz. Pour cela, l'échantillon d'excréta subit préalablement un traitement radiochimique comprenant la minéralisation de l'échantillon, une purification chimique (chromatographie de partage ou résine anionique) et une fabrication des sources en couche mince, indispensable pour minimiser l'atténuation énergétique des particules α que l'on cherche à détecter. Certains laboratoires utilisent également des méthodes non

radiométriques (techniques de mesures pondérales ou spectrométrie de masse pour la mesure de l'uranium notamment) qui sont des méthodes rapides permettant un tri en cas d'incident ou de suspicion de contamination.

Les émetteurs β sont principalement mesurés par scintillation liquide. Cette méthode consiste à mélanger l'échantillon à analyser avec un liquide scintillant. L'émission des particules β provoque l'excitation de certains atomes du milieu scintillant. Lors de leur retour à l'état fondamental, ces atomes émettent des photons qui peuvent être détectés. Suivant le radionucléide considéré, cette méthode est mise en œuvre directement ou à la suite d'une précipitation sélective. Les émetteurs β peuvent également être mesurés à l'aide d'un compteur proportionnel après une étape préalable de séparation chimique du radionucléide.

Les émetteurs X et γ sont détectés par spectrométrie directe à l'aide d'un détecteur au germanium ou à l'iodure de sodium, suivant le même principe d'analyse des pics d'absorption mis en œuvre en anthroporadiométrie.

Les méthodes d'analyses radiotoxicologiques sont sensibles à la fois aux performances des détecteurs utilisés, directement dépendantes de leur étalonnage, et aux procédés chimiques employés dans les étapes de séparation et de purification des radionucléides.

2.2.2.3. L'estimation de la dose interne

Afin de vérifier la conformité des résultats de la surveillance de l'exposition interne des travailleurs avec la réglementation, les mesures anthroporadiométriques et/ou radiotoxicologiques doivent être interprétées en termes de dose engagée, à l'aide de modèles systémiques, spécifiques à chaque élément, publiés par la CIPR¹⁰ (publications 30, 56, 67, 69, etc.) et de modèles décrivant la biocinétique des radionucléides et la propagation des rayonnements dans les tissus. Des modèles biocinétiques correspondant aux deux voies d'incorporation les plus fréquentes ont été publiés par la CIPR : le modèle des voies respiratoires pour l'incorporation par inhalation (publication 66) et le modèle gastro-intestinal pour l'incorporation par ingestion (publication 100).

En pratique, une estimation dosimétrique comporte deux étapes :

1. l'estimation de l'activité incorporée I (Bq) : $I = M/m(t)$

où M est la valeur d'activité (Bq) mesurée t jours après la contamination et $m(t)$ la valeur de la fonction m de rétention ou d'excrétion à la date de la mesure

2. le calcul de la dose engagée E (Sv) : $E = I \cdot \epsilon$

où I est l'activité incorporée (Bq) et ϵ le coefficient de dose par unité d'incorporation (Sv/Bq), tel que précisé dans le Code de la santé publique (arrêté du 1^{er} septembre 2003).

L'estimation dosimétrique est un exercice rendu complexe par le fait que tous les paramètres nécessaires à sa réalisation ne sont pas connus de façon précise. C'est en particulier le cas des caractéristiques temporelles de l'incorporation. Dans le cadre de la surveillance spéciale, le moment

¹⁰ Commission Internationale de Protection Radiologique

de l'incorporation n'est pas toujours déterminé. Dans le cadre de la surveillance de routine, la CIPR recommande de supposer que l'incorporation a lieu au milieu de l'intervalle de surveillance, qui peut être de plusieurs mois. D'autres paramètres peuvent être connus avec des incertitudes, en particulier les caractéristiques physico-chimiques du contaminant, qui sont représentées par défaut par des valeurs de référence : type d'absorption F/M/S/V, facteur de transfert gastro-intestinal f1 de 0 à 1 et diamètre aérodynamique médian en activité (DAMA) de 1 ou de 5 μm . *In fine*, l'établissement d'un scénario de contamination le plus réaliste possible, tenant compte des différentes mesures de contamination mises en œuvre dans le programme de surveillance du travailleur exposé et des conditions dans lesquelles a eu lieu la contamination, peut permettre d'adapter le modèle dosimétrique à la situation d'exposition spécifique. La présence en trace d'un radionucléide conduit le plus souvent à une dose très faible (une fraction de mSv).

2.2.2.4. Les seuils utilisés pour la surveillance de l'exposition interne

La figure 1 décrit les seuils utilisés pour la surveillance de l'exposition interne des travailleurs.

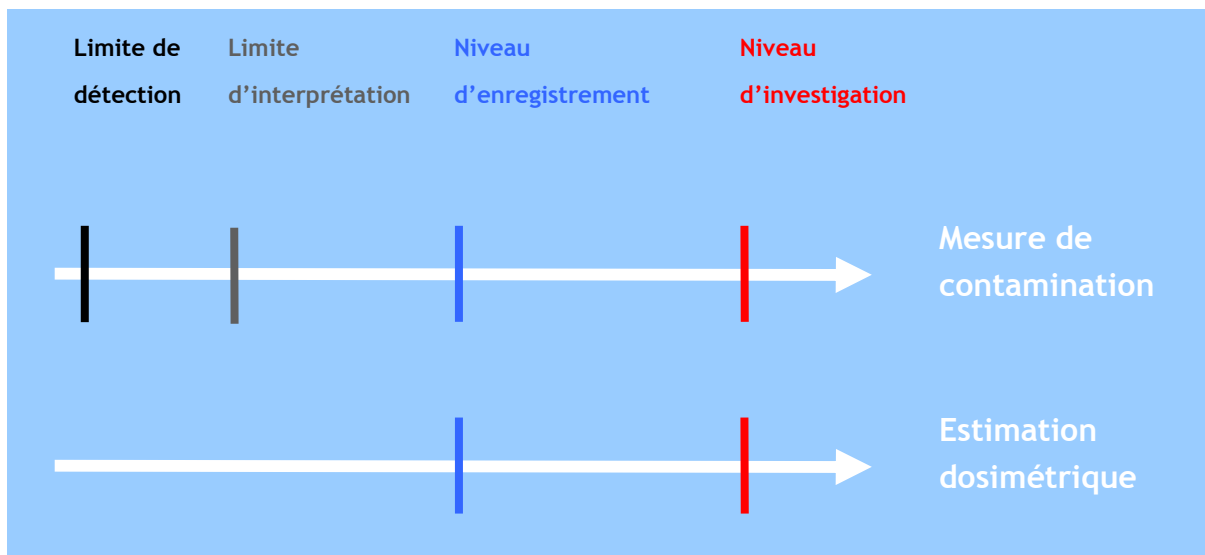


Figure 1 - Seuils utilisés pour la surveillance de l'exposition interne des travailleurs

La limite de détection (LD) est la plus petite valeur détectable avec une incertitude acceptable, dans les conditions expérimentales décrites par la méthode de mesure. La LD est l'un des critères de performance des mesures radiotoxicologiques et anthroporadiométriques. Le tableau 3 présente les limites de détection atteintes par ces méthodes dans les laboratoires français en 2011, pour un certain nombre de radionucléides caractéristiques. Ces données sont issues des portées d'accréditation de ces laboratoires par le COFRAC et des recommandations de bonne pratique publiées par la Société Française de Médecine du Travail [2].

Il apparaît que pour un examen donné, les LD diffèrent parfois de plusieurs ordres de grandeur d'un laboratoire à l'autre. Ceci s'explique par le fait que la LD dépend de nombreux paramètres, parmi lesquels la durée de la mesure (suivant le programme de surveillance, la durée de la mesure peut

être augmentée pour atteindre une meilleure LD), le type et les performances intrinsèques du ou des détecteurs utilisés : efficacité, résolution, bruit de fond, ainsi que la géométrie servant à l'étalonnage de ces détecteurs. Les programmes de surveillance et les protocoles de mesures ne font pas à l'heure actuelle l'objet de procédures standardisées entre les laboratoires, même si des initiatives sont actuellement en cours.

Tableau 3 - Limites de détection observées pour les principales techniques de dosimétrie interne mises en œuvre en France en 2011

Type d'examen	Type de rayonnements	Radionucléide(s) considéré(s)	Limites de détection (LD)
Radiotoxicologie des prélèvements nasaux	α β γ/X		de 0,1 à 0,11 Bq* de 0,02 à 4 Bq* 37 Bq*
Radiotoxicologie des selles	α γ/X	actinides ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{54}Mn , ^{110}Ag	de 0,0002 à 0,002 Bq* 1 Bq*
Radiotoxicologie des urines	α	uranium pondéral uranium actinides (sauf uranium)	de 0,1 à 4 $\mu\text{g/L}$ de 0,0002 à 0,01 Bq de 0,0002 à 0,002 Bq
	β	^3H ^{14}C ^{32}P ^{35}S ^{36}Cl ^{90}Sr β totaux	de 15 à 1 850 Bq/L de 60 Bq/L à 370 Bq/L de 3,5 à 15 Bq/L de 4,5 à 20 Bq/L de 60 à 200 Bq/L de 0,2 à 0,6 Bq/L
	γ/X	tous radionucléides	de 0,12 Bq/L à 0,4 Bq/L 1 à 75 Bq/L
Anthroporadiométrie corps entier	γ/X	^{137}Cs ^{60}Co	de 50 Bq à 300 Bq de 50 Bq à 300 Bq
Anthroporadiométrie pulmonaire	γ/X	^{241}Am ^{235}U ^{239}Pu	de 5 Bq à 15 Bq de 7 Bq à 14 Bq 1 000 à 7 000 Bq
Anthroporadiométrie de la thyroïde	γ/X	^{131}I ^{125}I	de 2 Bq à 30 Bq de 20 à 25 Bq

* il s'agit de Bq par échantillon ou prélèvement

Pour certains examens, ou pour répondre à des situations particulières, le laboratoire peut rendre un résultat à partir d'une limite d'interprétation opérationnelle définie au préalable avec le prescripteur, qui est supérieure à la LD, au-delà de laquelle l'analyse ou l'examen sont considérés positifs. A titre d'exemple, la limite de détection pour l'analyse de l'uranium dans les selles est inférieure à 0,01 Bq par prélèvement pour l'ensemble des laboratoires réalisant cette analyse. Cependant, un de ces laboratoires indique une limite d'interprétation opérationnelle égale à 0,07 Bq par prélèvement, de façon à s'affranchir d'une mesure d'uranium d'origine naturelle (présence dans la chaîne alimentaire), non pertinente dans le cadre de la surveillance des travailleurs exposés. Il faut préciser que la limite d'interprétation opérationnelle n'est pas définie dans la norme ISO 20553 [1]. Dans les bilans statistiques présentés dans ce rapport, sont précisés les nombres d'examens considérés comme positifs, c'est-à-dire ceux dont le résultat est supérieur à la limite d'interprétation ou, à défaut, supérieur à la LD.

Dans le cas où la mesure dépasse la LD (ou le cas échéant, la limite d'interprétation), le médecin du travail a la responsabilité de réaliser ou non une estimation dosimétrique.

Deux niveaux de référence sont définis par la norme ISO 20553 [1] comme étant les valeurs des quantités au-dessus desquelles une action particulière doit être engagée ou une décision doit être prise : le niveau d'enregistrement et le niveau d'investigation.

Le niveau d'enregistrement est le niveau de dose, d'exposition ou d'incorporation (déterminé par l'employeur ou par une autorité compétente) à partir duquel les valeurs doivent être consignées dans le dossier médical. La valeur de ce niveau ne doit pas dépasser 5 % des limites annuelles de dose (pour une période de surveillance donnée), soit 1 mSv. C'est le niveau de référence qui est recommandé par l'IRSN et qui a été considéré dans les bilans statistiques présentés dans ce rapport.

Le niveau d'investigation est le niveau de dose, d'exposition ou d'incorporation (déterminé par l'employeur ou par une autorité compétente) à partir duquel l'estimation dosimétrique doit être confirmée par des investigations additionnelles. La valeur de ce niveau ne doit pas dépasser 30 % des limites annuelles de dose, soit actuellement 6 mSv.

Recommandations de bonne pratique pour la surveillance médico-professionnelle de l'exposition interne aux radionucléides en INB

Considérant les difficultés opérationnelles exprimées par les SST pour assurer la surveillance de l'exposition interne aux radionucléides d'origine professionnelle dans les INB, un groupe de travail constitué de médecins du travail et d'experts (dont des experts de l'IRSN) a œuvré à l'élaboration d'un guide et recommandations de bonne pratique. Publié en juillet 2011, ce guide a pour objectif d'optimiser le suivi dosimétrique et médical des travailleurs exposés au risque d'exposition interne, dans le souci de promouvoir l'harmonisation des pratiques, le renforcement de la traçabilité des expositions internes et l'amélioration des actions d'information auprès des travailleurs concernés.

Les recommandations ont été élaborées selon la méthode pour la pratique clinique de la Haute Autorité de Santé, et reposent sur les connaissances scientifiques et le retour d'expérience des pratiques professionnelles en dosimétrie interne. L'argumentaire de cette élaboration est également présenté dans le document. Ces recommandations concernent le champ des installations nucléaires de base (INB) mais peuvent également servir de base à l'élaboration de recommandations couvrant les autres domaines d'activité.

Le guide est disponible sur le site de la Société Française de Médecine du Travail : <http://www.chu-rouen.fr/sfmont/pages/accueil.php>.

2.2.3. SURVEILLANCE DE L'EXPOSITION AU RAYONNEMENT COSMIQUE

En France, le Système d'Information et d'Evaluation par Vol de l'Exposition au Rayonnement cosmique dans les Transports aériens (SIEVERT, www.sievert-system.org), développé conjointement par la Direction générale de l'aviation civile (DGAC), l'Observatoire de Paris, l'Institut Polaire français - Paul Emile Victor (IPEV) et l'IRSN, est mis à la disposition des compagnies aériennes pour le calcul des doses de rayonnement cosmique reçues par les personnels navigants lors des vols en

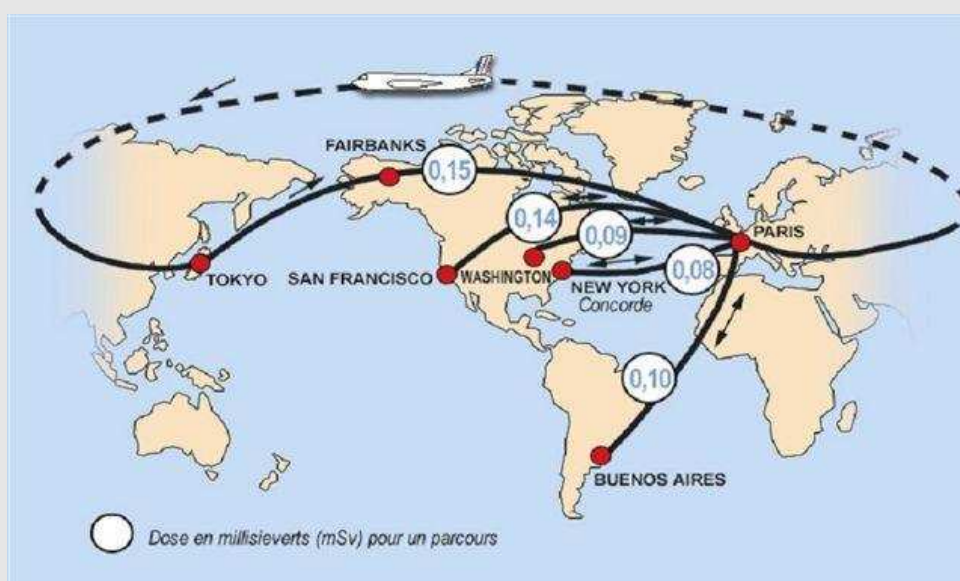
fonction des routes empruntées, conformément à la réglementation¹¹. Les doses sont évaluées, en fonction des caractéristiques du vol, à partir des données dosimétriques validées par l'IRSN. Des modèles numériques cartographient des débits de dose de rayonnements cosmiques jusqu'à une altitude de 80 000 pieds. Au cœur de SIEVERT, l'espace aérien est découpé en zones d'altitude, de longitude et de latitude, formant une cartographie de 265 000 mailles. A partir des modèles numériques, il est possible d'affecter une valeur de débit de dose à chaque maille. La cartographie des débits de dose est mise à jour tous les mois en tenant compte de l'activité solaire. Le système SIEVERT est opérationnel depuis 2001. L'IRSN propose aux compagnies une gestion automatisée reposant sur un fichier récapitulatif des données de tous les vols de la période de suivi. A partir des caractéristiques d'un vol, le calculateur de SIEVERT évalue le temps passé par l'avion dans chaque maille et, en cumulant les doses élémentaires des mailles successives, en déduit la dose reçue au cours de ce vol. La valeur de la dose est plus précise lorsque le fichier du vol communiqué par l'entreprise comporte des points de passage avec pour coordonnées la latitude, la longitude, l'altitude et le temps relatif de passage en ces points, qui permettent de définir précisément la trajectoire d'un vol. Si ce n'est pas le cas, la dose est évaluée à partir d'un profil générique de vol. A ce stade, les données dosimétriques ne sont pas nominatives. Il appartient ensuite à l'employeur de cumuler les doses calculées pour les différents vols effectués au cours d'une année par chaque personnel navigant.

¹¹ Arrêté du 8 décembre 2003 fixant les modalités de mise en œuvre de la protection contre les rayonnements ionisants des travailleurs affectés à l'exécution de tâches à bord d'aéronefs en vol

Exposition des personnels navigants aux rayonnements ionisants

La terre reçoit en permanence des particules, provenant des explosions de supernova de notre galaxie ou d'éruptions solaires, qui constituent le rayonnement cosmique. L'exposition à ce rayonnement croît avec l'altitude car l'atmosphère en absorbe une partie. Sont donc principalement concernés les spationautes ainsi que les personnes utilisant fréquemment les moyens de transports aériens, notamment les personnels navigants. L'exposition varie également avec l'itinéraire emprunté par l'avion, car elle est plus forte aux pôles qu'à l'équateur.

Voici à titre d'exemple les doses en millisieverts (mSv) reçues pour les parcours suivants :



L'exposition au rayonnement cosmique présente un caractère inéluctable et se prête difficilement à des mesures d'optimisation comme l'ajout de protections de type blindage. En revanche, elle est facilement prévisible et donc limitable. Les bilans réalisés ces dernières années ont établi que le personnel navigant reçoit une dose annuelle individuelle moyenne de l'ordre de 2 mSv, la dose maximale étant de l'ordre de 5 mSv. Ces valeurs sont proches de celles observées dans d'autres pays européens tels que l'Allemagne ou les Pays-Bas.

2.2.4. CENTRALISATION DES RESULTATS DE LA SURVEILLANCE INDIVIDUELLE DES TRAVAILLEURS DANS SISERI

Le système SISERI¹² a été mis en service le 15 février 2005 par l'IRSN, conformément aux dispositions réglementaires, dans un but de centralisation, consolidation et conservation de l'ensemble des résultats de la surveillance individuelle de l'exposition des travailleurs en vue de les exploiter à des fins statistiques ou épidémiologiques. Centralisés dans une base de données, ces résultats sont mis à disposition des médecins du travail et des personnes compétentes en radioprotection (PCR) via

¹² Système d'information de la surveillance de l'exposition aux rayonnements ionisants

Internet (<http://siseri.irs.fr>) afin d'optimiser la surveillance médicale et la radioprotection des travailleurs (figure 2).

Le système SISERI centralise, au niveau national, les données de :

- la dosimétrie externe passive (corps entier ou supplémentaire), dont les résultats sont fournis par les organismes de dosimétrie ;
- la dosimétrie externe opérationnelle, dont les résultats sont envoyés par les personnes compétentes en radioprotection (PCR) des établissements ayant des locaux classés « zones contrôlées » ;
- la surveillance de l'exposition interne, à savoir les résultats d'analyses radiotoxicologiques et d'examens anthroporadiométriques fournis par les Laboratoires de Biologie Médicale (LBM) ou les Services de Santé au Travail (SST), et, lorsque les circonstances le nécessitent et le permettent, les doses internes calculées par les médecins du travail ;
- la dosimétrie du personnel navigant, dont les résultats sont transmis par les compagnies aériennes ;
- la surveillance de l'exposition au radon ou à la radioactivité naturelle dans le cadre des activités NORM, dont les résultats sont fournis par les organismes agréés.

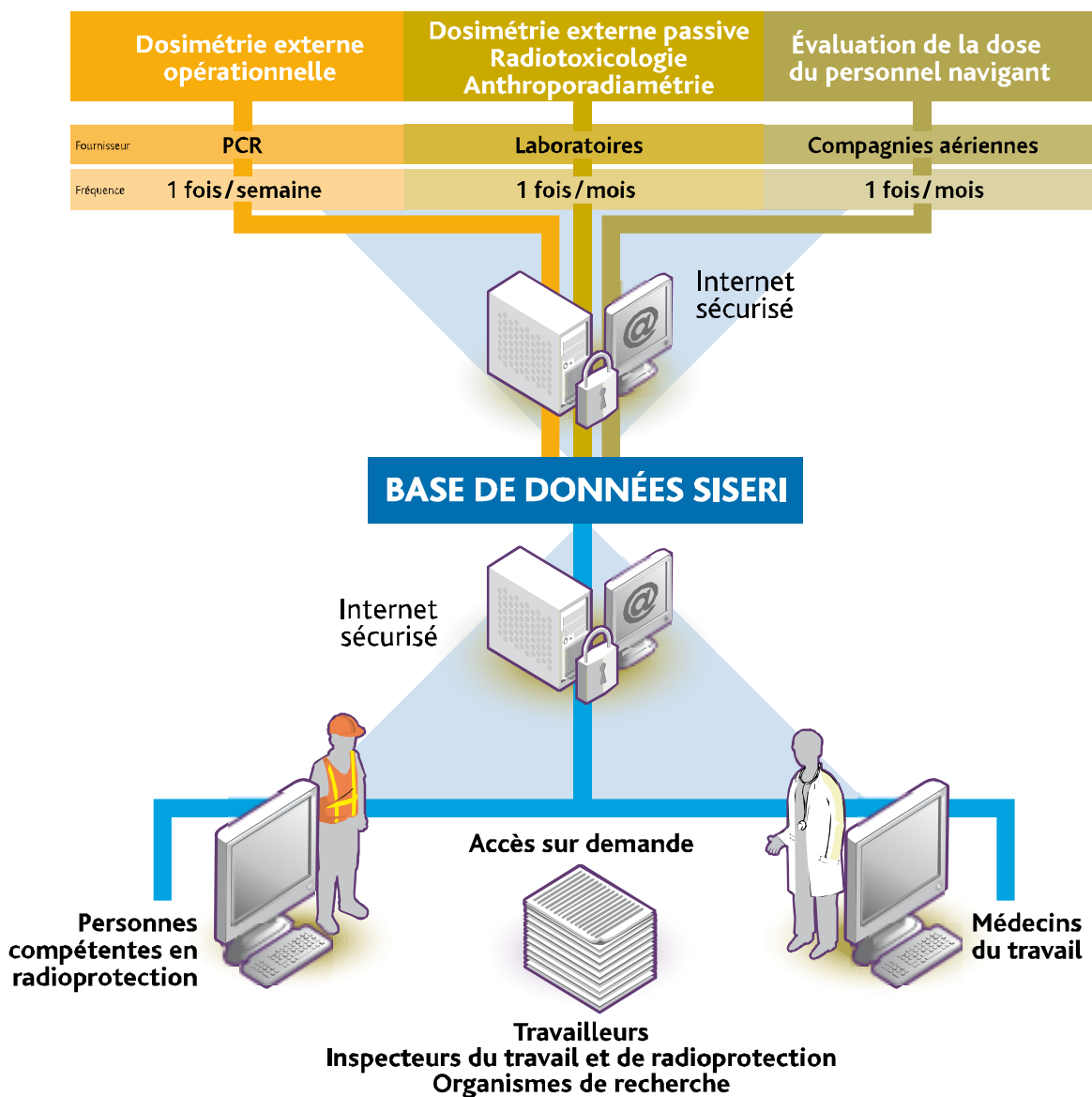


Figure 2 - Le système SISERI

2.2.4.1. La transmission des données à SISERI en 2011

Selon l'arrêté du 30 décembre 2004 relatif à la carte individuelle de suivi médical et aux informations individuelles de dosimétrie des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants, les résultats individuels de la **dosimétrie externe passive** doivent être transmis au plus tard un mois après la fin de période de port à SISERI par les laboratoires agréés. Globalement, ces délais sont à peu près respectés. Les données sont rapidement intégrées dans la base dès lors que les identifiants des travailleurs sont correctement renseignés. Des efforts des organismes de dosimétrie sur ce point ont été notés et, sur les 2,4 millions de données transmises à SISERI, plus de 90 % ont été intégrées sans qu'aucune intervention des gestionnaires de la base ne soit nécessaire. Néanmoins, cet effort n'a pas été aussi marqué pour tous les organismes et il doit être poursuivi. En effet, un traitement *a posteriori* par des opérateurs de l'IRSN est nécessaire pour résoudre les difficultés d'intégration, ce qui est lourd et, de plus, limite la mise à disposition des données vers les utilisateurs. De nouveaux

problèmes ont aussi été observés en 2011 comme l'envoi répété par erreur de volumes importants de données qui n'ont heureusement pas été intégrées dans la base mais qui ont généré un travail conséquent pour les gestionnaires IRSN de la base, alors qu'une vigilance de l'organisme de dosimétrie aurait permis d'éviter ce surcroît de travail.

Les données de dosimétrie externe passive de l'année 2011 qui n'étaient pas intégrées, en avril 2012, représentaient moins de 1 % des données reçues, concernant environ 5 000 individus sur les 350 000 pour lesquels SISERI enregistre des résultats.

S'agissant de la **dosimétrie externe opérationnelle**, le nombre d'établissements ayant signé un protocole avec SISERI pour donner accès à leur(s) PCR et/ou médecin(s) du travail (MDT) s'élevait à 7550, fin 2011, soit une augmentation de l'ordre de 30 % par rapport au nombre de protocoles signés fin 2010. Sur l'ensemble de l'année 2011, 941 établissements ont effectivement transmis au moins une donnée de dosimétrie opérationnelle, soit 11 % de plus qu'en 2010. Plus de 70 % de ces établissements appartiennent au domaine des activités médicales et vétérinaires, 14 % à l'industrie non nucléaire et 7 % à celui de l'industrie nucléaire (figure 3).

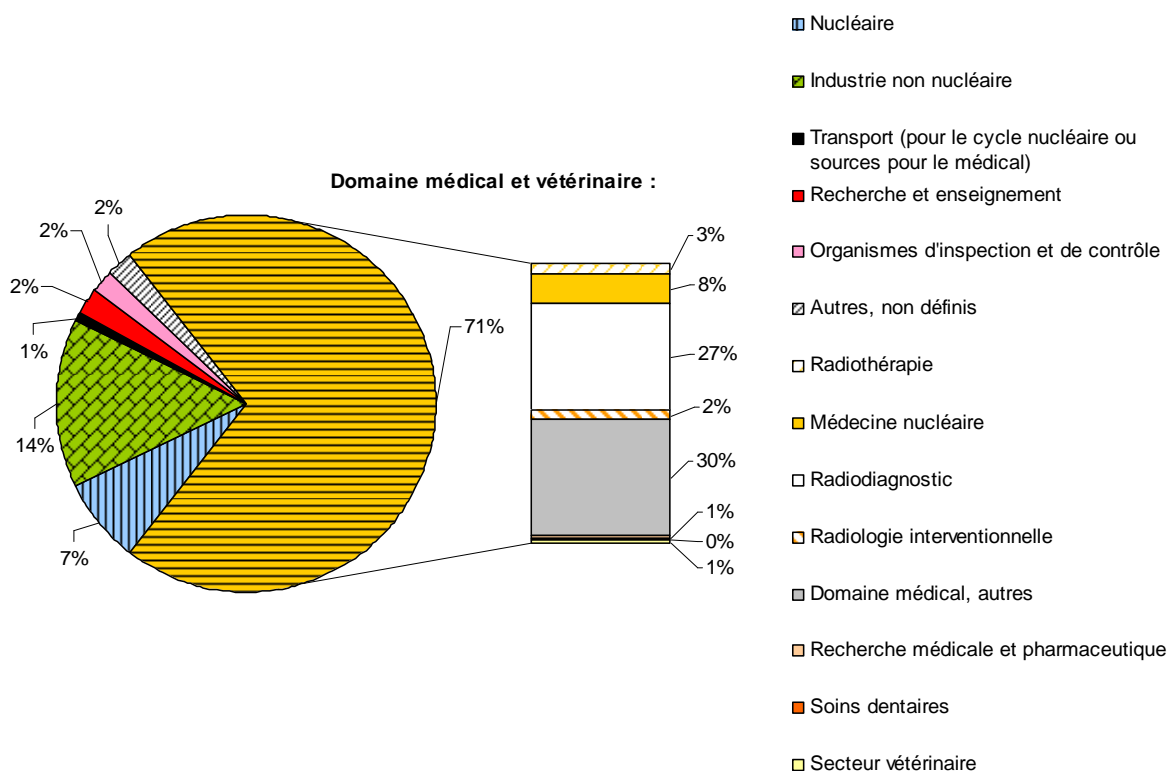


Figure 3 - Répartition par domaine d'activité des établissements ayant transmis des données de dosimétrie opérationnelle en 2011, avec le détail de la répartition par secteur d'activité dans le domaine médical et vétérinaire

Le nombre moyen de fichiers reçus mensuellement est de 2 309 pour l'année 2011, ce qui confirme l'augmentation observée ces dernières années. Au total 9,7 millions de valeurs de dose « opérationnelle » ont été enregistrées dans SISERI en 2011. Parmi ces données, 44 % proviennent des entreprises du nucléaire, 37 % du domaine médical et vétérinaire, et 7 % de l'industrie non nucléaire (figure 4). L'intégration des données de dosimétrie opérationnelle nécessite, elle-aussi, l'intervention

d'un opérateur de l'IRSN dans un certain nombre de cas, sans toutefois que la consultation des données depuis l'extérieur n'en soit affectée puisque 100% des données de dosimétrie opérationnelle sont intégrées au plus tard dans les trois jours suivant leur transmission à SISERI.

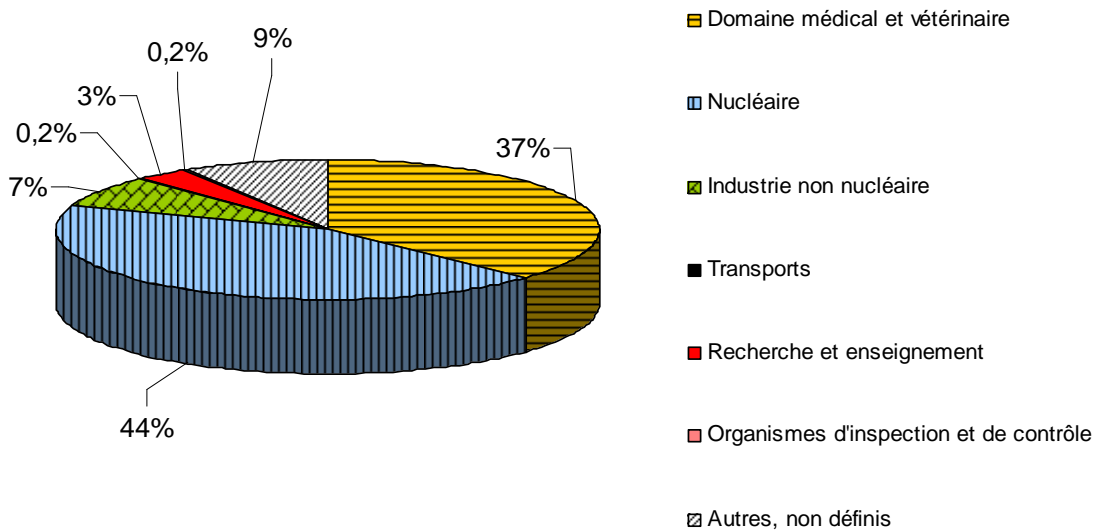


Figure 4 - Répartition par secteur d'activité des données de dosimétrie opérationnelle transmises à SISERI en 2011

En 2011, cinq compagnies aériennes ont envoyé les résultats de la **dosimétrie des personnels navigants** à l'IRSN, pour intégration dans SISERI, ce qui correspond à un volume de près de 168 000 données transmises.

S'agissant de la transmission des données de **dosimétrie interne** (transmission par les LBM des résultats des mesures d'activité incorporée, et le cas échéant, transmission par le médecin du travail de la dose calculée), l'envoi des données est progressivement devenu effectif pour la plupart des laboratoires au cours de l'année 2010. Depuis début 2011, l'ensemble des organismes agréés transmet régulièrement des fichiers à SISERI, avec un volume de données transmises de plus de 78 000 valeurs pour l'année entière.

Enfin, s'agissant de la transmission des données des travailleurs exposés **au radon** le système a été adapté pour recevoir ces données dès le début 2011, mais à ce jour très peu de valeurs ont été effectivement reçues.

2.2.4.2. La consultation des données de SISERI en 2011

Les PCR et MDT travaillant pour les établissements qui en ont fait la demande et ont signé le protocole d'accès à SISERI peuvent consulter en ligne les données dosimétriques des individus dont ils ont la charge.

Le nombre de PCR et de MDT ayant une clé d'accès au système est en constante progression depuis le 15 février 2005 (figure 5).

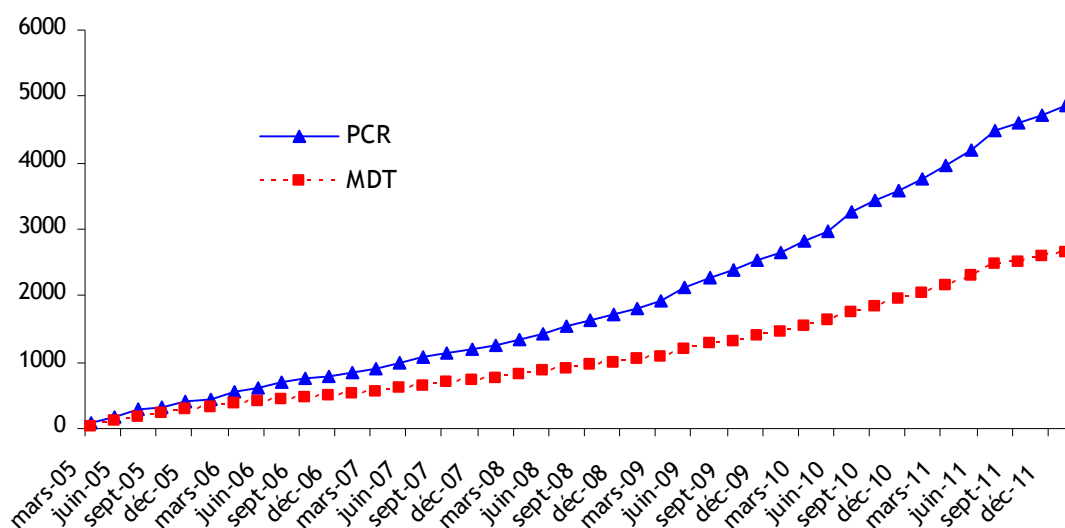


Figure 5 - Progression du nombre de personnes compétentes en radioprotection (PCR) et de médecins du travail (MDT) ayant accès à SISERI depuis sa mise en service

A la fin de l'année 2011, 2 656 MDT et 4 896 PCR avaient accès à SISERI, soit une augmentation de 21 % par rapport à 2010. Les PCR pouvant accéder à SISERI se répartissaient entre le domaine médical pour 57 %, le nucléaire pour 15 % et l'industrie non nucléaire pour 14 % (figure 6). Cette répartition confirme la part majoritaire du domaine médical, dont la progression avait été observée les années précédentes.

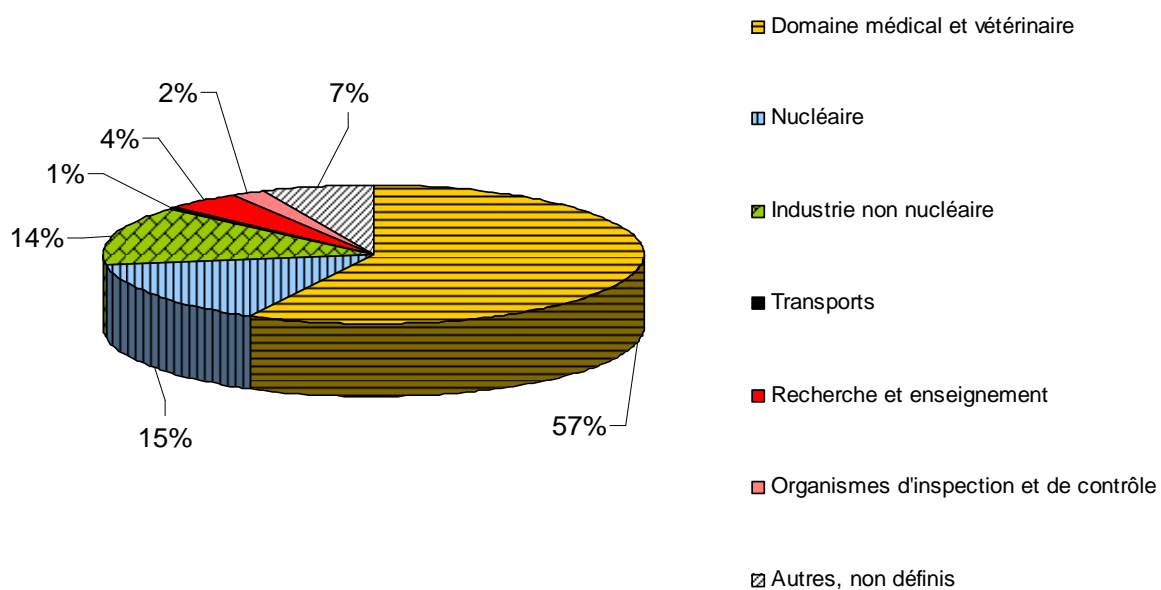


Figure 6 - Répartition par secteur d'activité des personnes compétentes en radioprotection (PCR) ayant accès à SISERI en 2011

Une estimation a montré que 39 % des PCR et 12 % des MDT ayant un code d'accès à SISERI fin 2011 avaient consulté au moins une fois la base au cours du premier trimestre de l'année 2012. Ces chiffres démontrent que le système SISERI est encore loin d'être largement utilisé par les acteurs de la radioprotection pour lesquels il a été aussi conçu. Afin de promouvoir la connaissance de SISERI et son utilisation par les PCR et MDT, l'IRSN œuvre également à une communication active vers les utilisateurs de SISERI par sa participation à de nombreuses manifestations professionnelles ciblées : réunions des réseaux PCR, rencontres d'associations de MDT, rencontres PCR de la SFRP.

Afin de viser un fonctionnement du système le plus adapté possible aux besoins des utilisateurs et une utilisation plus aisée, l'IRSN a réalisé une enquête auprès de tous les utilisateurs et a créé un club des utilisateurs de SISERI. En 2011, une boîte à idées a également été mise en place, accessible depuis le site web de SISERI (<http://siseri.irsn.fr>). Tenant compte des suggestions des utilisateurs et afin de renforcer son caractère opérationnel, des évolutions de SISERI ont été engagées en 2011 concernant principalement la simplification des démarches d'accès grâce à la dématérialisation complète de la procédure. Cette évolution devrait être opérationnelle avant la fin 2012.

SISERI : Etat des lieux et évolutions

Un rapport a été établi fin 2011 par l'IRSN à la demande conjointe de la DGT et de l'ASN, pour mener une réflexion sur les évolutions souhaitables de SISERI, dans les années futures, en prenant en considération le retour d'expérience de six années de fonctionnement, les besoins des parties prenantes ainsi que les exigences d'harmonisation au niveau européen. Il s'agissait notamment de :

- dresser un état des lieux global du dispositif ;
- d'inventorier les besoins en statistiques dosimétriques de l'ASN et de la DGT mais aussi des personnes compétentes en radioprotection, des médecins du travail, des employeurs et des travailleurs ;
- d'identifier les attentes des différents acteurs de la radioprotection en matière de transmission et de consultation des données ;
- d'identifier les évolutions à apporter à SISERI pour répondre, d'une part aux besoins des acteurs bénéficiant déjà d'accès au titre du code du travail, d'autre part aux besoins d'autres utilisateurs potentiels (travailleurs, employeurs, inspecteurs du travail et de la radioprotection) ;
- d'évaluer les aménagements nécessaires à la prise en compte des propositions des autorités européennes de radioprotection en vue de la mise en place d'un passeport de dose européen ;
- de faire un point sur la mise en place éventuelle de systèmes comparables à l'étranger.

Ce document rapporte l'ensemble des résultats et réflexions sur les différents thèmes ci-dessus, issus d'une large consultation associant les utilisateurs actuels du système et des utilisateurs potentiels. Enfin, il expose le point de vue de l'IRSN sur l'état du système SISERI et ses évolutions possibles et/ou jugées souhaitables.

Ce rapport a été présenté par l'IRSN aux groupes permanents d'experts en radioprotection GPRAD et GPMED début 2012 et sera rendu public lors de la publication de l'avis de ces groupes.

2.3. MOYENS ET ACTIONS DE L'IRSN EN LIEN AVEC LA SURVEILLANCE DE L'EXPOSITION DES TRAVAILLEURS

2.3.1. ACTIONS DANS LE CADRE DE L'AGREMENT DES ORGANISMES

Les dispositions réglementaires du code du travail prévoient que les mesures de l'exposition des travailleurs aux rayonnements ionisants soient assurées par les laboratoires de l'IRSN, des services de santé au travail accrédités¹³ ou par des organismes agréés par décision de l'Autorité de sûreté nucléaire.

Deux missions importantes sont confiées à l'IRSN dans le processus d'agrément des laboratoires de surveillance dosimétrique conformément à l'arrêté du 21 décembre 2007 modifiant l'arrêté du 6 décembre 2003 relatif aux conditions de délivrance du certificat et de l'agrément pour les organismes en charge de la surveillance de l'exposition des travailleurs aux rayonnements ionisants :

- émettre un avis sur l'adéquation des matériels et des méthodes de dosimétrie de ces organismes pour la surveillance individuelle des travailleurs (Cf. § 2.3.1.1 ci-après). Les techniques de dosimétrie doivent par ailleurs être accréditées par le Comité Français d'Accréditation (COFRAC) ou par tout autre organisme équivalent ;
- organiser des intercomparaisons entre ces organismes pour vérifier la qualité des mesures au cours du temps (Cf. § 2.3.1.1, § 2.3.1.2 et § 2.3.1.3).

Ce processus permet *in fine* à l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) de se prononcer sur les demandes d'agrément des laboratoires et contribue à garantir la qualité des données d'exposition mesurées par ces organismes.

2.3.1.1. Avis de l'IRSN sur l'adéquation des techniques de dosimétrie avec la surveillance individuelle des travailleurs

Au cours de l'année 2011, l'IRSN a rendu des avis sur l'adéquation de leurs matériels et méthodes avec la surveillance individuelle des travailleurs pour le compte de cinq laboratoires de dosimétrie externe et cinq laboratoires de biologie médicale. Tous ces organismes avaient déjà été agréés précédemment et ils ont vu leur agrément renouvelé par décision de l'ASN.

La liste des organismes agréés par l'ASN, incluant le lien vers les portées d'agrément correspondantes, est disponible sur le site Internet de SISERI¹⁴.

2.3.1.2. Intercomparaison de dosimétrie passive

Conformément aux dispositions de la réglementation, l'IRSN est chargé d'organiser au moins tous les 3 ans une intercomparaison dans le but de vérifier la qualité des mesures de dose réalisées par les

¹³ Uniquement pour les examens anthroporadiométriques

¹⁴ <http://siseri.irsn.fr/index.php?page=information/agrement>

organismes en charge de la surveillance de l'exposition des travailleurs. Dans ce contexte, l'IRSN a organisé en octobre 2010 la quatrième intercomparaison réglementaire de dosimètres individuels passifs. Elle a concerné 10 laboratoires. L'intercomparaison consiste à irradier les dosimètres des laboratoires participant à des doses de référence, inconnues de ces derniers, et à en comparer les résultats obtenus aux valeurs attendues. Grâce aux installations de référence de l'institut situées à Fontenay-aux-Roses et à Cadarache, ce sont plus de 300 dosimètres qui ont été testés à des rayonnements photoniques et neutroniques représentatifs des champs de rayonnements auxquels les travailleurs sont susceptibles d'être exposés.

Les tolérances considérées pour l'analyse des résultats sont issues des normes internationales :

- la norme CEI 62387-1 [3] : de - 29 % à +67 % de la dose de référence pour les dosimètres photon et bêta (poitrine et extrémités) ;
- la norme ISO 21909 [4] : ± 50 % pour les dosimètres neutrons (poitrine et extrémités).

A de rares exceptions près, les dosimètres testés en 2010 ont donné des résultats conformes aux exigences de ces normes dans les configurations retenues pour l'intercomparaison ; en particulier les résultats obtenus avec les dosimètres X, gamma, bêta « poitrine » et « poignet » étaient tous conformes. Dans le cas des dosimètres « poitrine » mesurant les rayonnements neutroniques, un laboratoire donne une valeur surestimée de la grandeur Hp(10) dans la configuration $(^{252}\text{Cf}+\text{D}_2\text{O})_{\text{Cd}}$ à 75 cm, ce qui l'a conduit à prévoir sa participation à une nouvelle campagne de mesure. Dans le cas des dosimètres « bague » mesurant les rayonnements bêta, un laboratoire a donné une valeur sous-estimée de la grandeur Hp(0,07) dans la configuration de mesure d'une source de strontium 90 - yttrium 90 en incidence normale à 30 cm.

La prochaine intercomparaison de ce type est planifiée à l'automne 2012.

2.3.1.3. Intercomparaison d'analyses radiotoxicologiques

L'IRSN organise tous les ans une intercomparaison sur des échantillons urinaires contenant un ou plusieurs radionucléides à une activité déterminée. En 2011, cette intercomparaison a concerné 11 laboratoires et les radionucléides mesurés étaient les suivants : ^3H , ^{14}C , $^{228-230}\text{Th}$, $^{234-235-238}\text{U}$, $^{238-239}\text{Pu}$, ^{241}Am , le ^{244}Cm et U total par spectrométrie de masse.

Chaque laboratoire a la possibilité de situer ses résultats par rapport :

- aux valeurs cibles des radionucléides introduits dans chaque échantillon ;
- à la plage [-25 % à +50 %] par rapport à la valeur cible, tel que recommandé par la norme ISO 12790-1 [4] ;
- aux valeurs des activités déterminées par les autres laboratoires participants.

90 % des résultats des mesures réalisées par les participants en 2011 étaient dans les bornes de tolérance rappelées ci-dessus.

Ces résultats constituent l'un des éléments sur lesquels s'appuie l'IRSN pour élaborer les avis prévus dans le processus d'agrément (§ 2.2.1). Les résultats d'intercomparaison permettent aussi aux

laboratoires de revoir en tant que de besoin leurs protocoles d'analyse.

2.3.1.4. Intercomparaison de mesures anthroporadiométriques

L'IRSN a organisé une nouvelle campagne d'intercomparaison concernant des mesures anthroporadiométriques thyroïdiennes, qui ont été réalisées entre janvier et juillet 2011. Cette intercomparaison a concerné 34 installations réparties entre 12 laboratoires et/ou exploitants français et six laboratoires étrangers.

Les mesures ont été réalisées à l'aide du fantôme anthropomorphe « cou » fabriqué par la société Radiology Support Devices (figure 7). Pour cette intercomparaison, trois conteneurs thyroïdiens ont été utilisés :

- le premier chargé avec 97 Bq d'iode 129 ;
- le deuxième chargé avec 41 Bq de baryum 133 ;
- le troisième chargé avec 393 Bq de baryum 133.

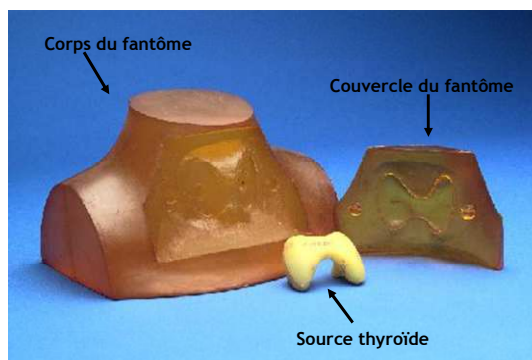


Figure 7 - Fantôme anthropomorphe COU (RDS)

Vingt installations ont réalisé la mesure du premier conteneur, 33 installations ont réalisé la mesure du deuxième conteneur et les 34 installations la mesure du troisième conteneur. 90 % des résultats des mesures réalisées par les participants étaient dans les bornes de tolérance rappelées ci-dessus (§ 2.3.1.3), cette valeur atteignant 95 % si on se limite aux mesures incluses dans le périmètre d'accréditation des installations. Les installations ne répondant pas aux critères de tolérance

présentaient soit des problèmes de fantôme ou de positionnement (absence de système de repérage), soit des limites de détection supérieures à la valeur cible.

2.3.2. SUIVI DES INCIDENTS ET EVENEMENTS DE RADIOPROTECTION

2.3.2.1. Recensement et analyse (base ERIA)

De par sa position d'expert technique dans le domaine de la radioprotection et au regard de sa mission de participation à la veille permanente en radioprotection, l'IRSN collecte et analyse les données concernant les événements et incidents de radioprotection (ERP). Leur survenue témoigne en effet du niveau de qualité de la radioprotection dans les différents secteurs utilisant les rayonnements ionisants, en complément d'autres indicateurs tels que les doses individuelles moyennes reçues par les travailleurs, les doses collectives, etc. La connaissance des incidents et l'analyse des circonstances les ayant engendrés sont indispensables pour constituer un retour d'expérience et élaborer des recommandations visant à améliorer la protection des travailleurs.

Les ERP recensés par l'IRSN concernent tous les grands domaines d'activité mettant en œuvre des rayonnements ionisants. Il s'agit des événements significatifs déclarés à l'ASN ainsi que d'autres événements dont l'IRSN a connaissance à travers ses différentes activités. Tous ces événements sont recensés dans une base de données développée à cet effet : la base ERIA (Evénements de Radioprotection, Incidents, Accidents). Tous ces ERP sont ensuite soumis à une analyse de retour d'expérience transverse à tous les domaines d'activité.

2.3.2.2. Estimation de la dose engagée

L'Institut de Radioprotection et de Sureté Nucléaire (IRSN) est régulièrement sollicité par les médecins du travail pour évaluer les doses reçues par les salariés après exposition interne. A partir des résultats individuels des analyses radiotoxicologiques *in vitro* et/ou des mesures anthroporadiométriques *in vivo*, les doses efficaces engagées sont estimées à l'aide des modèles biocinétiques et dosimétriques publiés par la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR). Les coefficients de dose efficace engagée utilisés sont ceux figurant dans la réglementation française (arrêté du 1er septembre 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants).

Pour l'année 2011, l'IRSN a réalisé 15 estimations dosimétriques pour des contaminations internes professionnelles concernant 15 salariés. Les contaminations ont eu lieu majoritairement dans des services de médecine nucléaire (9 estimations) mais également dans des laboratoires de recherche (4 estimations) et lors d'un chantier d'assainissement (2 estimations).

2.3.3. AUTRES ACTIONS

2.3.3.1. Guide pratique d'aide à la réalisation des études de poste

Un guide pratique d'aide à la réalisation des études dosimétriques de poste de travail présentant un risque d'exposition aux rayonnements ionisants est édité par l'IRSN. Fondé sur l'expérience acquise par l'IRSN, il propose aux différents acteurs impliqués dans la radioprotection du personnel, notamment aux chefs d'établissement, aux personnes compétentes en radioprotection et aux médecins du travail, une approche méthodologique leur permettant de réaliser des études dosimétriques de poste de travail.

Une première partie du document présente le contexte réglementaire et les principaux objectifs associés à l'étude de poste, ainsi qu'un rappel sur les différents modes d'exposition, les grandeurs dosimétriques et les instruments de mesure associés, enfin des méthodes de calcul à mettre en œuvre, ainsi que des renvois vers quelques références utiles.

Dans une deuxième partie, le guide traite du recueil des données dosimétriques nécessaires pour mettre en œuvre le processus d'optimisation de la radioprotection, définir le classement des travailleurs et délimiter les zones de travail.

Enfin, la troisième partie est constituée de fiches déclinant la méthode pour des secteurs d'activité particuliers. Dans sa dernière édition, le guide comporte trois fiches se rapportant à des activités médicales, consacrées respectivement à la radiologie conventionnelle, à la radiologie interventionnelle, et à la médecine nucléaire. Le document est en libre accès sur le site Internet de l'IRSN¹⁵.

2.3.3.2. Suivi des alertes de dépassements dosimétriques

Des valeurs limites d'exposition sont réglementairement fixées par le code du travail (§ 2.1). Ces valeurs concernent la dose efficace, les doses équivalentes aux extrémités, la dose équivalente à la peau et la dose équivalente au cristallin.

Les laboratoires et organismes agréés en charge des mesures de l'exposition des travailleurs aux rayonnements ionisants doivent, sans délai, informer le médecin du travail et l'employeur de la survenue d'un dépassement de l'une de ces limites d'exposition. Conformément à l'arrêté du 30 décembre 2004, relatif à la carte individuelle de suivi médical et aux informations individuelles de dosimétrie des travailleurs exposés, le médecin du travail diligente une enquête en cas de résultat dosimétrique jugé anormal et donc *a fortiori* en situation de dépassement de limite réglementaire de dose. Cette enquête doit conduire *in fine* à la confirmation ou, au contraire, à une modification, voire une annulation de la dose attribuée au travailleur.

Afin que des modifications puissent être prises en compte dans la base SISERI, une procédure permettant le retour des conclusions d'enquête vers l'IRSN a été mise en place après consultation de la Direction Générale du Travail. Cette organisation permet de consolider les données de la base SISERI et d'avoir un suivi de chacun des cas de dépassement de limite réglementaire de dose signalé. L'IRSN, informé par le laboratoire de l'alerte de dépassement faite au médecin du travail, peut prendre directement contact avec ce dernier, suivre l'enquête, en enregistrer les conclusions et, le

¹⁵ http://www.irsn.fr/FR/base_de_connaissances/librairie/publications_professionnels/Pages/guides_techniques.aspx

cas échéant, proposer une assistance et des conseils pour mener à bien cette enquête. Dans les cas plus difficiles, l'IRSN intervient sur site afin de mener les investigations nécessaires. Ces déplacements sont l'occasion, au delà de l'aide apportée au médecin du travail et de la consolidation des données intégrées dans la base SISERI, de rappeler les bonnes pratiques en matière de radioprotection.

En l'absence de retour d'information du médecin du travail suite à une alerte de dépassement de limite réglementaire de dose, la dose mesurée est conservée dans SISERI et le dépassement est considéré comme avéré.

Les dépassements de la limite réglementaire annuelle de dose associés au cumul des valeurs de doses sur les douze mois (doses éventuellement mesurées par plusieurs laboratoires lorsque le travailleur a plusieurs employeurs) sont détectés à partir de requêtes dans SISERI. L'IRSN alerte alors directement le(s) médecin(s) du travail de cette situation.

3. METHODOLOGIE SUIVIE POUR ETABLIR LE BILAN ANNUEL DE L'EXPOSITION DES TRAVAILLEURS AUX RAYONNEMENTS IONISANTS

3.1. BILAN DES EXPOSITIONS EXTERNES

Comme les années précédentes ([6] à [14]), ce bilan est établi à partir des données de la dosimétrie passive mise en œuvre pour tous les travailleurs exposés et transmises à l'IRSN par les différents laboratoires de dosimétrie (§ 2.2.1).

Tout porteur d'au moins un dosimètre entre le 1^{er} janvier et le 31 décembre 2011 est compté dans l'effectif surveillé par chaque laboratoire.

Le bilan des expositions professionnelles pour l'année 2011 a été établi à partir des données agrégées de chaque laboratoire de surveillance dosimétrique : effectifs des travailleurs par secteur d'activité professionnelle, doses collectives (somme des doses individuelles reçues par un groupe de personnes) correspondantes et répartition des travailleurs par classe de doses. Les données relatives aux activités civiles et de défense ont été regroupées dans chaque secteur des domaines d'activités concernés : activités médicales et vétérinaires, nucléaire, industrie non nucléaire, recherche. Pour chaque domaine est précisée la part concernant les effectifs des activités de la défense suivis par le Service de Protection Radiologique des Armées (SPRA).

Certaines hypothèses ont été retenues pour agréger les données fournies par les laboratoires avec des caractéristiques différentes (seuils d'enregistrement des doses, règles d'affectation par secteurs d'activité). Les classes de doses retenues pour le bilan reposent ainsi sur un choix de valeurs représentatives :

- Seuil d'enregistrement¹⁶ des doses ;
- 1 mSv/an (limite de dose efficace pour les personnes du public, art. R1333-8 du code de la santé publique) ;
- 6 mSv/an (seuil bas de la catégorie A des travailleurs exposés, art. R4451-44 du code du travail) ;
- 20 mSv/an (limite sur 12 mois consécutifs de la somme des doses efficaces reçues par exposition externe et interne applicable aux travailleurs exposés, art. R4451-12 du Code du travail).

Le bilan réalisé est une « photographie » de la situation au moment de l'envoi des données par chaque laboratoire. Le nombre de cas de dépassements de la limite réglementaire de 20 mSv sur 12 mois glissants peut éventuellement diminuer par la suite, en fonction des résultats d'enquêtes validant ou réfutant les doses mesurées.

Certains éléments peuvent avoir une incidence sur le bilan réalisé, par exemple :

¹⁶ Niveau de dose au-dessus duquel les valeurs des doses reçues par un travailleur sont enregistrées dans son dossier individuel. En pratique, ce niveau est lié aux performances de détection des dosimètres et varie de 0,05 à 0,2 mSv selon les dispositifs, pour la mesure de l'exposition « corps entier » (§ 2.2.2., tableau 2).

- les conditions de port des dosimètres :
 - la période de port des dosimètres¹⁷ : ainsi, des valeurs d'équivalents de dose inférieures au seuil d'enregistrement du dosimètre sur un mois d'exposition sont assimilées à des doses nulles, mais peuvent être positives dans le cas d'une période de port plus importante du fait du cumul des expositions ;
 - le port en lui-même, qui n'est pas toujours conforme aux prescriptions de la réglementation. Les doses réellement reçues par les porteurs sont dans certains cas surestimées, par exemple lorsque le dosimètre est porté sur le tablier de plomb ou lorsqu'il est placé sur le tube émetteur de rayons X. Dans d'autres cas, les doses sont sous-estimées ou même non enregistrées car les dosimètres ne sont pas portés de façon systématique par les travailleurs.
- la classification des travailleurs dans les différents domaines et secteurs d'activité par les organismes de dosimétrie. En effet, dans un souci d'amélioration de la connaissance des expositions professionnelles aux rayonnements ionisants, l'IRSN a amorcé en 2008 l'utilisation d'une nomenclature unique des secteurs d'activité (présentée à l'annexe I), généralisée à partir de 2009. Mais cette application est encore incomplète et parfois trop peu rigoureuse. Depuis 2009, le bilan annuel est établi en tenant compte de la répartition des travailleurs surveillés selon la classification proposée par cette nomenclature. Par souci de cohérence, les secteurs pour lesquels moins de 20 travailleurs sont enregistrés sont regroupés dans la catégorie « Autres » du domaine concerné.

Un point sur les difficultés rencontrées par les organismes est fait à partir des éléments rapportés dans le cadre d'une enquête faite conjointement à la collecte des données (§ 4.1.1.3).

3.2. BILAN DES EXPOSITIONS INTERNES

Le bilan statistique présenté dans ce rapport a été établi à partir des données communiquées à l'IRSN par les laboratoires de biologie médicale (LBM) ou les services de santé au travail (SST) en charge de la surveillance de l'exposition interne dans les établissements concernés, sur la base d'un questionnaire ou d'une extraction des données de SISERI (LAMR de l'IRSN).

Le bilan général (§ 4.1.2) détaille successivement les données :

- des mesures relatives à la surveillance de routine ;
- celles concernant les mesures réalisées dans le cadre de la surveillance spéciale ou de la surveillance de contrôle, notamment à la suite d'un incident ou d'une suspicion de contamination ;
- enfin, celles relatives aux estimations dosimétriques.

¹⁷ La période durant laquelle le dosimètre doit être porté est fonction de la nature et de l'intensité de l'exposition. Elle ne doit pas être supérieure à un mois pour les travailleurs de catégorie A et à trois mois pour les travailleurs de catégorie B.

Les difficultés rencontrées par les organismes pour la mise en œuvre de la surveillance de l'exposition interne sont également évoquées (§ 4.1.2.4).

Ces données sont ensuite détaillées par secteur dans les paragraphes dédiés à chaque domaine d'activité. Les tableaux présentent pour chaque type d'examen : le nombre de travailleurs suivis quand il est connu, le nombre total d'examens réalisés et, parmi ceux-ci, le nombre d'examens considérés comme positifs suivant les seuils considérés par chaque laboratoire (dans la plupart des cas il s'agit de la limite de détection, mais ce peut être parfois une valeur plus élevée : Cf. § 2.2.2.4). Sont également présentées de façon globale, et ensuite pour chaque domaine, les statistiques concernant le nombre de travailleurs pour lesquels un calcul de dose interne a été effectué au cours de l'année 2011 ainsi que le nombre de travailleurs considérés comme contaminés, c'est-à-dire ceux pour lesquels l'activité mesurée a conduit à une dose efficace annuelle engagée supérieure à 1 mSv, conformément aux recommandations de la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR)¹⁸ et à la norme ISO 20553 [1] qui fixe une valeur maximale pour ce niveau égale à 5 % des limites annuelles de dose.

La méthode de collecte décrite ci-dessus présente un certain nombre de limites qui introduisent les incertitudes suivantes dans le bilan, notamment concernant les effectifs surveillés :

- en fonction de leur activité professionnelle, tous les travailleurs surveillés n'ont pas systématiquement eu d'examen au cours de l'année 2011. C'est pourquoi le nombre d'examens réalisés dans un établissement donné peut être inférieur au nombre de travailleurs considérés comme surveillés dans cet établissement ;
- tous les laboratoires sont en mesure de fournir le nombre total d'examens effectués mais pas toujours le nombre de travailleurs concernés par ces analyses (ce qui explique que le nombre de travailleurs suivis peut être parfois supérieur au nombre d'examens réalisés) ;
- chaque examen n'est pas nécessairement exclusif. Pour un suivi optimal de l'exposition interne, il peut être utile de combiner les différents types de mesure : par exemple, lorsqu'une mesure d'iode 131 par anthroporadiométrie au niveau de la thyroïde donne un résultat positif, il sera généralement effectué à la suite une analyse radiotoxicologique urinaire. La méthode de collecte de données ne permet pas d'éviter des doubles dénombrements de travailleurs suivis, puisque l'effectif est indiqué pour chaque examen, indépendamment du fait qu'un travailleur peut bénéficier d'un autre type d'examen ;
- un travailleur peut avoir bénéficié d'examens anthroporadiométriques dans plusieurs entreprises exploitantes où il est intervenu au cours de la même année. Chaque fois, il est recensé dans le nombre de travailleurs suivis par le laboratoire en charge de l'entreprise.

Par conséquent, il est impossible d'établir précisément le nombre de travailleurs suivis dans le cadre de la surveillance de l'exposition interne. Les nombres de travailleurs qui figurent dans ces

¹⁸ Publication 78, Individual monitoring for internal exposure of workers - Replacement of ICRP Publication 54. vol. 27, n° ¾, 1997.

tableaux doivent donc être considérés avec une certaine précaution et seuls les nombres d'examens présentés sont fiables.

3.3. VERS L'UTILISATION DE SISERI POUR L'ETABLISSEMENT DU BILAN ANNUEL DES EXPOSITIONS DES PROFESSIONNELLES

Des développements de SISERI se poursuivent pour satisfaire aux besoins d'analyses statistiques, en vue notamment de mieux cibler les groupes à risque et vérifier l'adéquation des techniques dosimétriques aux véritables enjeux en termes de type et de niveaux d'exposition. Constatant le renseignement partiel et inhomogène des informations relatives au secteur d'activité du travailleur par les organismes de dosimétrie, l'IRSN a élaboré en 2008 une nomenclature unique des activités. Cette nomenclature a vocation à être progressivement déployée et partagée par tous les acteurs de la surveillance dosimétrique. Formellement approuvée par le COCT en 2009 et, depuis, en phase de déploiement au sein des laboratoires de dosimétrie passive, celle-ci n'a pas encore été adoptée par tous les laboratoires fin 2011, certains ne transmettant toujours pas les données dosimétriques avec cette nomenclature.

Le bilan ne peut donc encore, à ce jour, être complètement réalisé à partir de SISERI. Un certain nombre de données du présent rapport sont cependant d'ores et déjà extraites du système SISERI :

- les données de dosimétrie passive permettant de compléter le bilan de la surveillance de l'exposition externe aux rayonnements neutroniques des travailleurs d'EDF (§ 4.3.1.1) ;
- le bilan des analyses radiotoxicologiques réalisées par le laboratoire de l'IRSN (§ 4.1.2, 4.2.2, 4.2.3, 4.2.4 et 4.2.5) ;
- le bilan des personnels navigants de l'aviation civile (§ 5.3).

Il est souligné que seul l'établissement du bilan à partir du système SISERI permettra d'obtenir un effectif fiable puisque chaque travailleur ne sera compté qu'une fois, indépendamment du nombre de laboratoires ayant assuré son suivi dosimétrique au cours de l'année. A titre d'exemple, le nombre de travailleurs suivis recensés dans SISERI pour l'année 2011 s'élève à 323 362 travailleurs, chiffre qui est effectivement inférieur à l'effectif total établi à partir des données communiquées par chaque laboratoire (Cf. § 4.1.1.1).

4. EXPOSITION DES TRAVAILLEURS AUX RAYONNEMENTS IONISANTS DANS LES ACTIVITES CIVILES SOUMISES A UN REGIME D'AUTORISATION OU DE DECLARATION ET DANS LES ACTIVITES DE DEFENSE

Le bilan qui suit porte sur le suivi par dosimétrie passive des travailleurs dans les activités civiles soumises à un régime d'autorisation ou de déclaration en application du code de la santé publique et dans les activités de la défense. Le premier paragraphe (§ 4.1) de ce chapitre présente les statistiques globales de l'exposition des travailleurs dans ces domaines d'activité. Les paragraphes suivants présentent les statistiques détaillées pour chaque domaine d'activité :

- activités médicales et vétérinaires (§ 4.2) ;
- nucléaire (§ 4.3) ;
- industrie non nucléaire (§ 4.4);
- recherche (§ 4.5).

Présentation des résultats : sommaire commun aux paragraphes dédiés à chaque domaine d'activité

4.X.1. BILAN DES EXPOSITIONS EXTERNES

4.X.1.1 Dosimétrie « corps entier »

Dosimétrie « corps entier » : analyse suivant les activités professionnelles

Exposition externe totale (photons et neutrons)

Contribution des neutrons

Dosimétrie « corps entier » : évolution sur la période 1996-2011

Exposition externe totale (photons et neutrons)

Contribution des neutrons

4.X.1.2 Dosimétrie des extrémités

Dosimétrie par bague

Dosimétrie au poignet

4.X.2. BILAN DES EXPOSITIONS INTERNES

4.X.2.1 Surveillance de routine

4.X.2.2 Surveillance spéciale ou de contrôle

4.X.2.3 Estimations dosimétriques

4.X.3. DEPASSEMENTS DES LIMITES ANNUELLES REGLEMENTAIRES DE DOSE

4.X.4. SUIVI DES EVENEMENTS ET INCIDENTS DE RADIOPROTECTION

La présentation adoptée permet d'utiliser ce rapport soit de façon générale, soit en se focalisant sur un domaine particulier.

4.1. RESULTATS GENERAUX

4.1.1. BILAN DES EXPOSITIONS EXTERNES

4.1.1.1. Dosimétrie « corps entier »

Dosimétrie « corps entier » : analyse suivant les activités professionnelles

Exposition externe totale (photons et neutrons)

Le tableau 4 présente les données agrégées pour chaque domaine d'activité : effectifs surveillés, dose collective¹⁹, dose individuelle moyenne et effectif ayant dépassé la limite annuelle réglementaire.

Tableau 4 - Bilan synthétique des doses externes passives - 2011

Domaine d'activité	Effectif surveillé	Dose collective (homme.Sv)	Dose individuelle moyenne sur l'effectif total ^(a) (mSv)	Dose individuelle moyenne sur l'effectif exposé ^(b) (mSv)	Répartition des effectifs par classes de dose					
					< seuil	du seuil à 1 mSv	de 1 à 6 mSv	de 6 à 15 mSv	de 15 à 20 mSv	> 20 mSv
Utilisations médicales et vétérinaires	214 432	20,51	0,10	0,54	176 230	34 643	3 168	367	16	8
Nucléaire ^(c)	68 344	25,12	0,37	1,18	47 050	14 773	5 767	749	4	1
Usages industriels	32 190	16,87	0,52	1,60	21 669	6 821	2 932	757	9	2
Recherche ^(d)	14 601	0,67	0,05	0,47	13 170	1 371	58	1	0	1
Autres ^(e)	14 421	1,08	0,07	0,61	12 601	1 625	181	13	1	0
Total	343 988	64,24	0,19	0,88	270 720	59 233	12 106	1 887	30	12

(a) Dose individuelle moyenne sur l'effectif total = dose collective / effectif total surveillé.

(b) Dose individuelle moyenne sur l'effectif exposé = dose collective / effectif surveillé pour lequel la dose est supérieure au seuil d'enregistrement.

(c) Le domaine du nucléaire inclut également le transport de matières radioactives dans les activités liées à ce domaine.

(d) Le domaine de la recherche inclut la recherche médicale, les activités au sein des installations de recherche liées au nucléaire, la recherche (autre que médicale et nucléaire) et l'enseignement.

(e) La catégorie « Autres » regroupe les secteurs d'activité suivants : la gestion des situations de crise, l'inspection et le contrôle, les activités à l'étranger, les activités de transports de sources dont l'utilisation n'est pas précisée ainsi que les activités non classées d'après la nomenclature. Le

¹⁹ La dose collective est la somme des doses individuelles reçues par un groupe de personnes. A titre d'exemple, la dose collective de 10 personnes ayant reçu chacune 1 mSv est égale à 10 homme.mSv.

secteur des activités à l'étranger n'est encore que peu identifié en termes de classification des travailleurs, avec la difficulté supplémentaire dans le cadre du bilan annuel que les activités à l'étranger sont souvent conduites une partie seulement de l'année.

Le nombre de travailleurs surveillés par dosimétrie externe passive en 2011 est de 343 988, soit 13 370 travailleurs de plus qu'en 2010, ce qui correspond à une augmentation de 4 %.

La dose collective s'élève à 64,24 homme.Sv, soit une augmentation de 3 % par rapport à 2010.

Comme en 2010, la dose individuelle annuelle moyenne est égale à 0,19 mSv. La dose individuelle annuelle moyenne calculée sur le nombre de travailleurs ayant reçu une dose supérieure au seuil d'enregistrement est de 0,88 mSv, en légère augmentation par rapport à la valeur de 0,82 mSv obtenue en 2010, et comparable à la valeur de 0,89 mSv enregistrée en 2009.

95,9 % des travailleurs surveillés ont reçu une dose annuelle inférieure à la limite réglementaire d'exposition du public, soit 1 mSv/an ; 78,7 % n'ont reçu aucune dose au cours de l'année (doses mesurées inférieures au seuil d'enregistrement) ; 3,5 % des travailleurs surveillés ont une dose annuelle comprise entre 1 et 6 mSv et 0,5 % une dose annuelle comprise entre 6 et 20 mSv. Enfin, 12 travailleurs ont enregistré une dose supérieure à 20 mSv, 5 une dose supérieure à 50 mSv. La dose maximale est égale à 160 mSv, reçue par un travailleur de la recherche (Cf. § 4.5.3).

La répartition des travailleurs par classe de doses est comparable à celle de 2010.

Bien que 62 % des effectifs surveillés soient employés dans le domaine des activités médicales et vétérinaires, ce domaine représente 32 % de la dose collective totale. Le nucléaire représente 20 % de l'effectif total et contribue à près de 40 % de la dose collective totale. L'industrie non nucléaire représente près de 10 % de l'effectif total et plus du quart de la dose collective totale. La recherche contribue pour 1 % à la dose collective et pour 4 % à l'effectif.

En 2011, les doses individuelles annuelles moyennes calculées sur l'effectif total de chaque domaine sont restées stables par rapport à 2010 dans tous les domaines. C'est dans le domaine des activités médicales et vétérinaires et dans la recherche que les doses individuelles annuelles moyennes sont les plus faibles (inférieures ou égales à 0,1 mSv). A l'opposé, les travailleurs de l'industrie non nucléaire ont les doses annuelles les plus élevées en moyenne (0,54 mSv), suivis des travailleurs du nucléaire avec une dose individuelle annuelle moyenne de 0,37 mSv.

Les doses moyennes calculées sur l'effectif exposé sont légèrement plus élevées qu'en 2010 dans le domaine médical, le nucléaire et l'industrie non nucléaire (égales respectivement à 0,51 mSv, 1,12 mSv et 0,52 mSv en 2010). Dans le domaine de la recherche, la dose moyenne sur l'effectif exposé augmente de 0,37 mSv à 0,47 mSv entre 2010 et 2011, essentiellement du fait de la forte dose (160 mSv) enregistrée en 2011 dans ce domaine.

Les travailleurs des activités de défense suivis par le SPRA représentent 2,6 % de l'effectif total surveillé, avec une contribution à hauteur de 1,5 % de la dose collective.

Le tableau 5 présente la répartition entre port mensuel et port trimestriel des dosimètres « corps entier » dans les grands domaines d'activité en 2011. Elle est proche de la répartition observée en

2010 dans tous les domaines sauf dans l'industrie non nucléaire où la proportion de travailleurs suivis mensuellement a augmenté de 59 % à 72 %. Le port mensuel reste majoritaire dans les domaines du nucléaire et de l'industrie non nucléaire alors que dans les domaines des activités médicales et vétérinaires et de la recherche, c'est le port trimestriel qui est le plus fréquemment pratiqué.

Tableau 5 - Répartition entre port mensuel et port trimestriel suivant les domaines d'activité

Domaine d'activité	Port mensuel (%)	Port trimestriel (%)	Effectifs considérés (*)
Utilisations médicales	33	67	212 710
Nucléaire	72	28	64 019
Industrie non nucléaire	72	28	31 228
Recherche	16	84	13 813

(*) i. e. pour lesquels les données sont disponibles.

Contribution des neutrons

En 2011, un suivi de l'exposition aux neutrons a été mis en œuvre pour 43 228 travailleurs (vs 36 073 travailleurs en 2010), soit 13 % de l'effectif total surveillé. La dose collective « neutrons » est de 1,88 homme.Sv (vs 1,52 homme.Sv en 2010). La dose collective due aux neutrons représente 3 % de la dose collective totale (toutes composantes de rayonnements confondues).

Il convient de noter que, contrairement aux années passées, ces données incluent l'effectif suivi au sein d'EDF, ainsi que la dose collective associée (Cf. § 4.3.1.1), grâce à une extraction des données de SISERI.

La répartition par domaine d'activité est proche de celle observée les années précédentes : 61 % des effectifs suivis pour leur exposition aux neutrons appartiennent au domaine nucléaire, et contribuent à la dose collective à hauteur de 84 % (figure 8). Les effectifs suivis dans l'industrie non nucléaire et la recherche représentent respectivement 17 % et 10 % de l'effectif total, avec des contributions à la dose collective totale inférieures à 3 %. Le domaine médical représente moins de 10 % des effectifs surveillés mais 8 % de la dose collective, du fait notamment de l'enregistrement d'une valeur élevée (115 mSv).

La dose individuelle maximale enregistrée sur l'effectif total suivi pour une exposition aux neutrons, égale à 115 mSv, concerne le secteur médical de la radiothérapie, et constitue de fait un cas de dépassement de la limite réglementaire annuelle de dose.

Les travailleurs dans les activités de défense suivis par le SPRA représentent 6,2 % de l'effectif total surveillé pour l'exposition aux neutrons, avec une contribution à hauteur de 4,9 % de la dose collective.

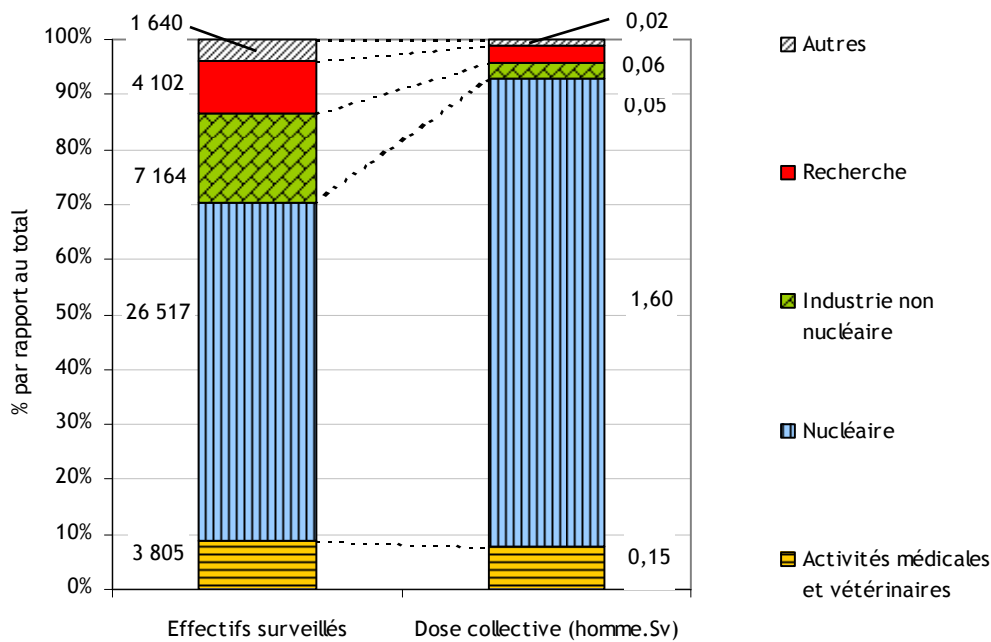


Figure 8 - Répartition des effectifs surveillés et des doses collectives pour la dosimétrie des neutrons en 2011

Dosimétrie « corps entier » : évolution sur la période 1996-2011

Exposition externe totale (photons et neutrons)

La figure 9 présente l'évolution des effectifs surveillés et de la dose collective entre 1996 et 2011.

Sur cette période, l'effectif total surveillé est passé de 230 385 à 343 988 travailleurs, soit une augmentation de près de 50 %. Cette évolution est le résultat d'une croissance des activités mettant en œuvre des sources de rayonnements ionisants mais également celui d'une plus large surveillance des travailleurs professionnellement exposés, particulièrement dans le domaine médical (Cf. figure 20). Dans le même temps, la dose collective a globalement diminué, avec cependant une tendance à l'augmentation à partir de 2006 qui semble stagner sur les trois dernières années. Entre 2010 et 2011, l'augmentation de l'effectif et de la dose collective sont respectivement de 4 % et 3 %.

L'augmentation des effectifs observée depuis 2008 indique une réelle progression du nombre de travailleurs suivis, et non plus l'intégration progressive des données de tous les laboratoires dans le bilan comme ce fut le cas en 2005 et 2007.

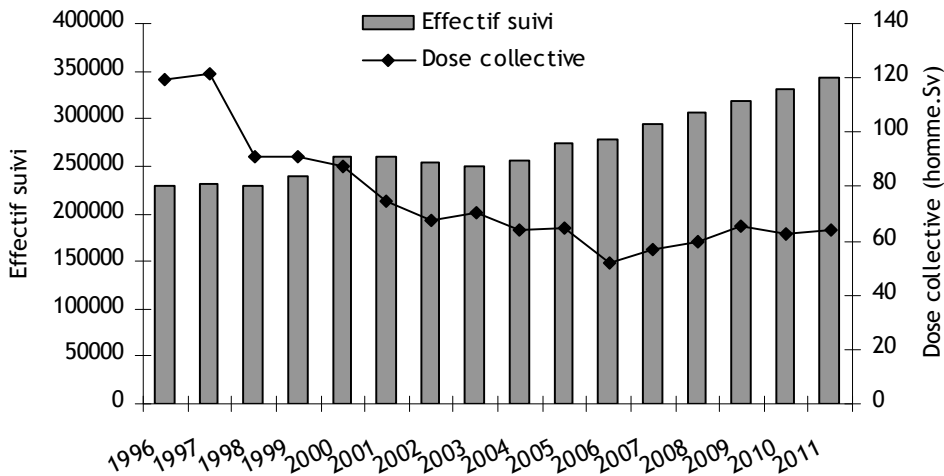


Figure 9 - Evolution des effectifs surveillés et de la dose collective, de 1996 à 2011

Contribution des neutrons

Après une certaine stagnation, voire une diminution entre 2005 et 2007, la dose collective due aux neutrons retrouve en 2008 le niveau atteint en 2005 ; cette augmentation se poursuit jusqu'en 2011. Les effectifs surveillés sont en augmentation de 20 % entre 2010 et 2011, avec une augmentation de la dose collective à hauteur de 24 % (figure 10).

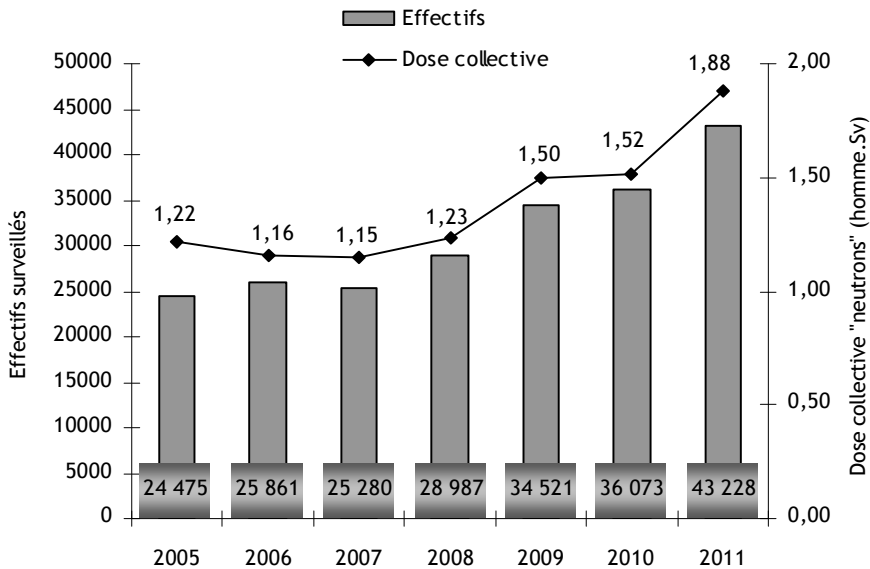


Figure 10 - Evolution des effectifs surveillés et des doses collectives pour l'exposition spécifique aux neutrons de 2005 à 2011

L'augmentation de 24 % de la dose collective observée entre 2010 et 2011 se répartit principalement de la façon suivante :

- 8 % sont liés à l'enregistrement d'une dose particulièrement élevée dans le domaine médical (115 mSv, correspondant à un cas de dépassement de la limite annuelle réglementaire)
- 7 % concernent le secteur des prestataires chargés des activités de logistique et de maintenance du domaine nucléaire, dont l'effectif augmente de 15 % ;
- 4 % concernent la prise en compte depuis 2011 seulement de l'effectif suivi au sein d'EDF, qui correspond à une augmentation de 8 % de l'effectif total suivi pour l'exposition aux neutrons.

4.1.1.2. Dosimétrie des extrémités

Des dosimètres d'extrémités (dosimètres « bague », dosimètres « poignet ») sont portés par les travailleurs dont les mains ou les membres sont susceptibles d'être soumis, au cours de leurs tâches, à une exposition aux rayonnements ionisants significative par rapport au reste de leur organisme. C'est le cas par exemple des médecins réalisant une biopsie viscérale sous rayonnements ionisants ou encore des opérateurs effectuant des manipulations de sources radioactives en boîtes à gants.

La mesure de la dose équivalente aux extrémités, à l'endroit le plus exposé, doit permettre de vérifier le respect de la limite réglementaire (§ 2.1). Le choix entre la dosimétrie au poignet et la dosimétrie par bague doit reposer sur l'analyse précise des postes de travail. Globalement, les deux types de dosimètres sont utilisés dans la même proportion. Toutefois la situation est un peu plus contrastée suivant le domaine d'activité (figure 11). Il apparaît que le port du dosimètre poignet est largement prédominant dans le nucléaire. La recherche et l'industrie non nucléaire utilisent légèrement plus les bagues que le dosimètre poignet, alors que l'utilisation des bagues est majoritaire dans le domaine des activités médicales et vétérinaires. L'IRSN souligne que pour une même source d'exposition, le dosimètre porté au poignet ne fournit en général pas une mesure de la dose maximale pouvant être reçue aux extrémités. La surveillance à l'aide de dosimètres poignet doit en tenir compte, le cas échéant en appliquant un facteur correctif au résultat de la mesure, pour faire en sorte que les doses plus importantes reçues aux doigts des travailleurs respectent bien les limites réglementaires. A l'heure actuelle, seuls les résultats de la dosimétrie poignet d'une partie des travailleurs du nucléaire intègrent un tel facteur correctif.

La répartition entre les deux types de dosimétrie évolue différemment suivant les domaines d'activité. Dans le nucléaire, l'augmentation de la proportion des dosimètres bague observée ces dernières années ne s'est pas poursuivi en 2011 (2 % de bagues en 2008, 17 % en 2009, 21 % en 2010 et 16 % en 2011) et la dose totale associée reste faible au regard de celle enregistrée au poignet dans ce domaine (figures 12 et 13). Concernant les activités médicales et vétérinaires, la progression des bagues se poursuit : 37 % en 2008, 50 % en 2009, 58 % en 2010 et 63 % en 2011. La proportion des dosimètres bagues dans l'industrie non nucléaire est relativement stable : 57 % en 2008, 51 % en 2009, 52 % en 2010 et 55 % en 2011. Après une diminution enregistrée ces dernières années, le

domaine de la recherche connaît à nouveau en 2011 une augmentation de la proportion de bagues : 70 % en 2008, 67 % en 2009, 44 % en 2010 et 53 % en 2011.

Ces résultats sont cependant à considérer avec une certaine prudence, car fortement dépendants de la qualité de la classification des travailleurs suivant leur activité.

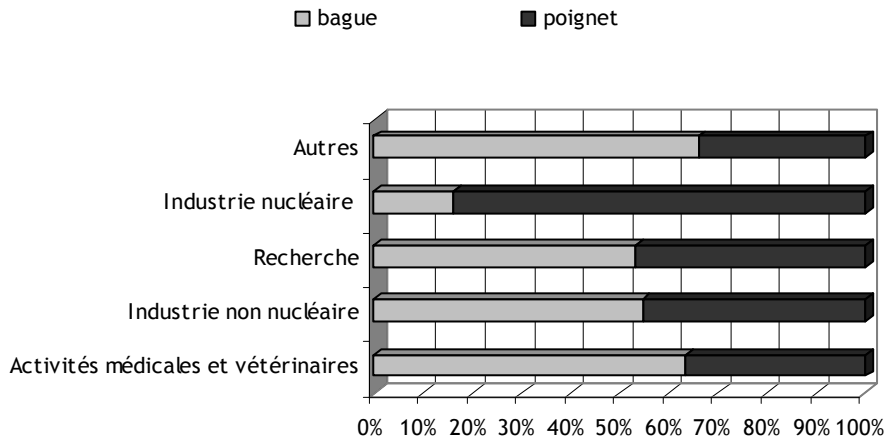


Figure 11 - Importance relative de la surveillance de l'exposition aux extrémités par dosimétrie par bague ou au poignet en 2011, suivant les domaines d'activité

Dosimétrie par bague

En 2011, l'effectif surveillé par une dosimétrie par bague est presque aussi important que celui surveillé par une dosimétrie poignet. Les années précédentes avaient montré la prédominance du port de dosimètre poignet, s'expliquant en partie par la contrainte supplémentaire que représente pour le travailleur le port d'une bague par rapport au dosimètre poignet. Cette augmentation relative de la part des bagues peut traduire à la fois l'intégration progressive de nouvelles pratiques plus optimales ou l'adoption d'emblée des bagues pour de nouveaux effectifs surveillés aux extrémités.

La dose totale pour la dosimétrie par bague (doigts) est de 83,91 Sv pour 11 336 travailleurs surveillés en 2011, soit en moyenne une dose aux extrémités de 7,4 mSv sur l'année (ils étaient 9 795 travailleurs surveillés en 2010 et leur dose totale s'élevait à 70,3 Sv). La dose individuelle maximale enregistrée (travailleur du domaine médical) est égale à 1 116 mSv, ce qui constitue un dépassement de la limite réglementaire annuelle de 500 mSv. Le domaine des activités médicales et vétérinaires contribue à hauteur de 66 % des effectifs mais représente 88 % de la dose totale (figure 13).

Dosimétrie au poignet

En 2011, la dosimétrie au poignet montre une dose totale de 59,26 Sv pour 11 850 travailleurs surveillés, soit en moyenne une dose aux extrémités de 5,0 mSv sur l'année (ils étaient 11 704 travailleurs surveillés en 2010 et la dose totale s'élevait à 62,9 Sv). La dose individuelle maximale enregistrée au poignet est égale à 386 mSv et concerne un travailleur du nucléaire. Alors que le nombre de travailleurs ayant une dosimétrie au poignet est sensiblement le même dans le domaine du nucléaire et celui des activités médicales et vétérinaires, le domaine nucléaire représente à lui seul 91 % de la dose totale enregistrée en 2011 (figure 13).

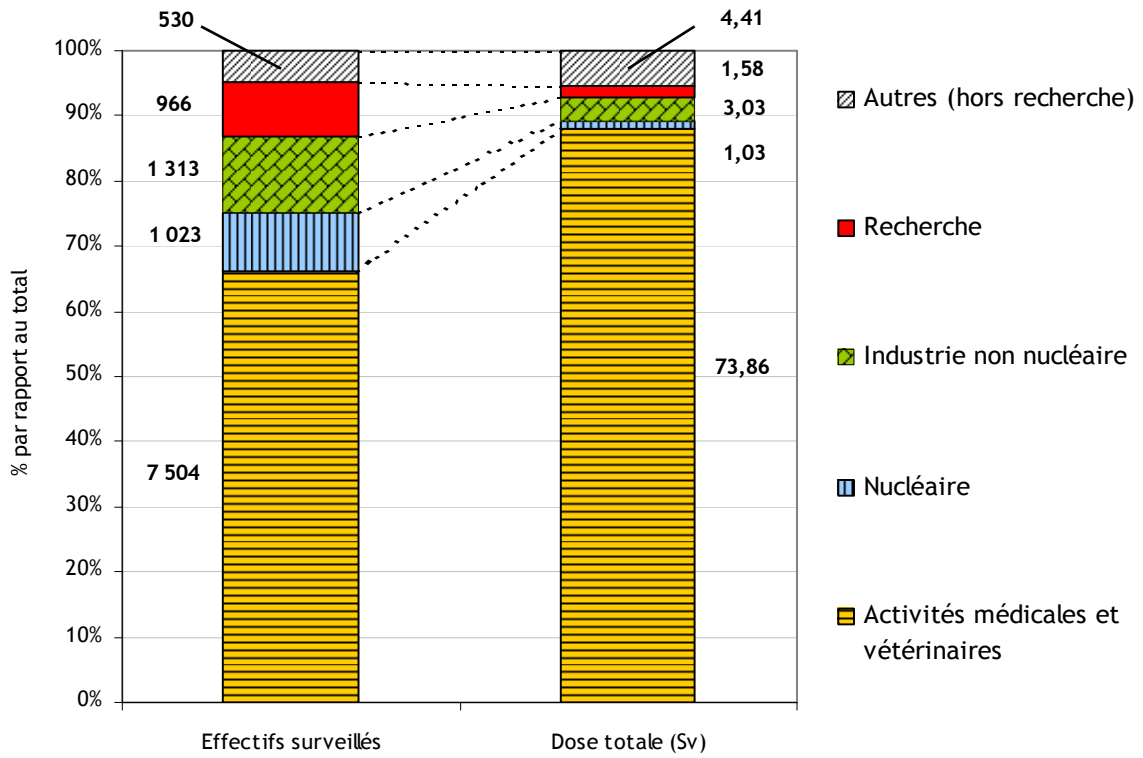


Figure 12 - Répartition des effectifs surveillés et des doses enregistrées pour la dosimétrie bague en 2011

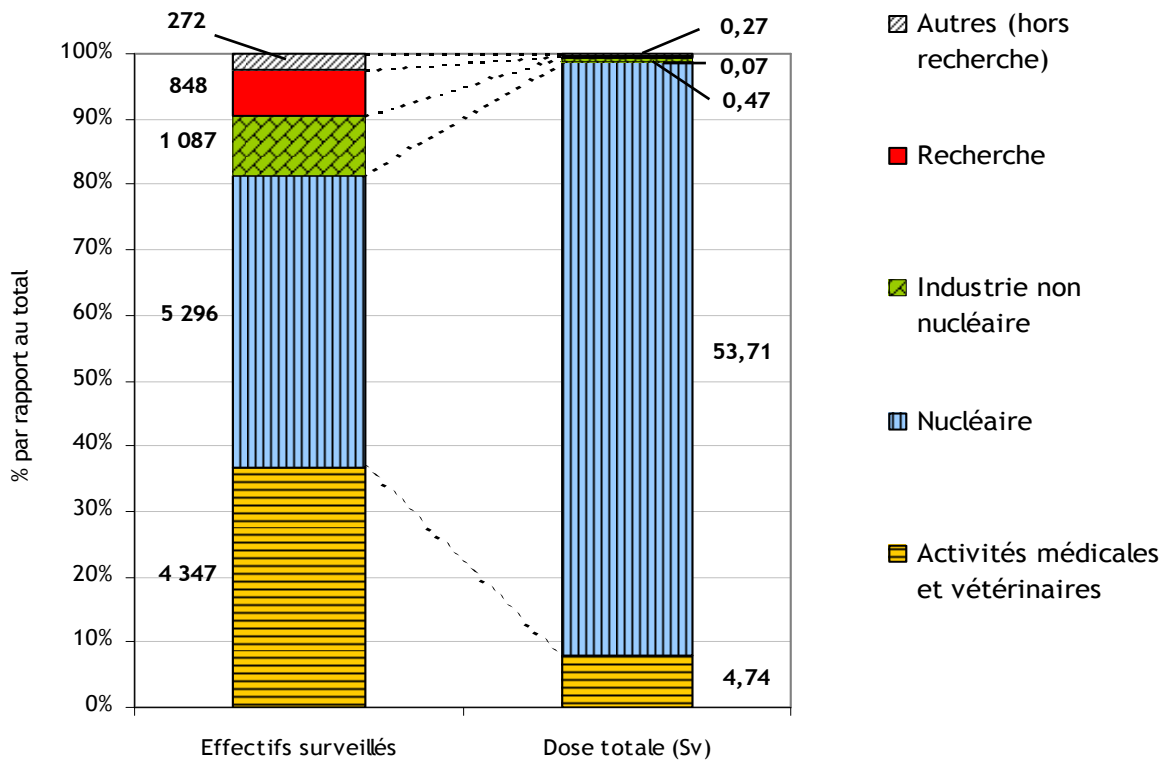


Figure 13 - Répartition des effectifs surveillés et des doses enregistrées pour la dosimétrie au poignet en 2011

4.1.1.3. Difficultés liées à la surveillance de l'exposition externe des travailleurs

Les résultats de l'enquête réalisée par l'IRSN auprès des laboratoires à l'occasion de la collecte des données présentées dans ce bilan montrent que le taux moyen de retour des dosimètres ayant été portés est compris entre 96 % et 100 %. Le taux de dosimètres rendus avec un retard de 1 à 3 mois varie de 1 % à 5 % selon les laboratoires, il est entre 0,2 % et 4 % pour les retards de 4 à 6 mois et inférieur à 0,1 % pour ceux supérieurs à 6 mois. Le taux de dosimètres inexploitable à leur retour au laboratoire est au maximum de 1 %. Il faut toutefois souligner que ces chiffres ne portent que sur 44 % de l'effectif suivi ; en effet, tous les laboratoires n'ont pas répondu à cette enquête et les données renvoyées par le SPRA n'ont pas été agrégées du fait que certains établissements de la défense ne peuvent retourner les dosimètres dans les délais pour des raisons opérationnelles. Parmi les autres difficultés rapportées par les laboratoires, de façon purement qualitative, il faut citer des cas d'inversion entre dosimètre d'ambiance et dosimètre témoin, entre dosimètre poitrine et dosimètre poignet, ou encore entre dosimètre mensuel et dosimètre trimestriel, mais aussi l'absence de dosimètres témoins, les difficultés d'obtention des données administratives associées au porteur, ou encore des cas de dosimètres portés par plusieurs personnes.

4.1.2. BILAN DES EXPOSITIONS INTERNES

4.1.2.1. Surveillance de routine

Dans le bilan général concernant la surveillance de routine, il apparaît que les examens anthroporadiométriques sont les plus nombreux, avec 214 775 examens réalisés en 2011, suivis par les analyses radiotoxicologiques des prélèvements nasaux et des urines, avec respectivement 76 374 et 42 828 examens pour des effectifs correspondants de 3 314 et 12 614 travailleurs. Enfin, 7 400 analyses radiotoxicologiques fécales ont été réalisées. Le nombre total d'examens réalisés en 2011, toutes analyses confondues, s'élève à 341 377.

Surveillance de routine : répartition suivant les activités professionnelles

Le tableau 6 présente la répartition des examens effectués dans le cadre d'une surveillance de routine suivant les domaines d'activité.

La figure 14 présente le nombre d'examens effectués dans le cadre d'une surveillance de routine dans chaque domaine d'activité et suivant le type d'examen. Le détail est présenté dans les paragraphes dédiés à chaque domaine.

Tableau 6 - Exposition interne : surveillance de routine dans les différents domaines d'activité en 2011

Domaines d'activité	Nombre total d'examens	Nombre d'examens considérés positifs ^(*)
Activités médicales et vétérinaires	13 373	79
Industrie non nucléaire	403	0
Nucléaire	315 500	340
Recherche	10 503	5
Autres	1 598	112
Total	341 377	536

(*) Les examens considérés positifs sont ceux dont le résultat est supérieur à la limite d'interprétation opérationnelle définie au préalable avec le prescripteur, ou, à défaut, à la limite de détection (LD).

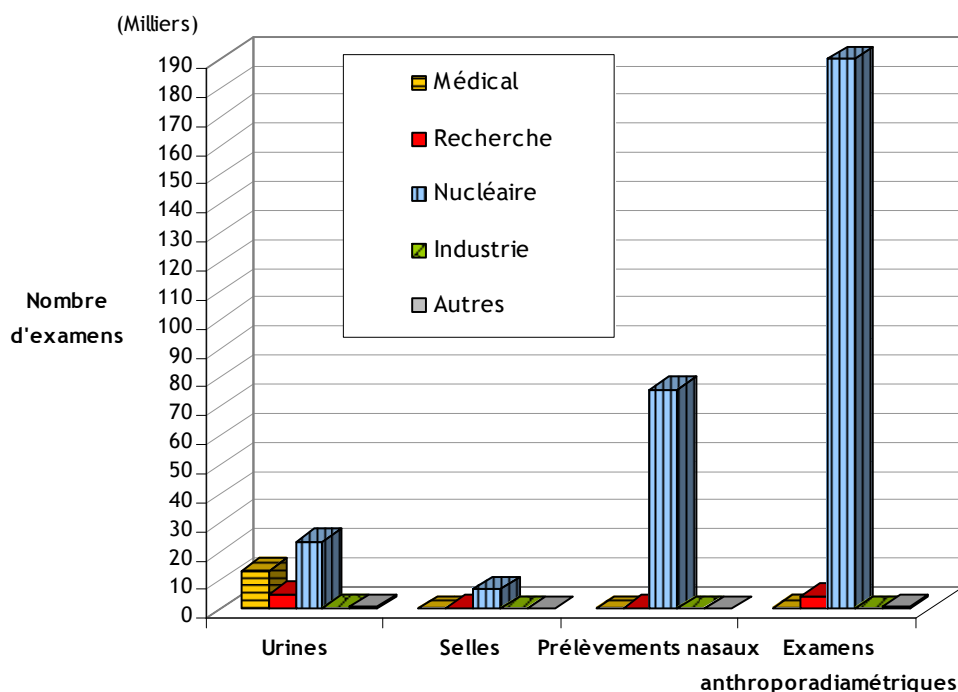


Figure 14 - Nombre d'examens suivant les types d'analyses mises en œuvre pour assurer la surveillance de l'exposition interne dans les grands domaines d'activité en 2011 (surveillance de routine)

Il apparaît que les grandes entreprises du nucléaire font appel à l'ensemble des techniques de surveillance, avec une forte prédominance des examens anthroporadiométriques sur les analyses radiotoxicologiques (à noter que parmi les 214 775 examens anthroporadiométriques réalisés en 2011, 180 628 l'ont été dans les centrales nucléaires d'EDF). Le suivi des personnels dans les établissements du domaine médical repose essentiellement sur des analyses radiotoxicologiques urinaires. Les personnels du domaine de la recherche bénéficient plus rarement d'une surveillance de l'exposition interne.

Les modalités de surveillance mises en œuvre s'expliquent à la fois par la nature des radionucléides à mesurer dans les différents secteurs, mais aussi par des considérations logistiques. Alors qu'il est relativement simple d'organiser un contrôle anthroporadiométrique au CEA, chez AREVA et chez EDF, dont les différents sites disposent des installations de mesure nécessaires, un tel contrôle des personnels du domaine médical ou de celui de la recherche est beaucoup plus difficile à mettre en œuvre : en pratique, les personnes doivent se déplacer dans les laboratoires de l'IRSN situés en région parisienne, à moins d'utiliser les moyens mobiles de l'Institut (§ 6.4).

Surveillance de routine : évolution sur la période 2006-2011

Après la légère diminution de 0,4 % observée en 2010, l'évolution du nombre total d'examens réalisés en 2011 reprend la tendance observée en 2009 (+10 % en 2011 et +6,5 % en 2009).

La figure 15 détaille ces évolutions en fonction du type d'examen entre 2006 et 2011, et montre que la proportion des types d'examen réalisés pour la surveillance de l'exposition interne des travailleurs est globalement stable sur cette période.

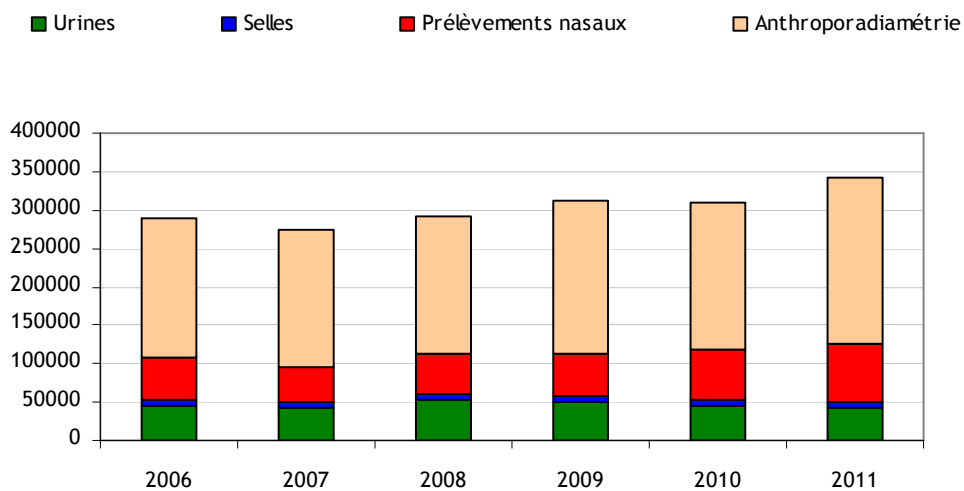


Figure 15 - Evolution du nombre d'examens réalisés dans le cadre de la surveillance de routine entre 2006 et 2011 (tous secteurs d'activité confondus)

4.1.2.2. Surveillance spéciale ou surveillance de contrôle

En 2011, 15 782 examens ont été réalisés dans le cadre d'une surveillance spéciale ou d'une surveillance de contrôle. Seule une partie d'entre eux ont été réalisés à la suite d'un événement classé comme événement significatif de radioprotection. Pour 470 examens, soit 3 %, le résultat a été positif.

Surveillance spéciale ou de contrôle : répartition suivant les activités professionnelles

Le tableau 7 présente la répartition des examens réalisés dans le cadre de cette surveillance suivant les domaines d'activité. En 2011, 96 % des examens réalisés dans le cadre de la surveillance spéciale ou de contrôle concernent le domaine nucléaire.

Tableau 7 - Exposition interne : surveillance spéciale ou de contrôle dans les différents domaines d'activité en 2011

Domaines d'activité	Nombre de travailleurs suivis	Nombre total d'examens	Nombre d'examens considérés positifs ^(*)
Activités médicales et vétérinaires	101	232	8
Industrie non nucléaire	51	162	3
Nucléaire	8 404	14 264	455
Recherche	248	763	2
Autres	214	361	2
Total	9 018	15 782	470

(*) Les examens positifs sont ceux dont le résultat est supérieur à la limite d'interprétation opérationnelle définie au préalable avec le prescripteur, ou, à défaut, à la limite de détection (LD).

Surveillance spéciale ou de contrôle : évolution sur la période 2006-2011

L'effectif total suivi dans le cadre de la surveillance spéciale ou de contrôle est de 9 018 travailleurs en 2011. Ce chiffre est considérablement plus élevé que ceux enregistrés les années précédentes, à savoir 1 601, 1 344, 1 421 et 1 498 travailleurs en 2006, 2007, 2008 et 2009 respectivement, car jusqu'en 2010, le nombre de travailleurs EDF concernés par cette surveillance n'était pas connu (il est de 7 007 travailleurs en 2011).

L'évolution des nombres d'examens concerne uniquement la période de 2008 à 2011, ces données n'étant pas connues pour 2006 et 2007. Le nombre d'examens réalisés dans ce cadre a augmenté de 9 % entre 2008 et 2009, et entre 2009 et 2010, mais l'augmentation est plus marquée entre 2010 et 2011 (+38 %), et la proportion d'examens considérés comme positifs a doublé entre 2010 et 2011. Pour autant, cette évolution ne se retrouve pas en termes d'estimations dosimétriques (Cf. bilan ci-après).

4.1.2.3. Estimations dosimétriques

Estimations dosimétriques : répartition suivant les activités professionnelles

En 2011, 364 travailleurs ont fait l'objet d'un calcul de dose engagée. Ce sont pour 96 % d'entre eux des travailleurs du domaine nucléaire.

Tous domaines d'activité confondus, 9 cas d'exposition interne conduisant à une dose efficace engagée supérieure à 1 mSv ont été rapportés. La dose individuelle la plus élevée (3,2 mSv) a été enregistrée dans le secteur des installations de recherche liées au nucléaire.

Estimations dosimétriques : évolution sur la période 2006-2011

La figure 16 présente pour les années 2006 à 2011 le nombre de travailleurs pour lesquels le calcul de la dose a conduit à une dose efficace engagée supérieure à 1 mSv, ainsi que les doses individuelles maximales enregistrées.

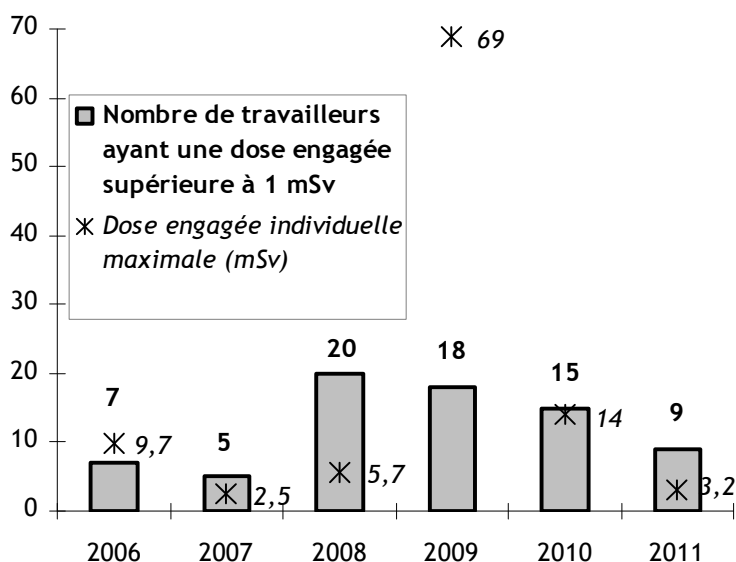


Figure 16 - Evolution, de 2006 à 2011, du nombre de travailleurs ayant une dose engagée supérieure à 1 mSv

4.1.2.4. Difficultés liées à la surveillance de l'exposition interne des travailleurs

Le questionnaire envoyé par l'IRSN aux laboratoires pour établir le bilan 2011 permettait à ces derniers de faire remonter les difficultés éventuelles rencontrées dans leur travail en termes de délais de retour d'échantillons, de volumes exploitables, etc. Parmi les laboratoires ayant répondu à cette partie du questionnaire, plusieurs déclarent ne rencontrer aucune difficulté. Il ressort des réponses apportées par les autres laboratoires que le taux d'échantillons rendus hors délai varie entre 1 % et 5 % suivant les laboratoires, et que le volume des échantillons d'urines ou de selles collectées sur 24h est insuffisant dans moins de 1 % des cas.

Concernant les estimations dosimétriques, un service de santé au travail évoque la difficulté de réaliser des examens complémentaires (en cas de résultats positifs lors d'un examen de fin de chantier) ou celle d'effectuer des calculs de dose pour les travailleurs d'entreprises extérieures ayant quitté le site de l'exploitant à la fin de leur mission.

4.1.3. DEPASSEMENTS DES LIMITES ANNUELLES REGLEMENTAIRES DE DOSE

Le bilan établi fin avril 2012 met en évidence un dépassement de l'une des limites réglementaires de dose, entre le 1^{er} janvier 2011 et le 31 décembre 2011, pour 15 travailleurs (tableau 8).

Tableau 8 - Dépassements des limites annuelles réglementaires de doses : bilan 2011

	Nombre de travailleurs
Dose efficace	12
<i>due à une exposition externe</i>	<i>12</i>
<i>due à une exposition interne</i>	<i>0</i>
Dose équivalente aux extrémités	3
Dose équivalente à la peau	0

Le dépassement de la limite réglementaire de dose efficace est dû à une dose externe supérieure à 20 mSv, reçue soit sur une seule période de port du dosimètre (10 cas), soit par cumul sur plusieurs périodes de port (les 2 autres cas).

Cinq travailleurs ont reçu une dose efficace annuelle proche de 25 mSv. Pour deux autres travailleurs, la dose efficace annuelle est comprise entre 30 et 35 mSv. Cinq travailleurs ont reçu plus de 50 mSv, leur dose efficace annuelle étant comprise entre 55 mSv et 160 mSv.

Des dépassements de la limite réglementaire de dose efficace sont observés dans les différents domaines d'activité : 8 travailleurs exercent dans le domaine médical, 1 dans le nucléaire, 2 dans le domaine industriel non nucléaire et 1 dans le domaine de la recherche.

Les dépassements de la limite de dose équivalente aux extrémités se sont produits, pour les 3 travailleurs concernés, par cumul des doses reçues sur 12 mois. Les 3 travailleurs exercent dans le domaine médical et plus précisément dans le secteur de la radiologie interventionnelle.

L'IRSN n'a pas reçu le retour des conclusions d'enquête, qui doit être diligentée par le médecin du travail selon les dispositions réglementaires, pour 9 des 12 cas de dépassements recensés pour 2011. Les investigations de l'IRSN ont montré que pour la plupart de ces cas, il s'agit de travailleurs ayant un suivi dosimétrique mais pour lesquels le contact avec un médecin du travail n'a pu être établi.

Evolution sur la période 1996-2011

La figure 17 présente l'évolution de 1996 à 2011 du nombre de travailleurs surveillés dont la dose annuelle est supérieure à 20 mSv.

En 1996, 905 travailleurs surveillés avaient reçu une dose externe supérieure à 20 mSv. Ce nombre a été divisé par 13 entre 1996 et 2000. La situation est restée relativement stable entre 2000 et 2004, année au cours de laquelle l'IRSN a commencé à tracer chacun des signalements de dépassement

pour avoir accès aux conclusions de l'enquête menée par le médecin du travail. Le nombre des dépassements a ensuite diminué jusqu'en 2010. En 2011, 4 cas de plus qu'en 2010 ont été observés.

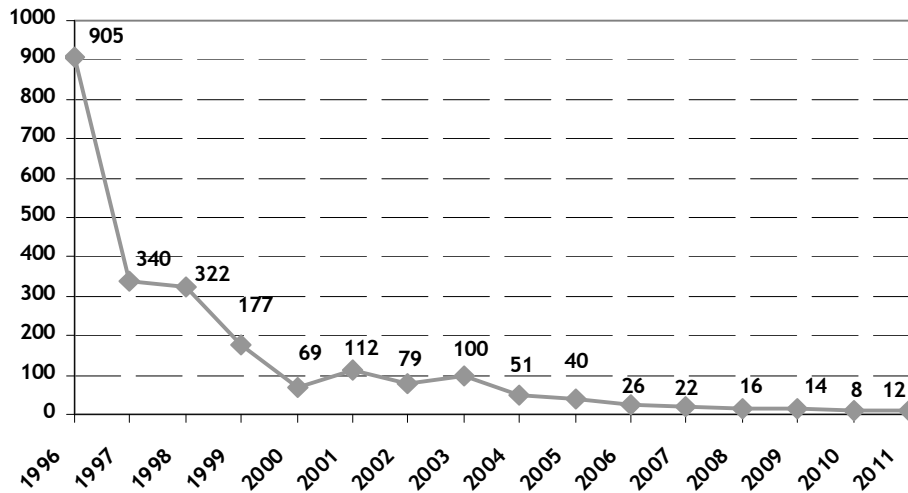


Figure 17 - Evolution, de 1996 à 2011, du nombre de travailleurs surveillés dont la dose externe annuelle est supérieure à 20 mSv

La figure 18 présente la répartition des travailleurs surveillés dont la dose annuelle est supérieure à 20 mSv selon les domaines d'activité sur la période 2004-2011. Le domaine des activités médicales et vétérinaires est celui où les effectifs présentant les doses les plus élevées sont les plus nombreux. C'est aussi le domaine où les travailleurs suivis sont les plus nombreux et où les écarts par rapport aux bonnes pratiques de port des dosimètres étaient précédemment les plus importants et il est vraisemblable qu'un certain nombre des fortes valeurs observées dans les années 90 n'aient pas été réellement reçues (typiquement, le dosimètre reste dans la salle d'examen et enregistre alors une dose significative non reçue par le travailleur, ou le dosimètre est porté au-dessus du tablier de plomb et non en-dessous,...).

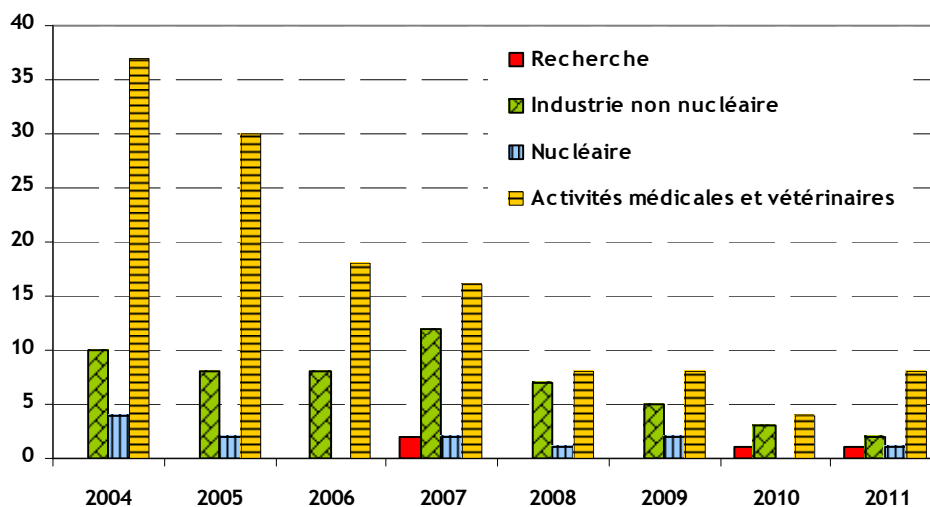


Figure 18 - Répartition par domaine d'activité du nombre de travailleurs surveillés dont la dose externe annuelle est supérieure à 20 mSv (période 2004-2011)

4.1.4. SUIVI DES EVENEMENTS ET INCIDENTS DE RADIOPROTECTION

4.1.4.1. Bilan de l'année 2011

Parmi l'ensemble des événements concernant la radioprotection que l'IRSN a recensés en 2011, 202 concernent directement les travailleurs. La figure 19 illustre la répartition de ces événements selon les domaines d'activité. Ces événements concernent très majoritairement le domaine nucléaire (67 %) puis le domaine médical et vétérinaire (25 %) suivi par l'industrie non nucléaire (7 %).

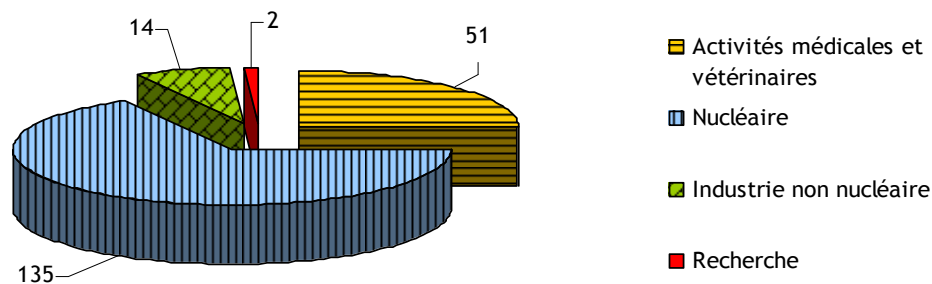


Figure 19 - Répartition des événements « travailleurs » selon les domaines d'activité

Pour rappel, les événements de radioprotection recensés par l'IRSN recouvrent :

- les événements déclarés à l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) dont l'IRSN est destinataire d'une copie, au titre des différents guides de déclaration mis en place par l'ASN ;
- les événements non déclarés dont l'IRSN a connaissance et qu'il considère comme des signaux intéressants pour la radioprotection. Leur collecte est très dépendante des circuits d'information utilisés puisque ces derniers ne sont pas aussi systématisés ;
- les événements pour lesquels l'IRSN est sollicité pour une expertise.

Parmi les 202 événements recensés, 154 sont des événements déclarés selon les critères des guides de déclaration de l'ASN tels que décrits dans :

- le guide relatif aux modalités de déclaration et à la codification des critères relatifs aux événements significatifs impliquant la sûreté, la radioprotection ou l'environnement applicable aux installations nucléaires de base et au transport de matières radioactives ;
- le guide n° 11 relatif aux modalités de déclaration et à la codification des critères relatifs aux événements significatifs dans le domaine de la radioprotection hors installations nucléaires de base et transports de matières radioactives.

Par ailleurs, dans le cadre du suivi de l'exposition des travailleurs et de la consolidation des données dosimétriques, les alertes des organismes de dosimétrie pour dépassement de limites réglementaires de dose parvenues à l'IRSN en 2011 sont au nombre de 49, ce qui correspond à 24 % des événements recensés. Parmi ces alertes, 69 % proviennent du domaine médical et vétérinaire, 24 % de l'industrie non nucléaire, et 9 % du domaine nucléaire.

Sur ces 49 alertes, après consolidation des données suite aux enquêtes menées par les médecins du travail, 15 cas de dépassement sont toujours enregistrés pour l'année 2011 (§ 4.1.3).

4.1.4.2. Evolution par rapport aux années précédentes

Le tableau 9 reprend la répartition des événements « travailleurs » recensés par l'IRSN depuis 2004, selon les grands domaines d'activité. Il montre qu'aucune évolution significative n'a été observée sur ces 8 années. Le domaine médical reste le principal pourvoyeur d'alertes de dépassement de limite réglementaire de dose, dans une proportion supérieure (69 %) à la proportion des travailleurs de ce domaine (62 %) dans l'ensemble des travailleurs suivis. Il convient de noter que ces événements sont connus sans aucune démarche de déclaration des employeurs. Si la démarche de déclaration entre peu à peu dans les habitudes du domaine médical quand il s'agit d'événements touchant aux patients, il semblerait qu'il y ait peu d'évolution en ce qui concerne les événements affectant la radioprotection des travailleurs. Les domaines d'activité ayant historiquement une culture déclarative plus forte, à l'image du domaine nucléaire, affichent un nombre relativement stable d'événements.

Tableau 9 - Evolution des événements « travailleurs » sur la période 2004 - 2011

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Alertes de dépassements de limite réglementaire de dose								
- utilisations médicales et vétérinaires	42	63	53	54	36	44	32	34
- nucléaire	0	0	1	0	4	2	5	3
- industrie non nucléaire	11	17	13	18	17	13	5	12
- recherche	2	2	1	0	0	0	0	0
Total alertes de dépassements	55	82	68	72	57	59	42	49
Autres événements								
- utilisations médicales et vétérinaires	2	8	9	10	7	11	13	17
- nucléaire	193	182	170	169	183	137	137	132
- industrie non nucléaire						19	17	2
- recherche						6	1	2
Total autres événements	195	190	179	179	190	173	168	153
TOTAL	250	272	247	251	247	232	210	202

4.2. EXPOSITION DES TRAVAILLEURS DU DOMAINE MEDICAL ET VETERINAIRE

Le domaine des activités médicales et vétérinaires utilisant les rayonnements ionisants recouvre les secteurs de la radiologie médicale²⁰, de la médecine nucléaire, de la radiothérapie, de la médecine du travail, des soins dentaires, de la médecine vétérinaire, ainsi que les laboratoires d'analyses mettant en œuvre des techniques de radioimmunologie, et les activités de logistique et de maintenance sur les différentes installations.

La méthode utilisée pour établir les bilans statistiques est décrite aux paragraphes 3.1 et 3.2.

4.2.1. BILAN DES EXPOSITIONS EXTERNES

4.2.1.1. Dosimétrie « corps entier »

Dosimétrie « corps entier » : analyse suivant les activités professionnelles

Exposition externe totale (photons et neutrons)

L'effectif total surveillé dans ce domaine est de 214 432 travailleurs, soit 62 % de l'effectif total surveillé dans le cadre des activités soumises à un régime de déclaration ou d'autorisation. La dose collective correspondant à cet effectif est égale à 20,51 homme.Sv, soit 32 % de la dose collective enregistrée pour l'ensemble des travailleurs.

La dose individuelle maximale du domaine médical en 2011 a été enregistrée dans le secteur de la radiothérapie. Cette dose est de 136 mSv ; il s'agit de l'un des cas de dépassement de la limite réglementaire annuelle enregistrés en 2011 pour lesquels l'IRSN n'a eu aucun retour du médecin du travail malgré les relances effectuées.

Le tableau 10 présente les résultats de la surveillance dosimétrique dans le domaine des activités médicales et vétérinaires réparties par secteur d'activité.

Pour chaque secteur d'activité, les données pour les travailleurs civils et ceux de la défense ont été regroupées. Les travailleurs des activités de défense (hôpitaux inter-armée) suivis par le SPRA se retrouvent ainsi dans les secteurs du radiodiagnostic, de la radiologie interventionnelle, des soins dentaires, de la médecine du travail, de la radiothérapie, de la médecine nucléaire, de la médecine vétérinaire, de la maintenance et dans la catégorie « Autres ». Ils représentent 0,8 % de l'effectif total du domaine médical et vétérinaire, avec une contribution à la dose collective de 1,1 %.

²⁰ La radiologie médicale regroupe les techniques de radiologie conventionnelle, de mammographie, de scanographie et de radiologie interventionnelle. Des installations de radiodiagnostic existent aussi dans les secteurs dentaire et vétérinaire.

Tableau 10 - Surveillance de l'exposition externe (toutes composantes de rayonnements) dans le domaine médical et vétérinaire

Secteur d'activité	Effectif surveillé	Dose collective (homme.Sv)	Dose individuelle moyenne sur l'effectif total ^(a) (mSv)	Dose individuelle moyenne sur l'effectif exposé ^(b) (mSv)	Répartition des effectifs par classes de dose					
					< seuil	du seuil à 1 mSv	de 1 à 6 mSv	de 6 à 15 mSv	de 15 à 20 mSv	> 20 mSv
Radiologie	114 635	12,97	0,11	0,53	90 348	21 915	2 103	255	9	5
Soins dentaires	44 476	1,88	0,04	0,38	39 473	4 838	159	4	1	1
Médecine du travail et dispensaires	5 231	0,32	0,06	0,38	4 369	821	38	2	1	0
Radiothérapie	10 270	2,52	0,25	1,00	7 759	2 057	357	95	1	1
Médecine nucléaire	3 170	0,99	0,31	0,83	1 980	872	313	4	1	0
Laboratoires d'analyses	154	0,01	0,04	0,42	140	13	1	0	0	0
Médecine vétérinaire	18 065	0,47	0,03	0,31	16 536	1 497	31	1	0	0
Logistique et maintenance (prestataires)	130	0,02	0,13	0,42	90	38	1	1	0	0
Autres	18 301	1,33	0,07	0,48	15 535	2 592	165	5	3	1
Total	214 432	20,51	0,10	0,54	176 230	34 643	3 168	367	16	8

(a) Dose individuelle moyenne sur l'effectif total = dose collective / effectif total surveillé.

(b) Dose individuelle moyenne sur l'effectif exposé = dose collective / effectif surveillé pour lequel la dose est supérieure au seuil d'enregistrement.

La majorité des travailleurs surveillés est employée dans le secteur de la radiologie médicale : 114 635 travailleurs, soit 53 % de l'effectif total du domaine, pour une contribution de 63 % à la dose collective. Tous les laboratoires ne sont pas encore en mesure de distinguer les données relatives aux activités de radiodiagnostic de celles concernant la radiologie interventionnelle. C'est la raison pour laquelle les données sont regroupées dans la catégorie « Radiologie ». Pour l'année 2011, seuls 7 % des 114 635 travailleurs ont une activité bien identifiée : 2 % en radiodiagnostic et 5 % en radiologie interventionnelle, ce qui montre le chemin restant à parcourir pour fournir des données représentatives de chacune de ces activités.

Le secteur des soins dentaires représente le deuxième effectif le plus important du domaine médical, soit 21 % des travailleurs, et 9 % de la dose collective.

La médecine vétérinaire représente 8 % des travailleurs du domaine et 2 % la dose collective.

La radiothérapie regroupe la radiothérapie externe, qui utilise principalement des accélérateurs d'électrons, et la curiethérapie, qui utilise des sources scellées (iridium 192, iode 125, césium 137,...). La radiothérapie externe peut également être réalisée par protonthérapie, à Orsay et à Nice. Au total, le secteur de la radiothérapie représente 5 % des effectifs du domaine médical surveillés et 12 % de la dose collective du domaine. Les doses annuelles moyennes calculées pour ce secteur sur l'effectif total (0,25 mSv/an) et sur l'effectif exposé (1,00 mSv/an) sont, avec celles calculées en médecine nucléaire, les plus élevées du domaine médical. Ces résultats sont surprenants au vu des risques d'exposition rencontrés dans ce secteur, et ne sont pas cohérents avec les résultats présentés par d'autres pays (par exemple, 0,05 mSv pour la moyenne sur l'effectif total et 0,53 mSv pour la moyenne sur l'effectif exposé dans le bilan 2010 de l'exposition des travailleurs en Grèce publié par le GAEC sur son site internet²¹). Les chiffres présentés ici reflètent le classement erroné d'un certain nombre -non connu précisément- de travailleurs : il s'agit de prestataires du nucléaire classés par erreur en radiothérapie par le laboratoire assurant leur surveillance. Ces erreurs de classement, révélées à l'occasion de l'utilisation de SISERI, entraînent de fait une surestimation de l'effectif et de la dose collective de ce secteur et une sous-estimation de ces résultats dans le secteur des prestataires du nucléaire.

La médecine nucléaire met en œuvre des radionucléides de périodes relativement courtes (quelques heures à quelques jours) pouvant conduire à une exposition externe (et parfois interne : Cf. § 4.2.2) des professionnels de santé lors des différentes étapes de leur administration aux patients. 1,5 % des travailleurs du domaine médical appartiennent à ce secteur alors que leur contribution à la dose collective s'élève à 4,8 %. C'est le secteur qui présente la dose externe individuelle moyenne annuelle la plus élevée (0,31 mSv pour la moyenne calculée sur l'effectif total et 0,83 mSv pour la moyenne calculée sur l'effectif exposé). Ces valeurs sont tout à fait comparables à celles publiées par le GAEC sur son site internet²⁸ pour le bilan 2010 de la surveillance des travailleurs en Grèce, puisque les moyennes calculées sur l'effectif total et sur l'effectif exposé sont respectivement de 0,49 mSv et 0,99 mSv en médecine nucléaire. Par ailleurs, et même si les conditions d'expositions dans les deux secteurs ne sont pas du tout comparables, il est à remarquer que les niveaux d'exposition moyens des travailleurs de médecine nucléaire sont du même ordre que ceux des travailleurs du secteur des réacteurs de production d'énergie dans le domaine nucléaire, et que la répartition des effectifs par classes de dose sont comparables dans les deux secteurs (Cf. tableau 16).

Contribution des neutrons

L'effectif du domaine médical dont l'exposition aux neutrons est surveillée atteint 3 805 travailleurs et la dose collective correspondante est égale à 149 homme.mSv. Il faut noter que cette valeur tient compte d'une forte valeur observée sur un cas de dépassement de la limite réglementaire annuelle

²¹ <http://www.gaec.gr>

de dose (115 mSv). A part cette dose de 115 mSv, la dose individuelle maximale enregistrée est égale à 4,8 mSv.

En dehors du cas de dépassement enregistré en radiothérapie, plus de 90 % de la dose est reçue par des travailleurs du secteur de la radiologie médicale, les 10 % restants concernant des travailleurs du secteur de la radiothérapie (dont près de 70 % en protonthérapie). Ces résultats reflètent à nouveau des erreurs de classement intervenant dans l'affectation des secteurs d'activité des travailleurs par les laboratoires assurant leur suivi dosimétrique : **comme observé lors de l'utilisation de SISERI, un certain nombre -non quantifié précisément- de travailleurs enregistrés en radiologie médicale interviennent en réalité en radiographie industrielle, notamment dans le cadre de prestations en INB. Ces erreurs entraînent une surestimation des résultats pour le secteur de la radiologie médicale et une sous-estimation des effectifs et des doses collectives dans les secteurs des prestataires du nucléaire et de l'industrie non nucléaire.**

Dosimétrie « corps entier » : évolution sur la période 1996-2011

L'évolution de la dosimétrie entre 1996 et 2011 est caractérisée par deux périodes différentes (figure 20) : une première période (1996 - 2004) au cours de laquelle l'effectif reste stable alors que la dose collective diminue, ce qui peut refléter un certain progrès dans les pratiques, avec une optimisation de la radioprotection entraînant une diminution progressive des doses reçues. Depuis 2004, l'effectif et les doses collectives augmentent parallèlement, excepté en 2011 où une stagnation de la dose collective est observée, ce qui témoigne de la mise en place d'une surveillance plus large auprès des professionnels de ce domaine.

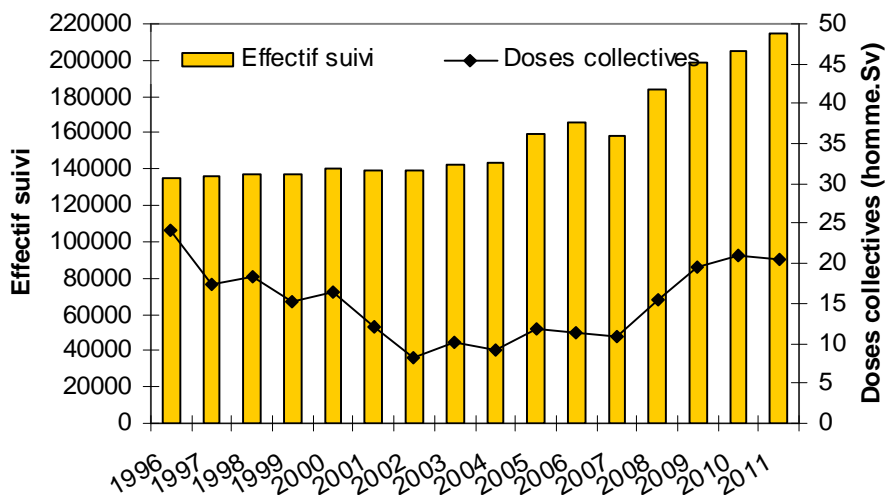


Figure 20 - Evolution de l'effectif surveillé et de la dose collective dans le domaine des activités médicales et vétérinaires (période 1996-2011)

4.2.1.2. Dosimétrie des extrémités

Dosimétrie par bague

63 % des travailleurs bénéficiant d'un suivi dosimétrique aux extrémités portent un dosimètre bague, soit 7 504 travailleurs. La dose totale enregistrée par ces porteurs est de 73,86 Sv.

La figure 21 illustre la répartition des doses enregistrées en 2011 suivant les secteurs d'activité de ce domaine. C'est le secteur de la radiologie (sans distinction du radiodiagnostic et de la radiologie interventionnelle) qui contribue majoritairement aux expositions des extrémités, avec 63 % des travailleurs suivis et 57 % de la dose totale.

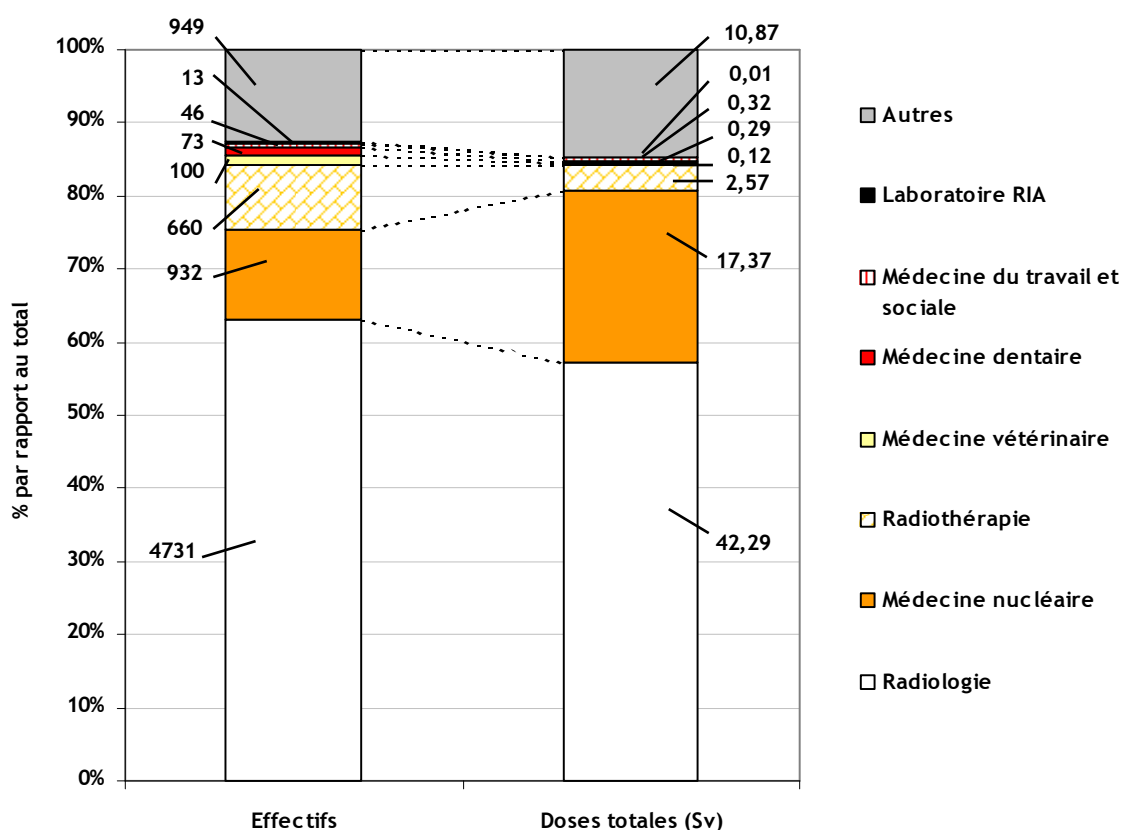


Figure 21 - Répartition des doses enregistrées pour la dosimétrie bague en 2011 dans le domaine des activités médicales et vétérinaires

Dosimétrie au poignet

En 2011, la dose totale enregistrée dans les domaines des activités médicales et vétérinaires à l'aide de la dosimétrie au poignet concerne 4 347 travailleurs et s'élève à 4,74 Sv. Le secteur de la radiologie (sans distinction du radiodiagnostic et de la radiologie interventionnelle) contribue pour 75 % à l'effectif surveillé et pour 76 % à la dose totale enregistrée.

4.2.2. BILAN DES EXPOSITIONS INTERNES

4.2.2.1. Surveillance de routine

98 % des 13 373 examens réalisés dans le cadre de la surveillance de routine sont des analyses radiotoxicologiques urinaires et concernent des travailleurs de médecine nucléaire, de laboratoires d'analyses médicales utilisant des techniques de radio-immunologie et des travailleurs de médecine vétérinaire (tableau 11).

Tableau 11 - Surveillance de routine par des analyses radiotoxicologiques urinaires dans le domaine médical et vétérinaire

Secteurs d'activité	Nombre de travailleurs suivis	Nombre total d'examens	Nombre d'examens considérés positifs ^(*)
Médecine nucléaire	1 626	11 751	41
Laboratoire d'analyse médicale avec radio-immunologie	526	1 309	3
Médecine vétérinaire	18	40	0
Autres activités (domaine médical)	14	30	0
Total	2 184	13 130	44

(*) Les examens considérés positifs sont ceux dont le résultat est supérieur à la limite d'interprétation opérationnelle définie au préalable avec le prescripteur, ou, à défaut, à la limite de détection (LD).

4.2.2.2. Surveillance spéciale ou surveillance de contrôle

Les examens réalisés dans le cadre d'une surveillance spéciale ou d'une surveillance de contrôle ont été très majoritairement faits pour le secteur de la médecine nucléaire, où 3 % des examens se sont révélés positifs (tableau 12).

Tableau 12 - Examens réalisées à la suite d'un incident ou d'une suspicion de contamination (surveillance spéciale ou de contrôle) dans le domaine médical et vétérinaire

Secteurs d'activité	Nombre de travailleurs suivis	Nombre total d'examens	Nombre d'examens considérés positifs ^(*)
Médecine nucléaire	85	213	7
Laboratoire d'analyse médicale avec radio-immunologie	13	16	1
Autres activités (domaine médical)	3	3	0
Total	101	232	8

(*) Les examens considérés positifs sont ceux dont le résultat est supérieur à la limite d'interprétation opérationnelle définie au préalable avec le prescripteur, ou, à défaut, à la limite de détection (LD).

4.2.2.3. Estimations dosimétriques

En 2011, 8 travailleurs du secteur de la médecine nucléaire ont fait l'objet d'une estimation de dose interne. Pour 2 d'entre eux, la dose engagée a été estimée supérieure 1 mSv, la dose individuelle maximale enregistrée étant de 1,5 mSv.

4.2.3. DEPASSEMENTS DES LIMITES ANNUELLES REGLEMENTAIRES DE DOSE

Concernant la dosimétrie du corps entier, 8 cas de dépassement de la limite de 20 mSv ont été recensés, dont 3 valeurs supérieures à 50 mSv. La dose maximale enregistrée est égale à 136 mSv dans le secteur de la radiothérapie. Les autres cas se répartissent entre la radiologie interventionnelle (5 cas dont une valeur supérieure à 50 mSv), les soins dentaires (1 cas : valeur inférieure à 50 mSv), un dernier cas dont le secteur d'activité n'est pas précisé (valeur supérieure à 50 mSv).

Concernant la dosimétrie aux extrémités, 3 cas de dépassement de la limite de 500 mSv ont été recensés à l'aide de la dosimétrie par bague pour des travailleurs du secteur de la radiologie interventionnelle, avec une dose maximale enregistrée de 1 116 mSv. Aucun dépassement de la limite de 500 mSv sur la dosimétrie au poignet n'a été enregistré en 2011 dans le domaine des activités médicales et vétérinaires.

4.2.4. SUIVI DES EVENEMENTS ET INCIDENTS DE RADIOPROTECTION

Au cours de l'année 2011, 51 événements de radioprotection (ERP) concernant des personnes travaillant dans des installations médicales ont été recensés. Les événements du domaine médical se répartissent selon les secteurs d'activité comme indiqué dans le tableau 13.

Tableau 13 - Répartition des événements « travailleurs » du domaine médical selon les secteurs d'activité

Utilisations médicales et vétérinaires	Nombre d'événements recensés
Radiodiagnostic	15
Radiothérapie	10
Radiologie interventionnelle	7
Médecine nucléaire	6
Soins dentaires	3
Logistique et maintenance du médical	2
Médecine vétérinaire	1
Recherche médicale, vétérinaire et pharmaceutique	1
Transport de matières radioactives	1
Non déterminé	5
Total	51

Sur l'ensemble des événements recensés du domaine médical, seulement 18 des ERP relevant du guide de déclaration de l'ASN ont fait l'objet d'une déclaration portée à la connaissance de l'IRSN :

- 10 ERP concernant l'exposition des travailleurs ;
- 3 ERP concernant la gestion des effluents et des déchets contaminés (rejet non autorisé de radioactivité dans l'environnement, ruptures de canalisations...);
- 1 ERP concernant une perte de source radioactive ;

- 1 ERP concernant la perte d'un colis de sources radioactives durant le transport ;
- 2 ERP concernant les écarts relatifs aux conditions d'accès en zone sur le plan réglementaire ou technique ;
- 1 ERP concernant les écarts techniques ou réglementaires relatifs au contrôle ou au bon fonctionnement des appareils émetteurs de rayonnements.

Les événements soit non déclarés à l'autorité soit déclarés mais dont l'IRSN ignore la déclaration, ont été comptabilisés comme des événements non déclarés. En effet, l'IRSN, par le biais de ses actions d'expertises, peut être alerté d'un événement sans toujours savoir s'il a été déclaré ou non à l'autorité. Dans le domaine médical, ces événements sont uniquement des alertes de dépassement des limites annuelles réglementaires de dose.

4.2.5. CONNAISSANCE DES POSTES DE TRAVAIL

L'IRSN est régulièrement sollicité pour des études de poste de travail dans le domaine médical. Certaines de ces études, souvent complexes, présentent un réel intérêt pédagogique pour l'ensemble du secteur concerné. C'est le cas de l'étude détaillée ci-après, qui avait pour objectif d'évaluer l'intérêt de l'utilisation d'un injecteur automatique pour la préparation des produits injectables au fluor 18 dans deux services de médecine nucléaire.

En tomographie par émission de positons (TEP), le principal risque d'exposition aux rayonnements ionisants lors des étapes de préparation et d'injection des médicaments radiopharmaceutiques concerne les mains des travailleurs. Depuis quelques années, des dispositifs automatisés de préparation et/ou d'injection sont disponibles. L'IRSN a mené une étude afin d'évaluer l'apport de l'utilisation d'un de ces systèmes à la radioprotection des travailleurs. L'étude a concerné deux unités de médecine nucléaire utilisant le système UniDose® de la société TRASIS, et le dispositif d'injection associé, dans le cadre des examens TEP au 18F-FDG. Cinq manipulateurs d'électroradiologie médicale de deux sites (A1, A2 et A3 sur le site A, B1 et B2 sur le site B) ont participé à l'étude, lors de la prise en charge complète d'une trentaine de patients chacun. Une comparaison de l'exposition avant et après installation du système a été possible sur l'un des deux sites. L'évaluation dosimétrique a été réalisée, tâche par tâche, au moyen de pastilles thermoluminescentes fixées sur les gants (exposition des extrémités) et de dosimètres opérationnels (exposition du corps entier).

S'agissant de l'exposition des extrémités, l'utilisation de ce système a permis de réduire d'un facteur 10 environ la dose équivalente associée à la préparation et d'un facteur 2,5 environ celle associée à l'injection, avec des variations notables entre sites et entre opérateurs (figure 22). Le ratio entre la dose maximale à la dernière phalange et celle à la position du dosimètre bague variait d'un facteur 2 à 5. Concernant la dose efficace, aucune évolution significative n'a été observée, ce qui est cohérent avec le fait que l'utilisation du système ne conduit pas à modifier la prise en charge des patients

(installation sous la caméra,...), qui est une des principales sources de l'exposition corps entier des manipulateurs.

Cette étude a ainsi démontré que les dispositifs automatisés de préparation et/ou d'injection permettent une réduction notable de l'exposition des extrémités. Pour autant, leur utilisation ne garantit pas à elle seule l'optimisation des expositions et ne dispense pas de réaliser une analyse de poste, donc des pratiques, qui conditionnent de façon significative l'exposition des opérateurs, en particulier lors de l'injection. En outre, l'IRSN souligne l'importance de prévoir les conditions alternatives de manipulation en cas de panne du système, notamment dans les établissements ne disposant pas d'une enceinte de manipulation adaptée à l'énergie des rayonnements émis par le fluor 18. A l'occasion de cette étude, une contamination régulière des gants a également été mise en évidence, sans avoir été suspectée par les manipulateurs, montrant l'importance d'un changement des gants à chaque étape et d'un contrôle régulier de non-contamination, qu'il y ait ou non recours à l'automatisation.

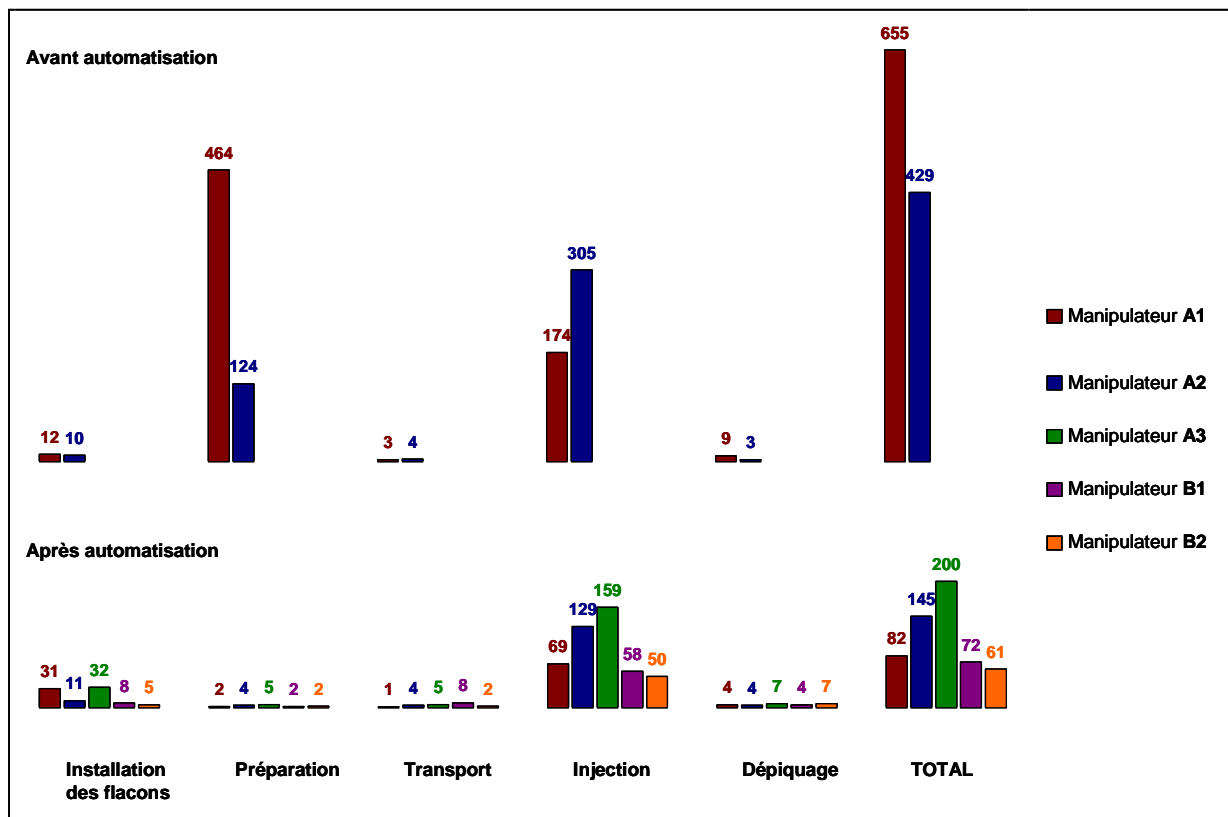


Figure 22 - Dose équivalente (µSv) reçue aux extrémités (au doigt le plus exposé) par tâche pour 1 GBq de fluor 18 manipulé

4.2.6. CALCULS DE RADIOPROTECTION POUR LES BUNKERS DE RADIOTHERAPIE

4.2.6.1. Contexte

Les accélérateurs de particules utilisés en radiothérapie produisent des faisceaux d'électrons et de photons dans la gamme d'énergies de 4 à 25 MeV et délivrent des débits de dose allant jusqu'à $24 \text{ Gy}\cdot\text{min}^{-1}$ à 1 mètre de la source. Les faisceaux de photons X d'énergie nominale supérieure à 10 MeV engendrent par ailleurs un rayonnement neutronique secondaire par interaction avec des matériaux lourds situés dans la tête de l'appareil ou dans les murs. L'énergie moyenne de cette composante neutronique est d'environ 500 keV et son intensité croît de façon exponentielle avec l'énergie du faisceau de photons. Un rayonnement γ est également produit par l'interaction des neutrons avec les murs de béton du bunker. Afin de protéger le personnel contre ces rayonnements, les accélérateurs médicaux sont installés dans des bunkers avec des parois généralement en béton de plus d'un mètre d'épaisseur, une porte renforcée et une chicane permettant de limiter l'épaisseur de la porte.

Depuis quelques années l'IRSN fournit un support technique aux professionnels de radiothérapie, en particulier aux radiophysiciens, pour le dimensionnement de nouvelles installations ou le redimensionnement de bunkers existants lors d'un changement d'appareil. L'IRSN réalise également des prestations pour des centres de radiothérapie ou pour des sociétés mandatées par ceux-ci (cabinets d'architecte, entreprises du bâtiment...) et répond aux éventuelles demandes d'expertise de la part des autorités (ASN). Ces prestations ou avis d'expertise concernent généralement des installations non standard (type d'appareil, géométrie ou matériaux du bunker). Elles incluent la vérification du zonage et des protections envisagées et la proposition éventuelle de protections supplémentaires pour respecter la réglementation en vigueur en radioprotection. Les évaluations se basent sur l'estimation par calcul du débit d'équivalent de dose et de la dose efficace aux points d'intérêt, pour les champs de photons et de neutrons. Les calculs sont réalisés suivant des méthodes analytiques proposées dans la littérature internationale, en particulier les méthodes recommandées par le National Council of Radiation Protection (NCRP). Depuis 2011, dans le cas de configurations particulières pour lesquelles les approches analytiques n'ont pas été validées, des calculs par simulation de Monte Carlo sont également effectués. Ces calculs tiennent compte de la singularité d'une configuration donnée.

4.2.6.2. Etudes réalisées en 2011

Au cours de l'année 2011, une première étude a porté sur un projet de construction d'un bunker devant recevoir un accélérateur de 25 MV et de débit de $6 \text{ Gy}\cdot\text{min}^{-1}$ à 1 m. L'installation proposée contenait des particularités structurelles concernant la chicane (interrompue juste après le coude, qui était lui-même élargi par une découpe oblique du mur interne et par un renforcement du mur situé en face de la porte) et le percement des murs pour la traversée des conduits de ventilation, notamment les percements droits (non coudés) du linteau au-dessus de la porte d'entrée laissaient

prévoir des fuites importantes en sortie des percements. De plus, le pupitre de commande était situé juste en face de la porte (Figure 23).

Les résultats des calculs de l'IRSN ont permis notamment d'alerter sur un possible dépassement des limites réglementaires associées au classement proposé pour la salle de commande (zone surveillée) dû aux rayonnements traversant la porte, et sur un dépassement prévisible important de ces limites en sortie des percements du linteau, en particulier au regard des composantes neutronique et photonique γ (Tableau 14). L'IRSN a donc recommandé des renforts au niveau de l'entrée du bunker. Les résultats ont aussi montré l'intérêt d'utiliser une approche par simulation de Monte Carlo pour des configurations particulières : l'écart entre les valeurs des doses calculées par les méthodes analytiques et par simulation de Monte Carlo allait d'un facteur 2 à un facteur 20 environ, suivant le point de calcul et la composante de rayonnement considérée (Tableau 14).

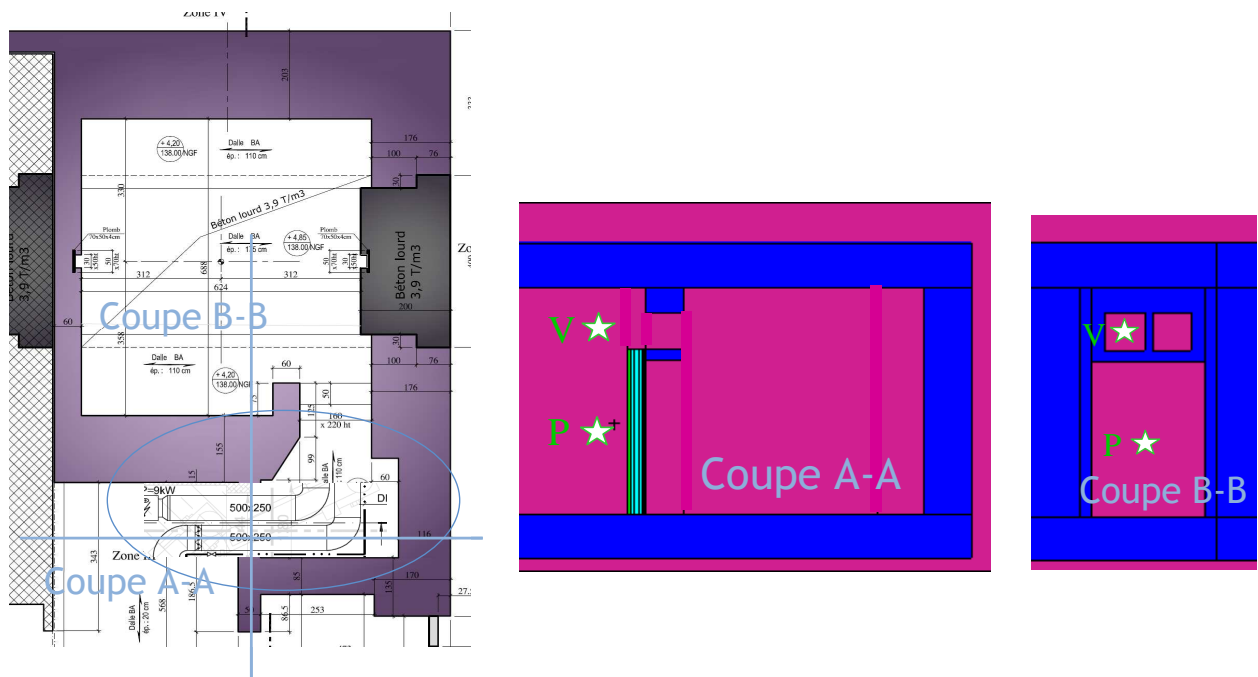


Figure 23 - Plan d'un projet de construction d'un bunker de radiothérapie, avec une chicane courte et des percements droits du linteau au-dessus de la porte d'entrée pour le passage de deux conduits de ventilation : vue de haut (gauche), coupes verticales A-A (milieu) et B-B (droite)

Tableau 14 - Valeurs estimées des doses efficaces annuelles (en mSv) aux points V et P pour un accélérateur de 25 MV, d'après le calcul analytique et d'après la simulation de Monte Carlo

Composante	Méthode de calcul	Point V	Point P
Neutrons	Monte Carlo	135	6,3
	Analytique	265	0,3
γ induits	Monte Carlo	31	2,5
	Analytique	53	7,4

Une seconde étude a concerné la construction de deux bunkers pour des accélérateurs de 18 MV et de débit de $5 \text{ Gy} \cdot \text{min}^{-1}$ à 1 m, selon le système de murs « Forster sandwich » inventé en Allemagne (Figure 24). Ce système consiste en deux coques en béton entre lesquelles est inséré et compacté sur place un matériau de remplissage dont la composition, la densité et l'épaisseur sont adaptées en fonction de la nature, de l'énergie et de l'intensité du rayonnement à atténuer. Ce système a jusqu'à présent été implanté une seule fois en France (en 2009), mais sur un nouveau site non fonctionnel avant 2012. Une étude de l'IRSN concernant ce premier projet d'implantation avait pointé un manque de données dans la littérature scientifique internationale concernant l'atténuation des rayonnements par le système de murs « sandwich », en particulier pour le champ neutronique autour des accélérateurs médicaux [13]. Elle soulignait de plus qu'aucune information n'était fournie par le constructeur quant à l'optimisation effective du mélange des murs « sandwichs » pour une installation médicale donnée. Pour l'étude du second projet d'implantation, l'IRSN a obtenu les informations relatives à la composition des matériaux de remplissage utilisés (Magnadense 8S et Laitier SPB sur la figure 24). Il est apparu que ces matériaux contenaient plus de fer que les bétons de densité similaire et ne contenaient pas d'hydrogène, contrairement aux bétons. En conséquence, ils étaient susceptibles de transmettre plus de neutrons que les bétons habituels.

L'IRSN a réalisé des simulations de Monte Carlo de la transmission par ces matériaux du rayonnement neutronique. Les résultats des calculs ont montré que ces matériaux sont en effet plus « transparents » aux neutrons que les bétons de densité similaire, avec des épaisseurs de couche de déci-transmission (épaisseur de matériau atténuant l'exposition d'un facteur 10) de 1,5 à 2 fois plus importante que celles des bétons. Par ailleurs, le matériau « MagnaDense 8S » utilisé dans le plafond (Figure 24) est très riche en fer, contrairement aux bétons utilisés habituellement dans les bunkers de radiothérapie. Ce matériau est donc susceptible d'être le siège d'une production de neutrons non négligeable lors de tirs de faisceaux de photons X d'énergie nominale supérieure à 10 MeV. L'IRSN a donc recommandé des renforts au niveau du plafond. Cette étude a ainsi montré la nécessité de réaliser une étude approfondie, par simulation de Monte Carlo, de la production de neutrons par les faisceaux issus d'accélérateurs médicaux, dans différents matériaux de remplissage et différents bétons de forte densité utilisés pour les protections de bunkers de radiothérapie.

4.3. EXPOSITION DES TRAVAILLEURS DU DOMAINE NUCLEAIRE

Le domaine nucléaire regroupe les activités civiles ou militaires liées au nucléaire. L'industrie nucléaire civile recouvre l'ensemble des étapes du cycle du combustible (principalement réalisées chez AREVA NC, agents et prestataires), l'exploitation des réacteurs de production d'électricité (EDF, agents et prestataires), ainsi que les activités de transport effectuées dans ce domaine (transport de matières dangereuses de classe 7, matières radioactives). Les activités militaires recouvrent la propulsion nucléaire, l'armement et les activités de la Direction des Applications Militaires du CEA.

La méthode utilisée pour établir les bilans statistiques est décrite aux paragraphes 3.1 et 3.2.

4.3.1. BILAN DES EXPOSITIONS EXTERNES

4.3.1.1. Dosimétrie « corps entier »

Dosimétrie « corps entier » : analyse suivant les activités professionnelles

Exposition externe totale (photons et neutrons)

L'effectif total surveillé dans le domaine nucléaire est de 68 344 travailleurs et la dose collective correspondant à cet effectif est égale à 25,12 homme.Sv.

Les doses individuelles moyennes les plus importantes en 2011 concernent la fabrication du combustible nucléaire (0,94 mSv pour la moyenne calculée sur l'effectif total et 2,39 mSv pour la moyenne calculée sur l'effectif exposé) et les opérations de logistique et de maintenance réalisés par les prestataires (0,80 mSv pour la moyenne calculée sur l'effectif total et 1,67 mSv pour la moyenne calculée sur l'effectif exposé).

Les travailleurs des activités de défense suivis par le SPRA se répartissent entre les secteurs de la propulsion nucléaire et de l'armement ainsi que dans la catégorie « Autres ». Ils représentent 5,8 % de l'effectif total du domaine nucléaire, avec une contribution de 1,6 % à la dose collective de ce domaine.

Tableau 15 - Surveillance de l'exposition externe (toutes composantes de rayonnements) dans le domaine nucléaire

Secteur d'activité	Effectif surveillé	Dose collective (homme.Sv)	Dose individuelle moyenne sur l'effectif total ^(a) (mSv)	Dose individuelle moyenne sur l'effectif exposé ^(b) (mSv)	Répartition des effectifs par classes de dose					
					< seuil	du seuil à 1 mSv	de 1 à 6 mSv	de 6 à 15 mSv	de 15 à 20 mSv	> 20 mSv
Propulsion nucléaire - équipage	2 703	0,27	0,10	0,23	1 527	1 165	11	0	0	0
Armement	2 768	0,33	0,12	0,37	1 863	851	54	0	0	0
Extraction et traitement de l'uranium	110	0,03	0,27	0,28	6	100	4	0	0	0
Enrichissement et conversion	2 186	0,36	0,17	0,84	1 756	305	125	0	0	0
Fabrication du combustible	1 783	1,68	0,94	2,39	1 078	318	294	93	0	0
Réacteurs et production d'énergie ^(c)	22 044	6,52	0,30	0,89	<i>14 707</i>	<i>5 262</i>	<i>2 038</i>	<i>37</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
Retraitement	3 210	0,11	0,03	0,38	2 932	262	16	0	0	0
Démantèlement	1 995	0,14	0,07	0,59	1 763	187	45	0	0	0
Logistique et maintenance (presta-taires)	8 713	6,97	0,80	1,67	4 532	2 412	1 497	269	2	1
Transports	1 002	0,10	0,10	0,32	694	295	13	0	0	0
Autres	21 830	8,62	0,39	1,53	16 192	3 616	1 670	350	2	0
Total	68 344	25,12	0,37	1,18	47 050	14 773	5 767	749	4	1

- (a) Dose individuelle moyenne sur l'effectif total = dose collective / effectif total surveillé.
 (b) Dose individuelle moyenne sur l'effectif exposé = dose collective / effectif surveillé pour lequel la dose est supérieure au seuil d'enregistrement.
 (c) Comme les années précédentes, les données concernant l'exposition des personnels d'EDF aux neutrons n'ont pu être transmises par le laboratoire assurant leur surveillance dosimétrique. Grâce à une extraction des données de SISERI, les statistiques du secteur « Réacteurs et production d'énergie » incluent désormais toutes les données concernant les travailleurs d'EDF, à l'exception de la répartition des effectifs par classes de dose (en gris en italique) qui ne tient pas compte de l'exposition aux neutrons. L'effectif total, la dose collective et les doses moyennes incluent bien toutes les composantes de rayonnement (X, γ et neutrons). Pour information, l'exposition aux neutrons des travailleurs d'EDF représente 1 % de la dose collective totale de ce secteur.

La répartition des effectifs dans les différents secteurs révèle que près d'un tiers des travailleurs du nucléaire n'ont pas pu être classés selon leur secteur d'activité, par manque d'information et se retrouvent donc dans le secteur « Autres ». Cette répartition montre également, comme l'an passé, le faible nombre de travailleurs classés dans les activités de logistique et de maintenance réalisées par les prestataires (8 713 en 2011 et 7 849 en 2010 contre 22 721 en 2009). Une grande partie d'entre eux se retrouvent probablement aussi dans la catégorie « Autres », sans qu'il soit cependant possible de le vérifier, ce qui illustre bien la difficulté encore trop importante d'accéder à l'information sur l'activité des travailleurs bénéficiant d'une surveillance individuelle de l'exposition externe. L'étude approfondie à partir de SISERI des secteurs d'activité attribués à certains prestataires du nucléaire par les organismes assurant leur surveillance montre effectivement des erreurs de classification : on retrouve des prestataires classés dans l'industrie non nucléaire (dans les activités de contrôle non destructif notamment mais également souvent dans les autres activités non détaillées de ce domaine), et, de façon plus surprenante, dans le domaine médical (secteur de la radiologie, voire de la radiothérapie). Une part importante de la dose collective des prestataires du nucléaire est donc potentiellement attribuée à tort à ces autres secteurs et une meilleure application de la nomenclature des activités apparaît indispensable pour obtenir des données fiables quant à l'exposition des travailleurs selon leur activité.

La part des travailleurs de ce domaine ayant une dose annuelle inférieure à 1 mSv (90 %) est plus faible que celle calculée sur l'ensemble des travailleurs suivis, tous domaines confondus (96 %).

La dose individuelle annuelle maximale dans le nucléaire est égale à 23,5 mSv et constitue un dépassement de la limite réglementaire de dose.

Contribution des neutrons

26 517 travailleurs du domaine nucléaire ont une surveillance de l'exposition aux neutrons et la dose collective correspondante est égale à 1,6 homme.Sv. La dose individuelle maximale est égale à 8,5 mSv. La figure 26 présente la répartition des effectifs surveillés et des doses collectives « neutrons » enregistrées.

63 % de la dose collective neutron est enregistrée dans le secteur de la fabrication du combustible, pour la quasi-totalité (99,0 %) au sein de l'établissement Melox.

Contrairement aux années précédentes, ce bilan inclut les doses reçues par les travailleurs du secteur des réacteurs et de la production d'énergie. L'extraction de ces données de SISERI a permis de s'affranchir du fait que le laboratoire assurant la surveillance des travailleurs d'EDF n'ait pas été en mesure de fournir cette information lors de la collecte des données.

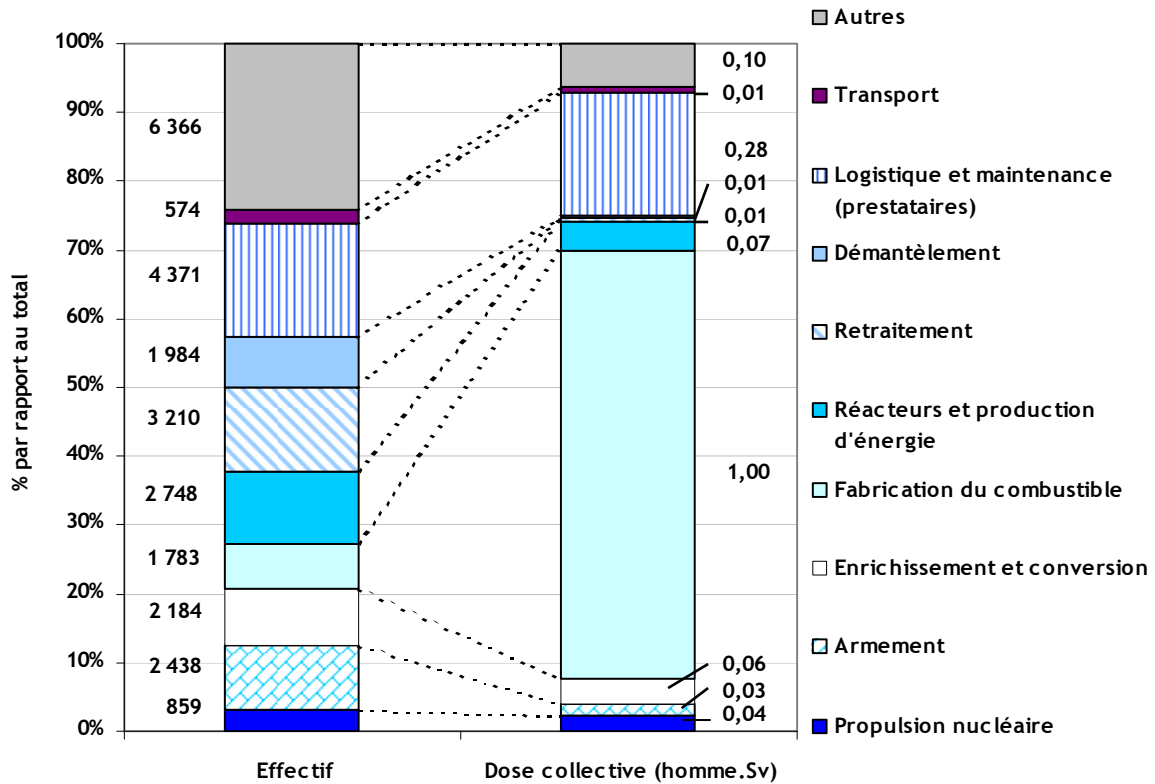


Figure 26 - Répartition des doses enregistrées en 2011 pour la dosimétrie neutrons dans le nucléaire civil et militaire

Dosimétrie « corps entier » : évolution sur la période 1996-2011

La figure 27 présente l'évolution de l'effectif suivi et de la dose collective entre 1996 et 2011 dans le nucléaire.

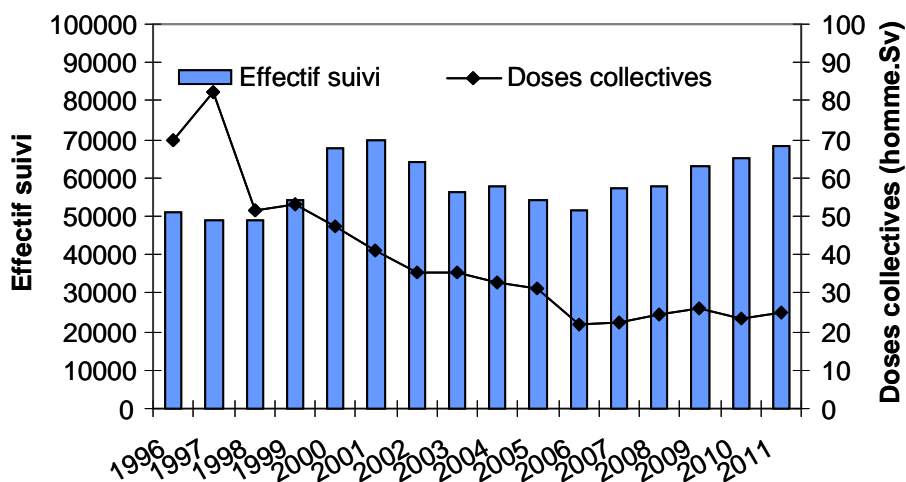


Figure 27 - Evolution de l'effectif surveillé et de la dose collective dans le nucléaire civil et militaire (période 1996-2011)

Il est possible de distinguer deux périodes dans l'évolution de la dose collective : jusqu'en 2006, la dose diminue globalement pendant que l'effectif suivi connaît des variations plus aléatoires ; à partir de 2006, la tendance est à une augmentation de la dose collective associée à l'augmentation de l'effectif suivi, sauf entre 2009 et 2010 où une diminution de la dose collective a été observée tandis que l'effectif continuait de croître. Cette baisse s'explique en partie par le fait qu'un certain nombre d'opérations de maintenance dans les centrales nucléaires d'EDF (dont plusieurs visites décennales) ont été reportées en 2011.

4.3.1.2. Dosimétrie des extrémités

Le suivi de l'exposition aux extrémités a concerné 10 % des travailleurs du domaine nucléaire, lesquels sont très majoritairement suivis par une dosimétrie poignet (84 %).

Dosimétrie par bague

Dans le domaine nucléaire, 16 % des effectifs surveillés par une dosimétrie des extrémités en 2011 portent un dosimètre bague. Ce chiffre marque une stagnation dans l'évolution observée ces dernières années : la proportion des dosimètres bagues était de 2 % en 2008 et de 17 % en 2009 et 21 % en 2010.

La dose totale enregistrée pour les 1 023 travailleurs suivis par une dosimétrie par bague atteint 1,03 Sv, dose partagée entre les prestataires intervenant dans les opérations de logistique et de maintenance (à hauteur de 15 % de la dose totale) et les travailleurs dont le secteur d'activité n'est pas connu (catégorie « Autres »), à hauteur de 85 %, parmi lesquels se trouvent probablement de nombreux prestataires (§ 4.3.1.1). La dose maximale enregistrée au doigt dans ce domaine est de 82 mSv.

Dosimétrie au poignet

La dose totale enregistrée pour les 5 296 travailleurs suivis par une dosimétrie au poignet atteint 53,7 Sv, répartis principalement entre les travailleurs intervenant dans la fabrication du combustible nucléaire (à hauteur de 57 % de la dose totale) et les prestataires intervenant dans les opérations de logistique et de maintenance (à hauteur de 39 % de la dose totale). La dose maximale enregistrée au poignet dans le domaine nucléaire est de 312 mSv, dans le secteur de la fabrication du combustible.

4.3.2. BILAN DES EXPOSITIONS INTERNES

Le tableau 16 indique dans quel secteur d'activité les établissements intervenant dans le domaine du nucléaire ont été classés par les organismes assurant la surveillance de l'exposition interne de leurs travailleurs. Le classement qui en résulte reste macroscopique.

Tableau 16 - Secteur d'activité de rattachement des établissements intervenant dans le domaine du nucléaire (exposition interne)

Secteur d'activité		Etablissements
1501000	Propulsion Nucléaire	AREVA TA
1502000	Armement	CEA DAM Valduc
1504000	Enrichissement et reconversion	AREVA NC Pierrelatte, EURODIF (pas encore de suivi à SET GB II en 2011), COMURHEX Pierrelatte, COMURHEX Malvesi, CEA Pierrelatte
1505000	Fabrication du combustible	FBFC Romans, MELOX
1506000	Réacteurs de production d'énergie	EDF
1507000	Retraitement	AREVA NC La Hague
1508000	Démantèlement des installations nucléaires	AREVA NC Marcoule, AREVA NC Cadarache, STMI Cadarache, CEA Fontenay-aux-Roses, CEA Grenoble
1509000	Effluents, déchets et matériaux récupérables	CENTRACO, SOCATRI
1510000	Logistique et maintenance (prestataires)	AREVA Intercontrôle, entreprises extérieures d'AREVA NC Marcoule, de MELOX, du CEA DAM Ile-de-France, du CEA Cadarache
1511000 (*)	Installations de recherche liées au nucléaire	CEA Cadarache, CEA DAM Ile-de-France, CEA Marcoule, CEA Saclay
1201000	Transport (nucléaire)	TN international
1512000	Autres (nucléaire)	AREVA NC siège, AREVA NP Chalon, SGN Marcoule, SGN St-Quentin, STMI Pierrelatte, SOMANU

(*) Ce secteur est comptabilisé dans le domaine de la recherche (§ 4.5.2.) et non dans le domaine nucléaire ; la ligne est conservée dans ce tableau pour donner l'information sur les établissements concernés.

4.3.2.1. Surveillance de routine

Dans le nucléaire, les risques de contamination proviennent principalement des produits de fission et d'activation, des actinides et du tritium. Dans les installations en amont et en aval du cycle, la mesure anthroporadiométrique pulmonaire permet un suivi des personnels soumis au risque de contamination par des émetteurs α (^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ...). Les analyses fécales sont pratiquées essentiellement pour la mesure des actinides. D'après les données collectées pour établir le bilan 2011, il apparaît que ce sont les examens anthroporadiométriques qui sont majoritairement réalisés dans le domaine nucléaire (figure 28) puisqu'ils représentent 67 % des 315 500 examens réalisés en surveillance de routine dans ce domaine.

Le tableau 17 présente les résultats de la surveillance faite par analyses radiotoxicologiques urinaires, en 2011. Les deux secteurs effectuant les plus grands nombres de ces analyses sont

l'armement, avec 36 % des analyses et le démantèlement des installations nucléaires (26 %). Le pourcentage d'analyses radiotoxicologiques urinaires qui sont positives est de 1,1 %.

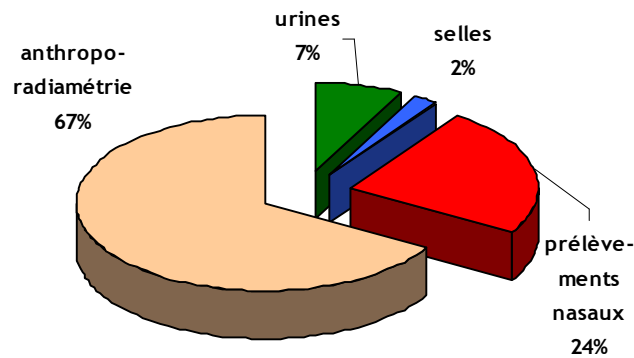


Figure 28 - Répartition des analyses réalisées dans le domaine du nucléaire (surveillance de routine)

Tableau 17 - Surveillance de routine par des analyses radiotoxicologiques urinaires dans le domaine du nucléaire

Secteurs d'activité	Nombre de travailleurs suivis	Nombre total d'examens	Nombre d'examens considérés positifs ^(*)
Propulsion nucléaire	335	767	0
Armement	1 565	8 348	251
Enrichissement et conversion	941	1 860	0
Fabrication du combustible	44	44	0
Réacteurs de production d'énergie	36	64	0
Retraitement	2 602	4 582	13
Démantèlement des installations nucléaires	1 816	6 107	3
Effluents, déchets et matériaux récupérables	27	27	0
Logistique et maintenance du nucléaire (prestataires)	895	1 602	0
Autres activités (nucléaires, dont transport)	37	38	0
Total	8 298	23 439	267

(*) Les examens considérés positifs sont ceux dont le résultat est supérieur à la limite d'interprétation opérationnelle définie au préalable avec le prescripteur, ou, à défaut, à la limite de détection (LD).

Le tableau 18 présente le nombre d'analyses radiotoxicologiques des selles pour les différents secteurs. En 2011, c'est le secteur des réacteurs de production d'énergie pour lequel le nombre d'examens est le plus élevé, représentant 24 % des analyses de selles réalisées dans ce domaine. Le pourcentage d'analyses radiotoxicologiques fécales qui sont positives est de 0,2 %.

Tableau 18 - Surveillance de routine par des analyses radiotoxicologiques des selles dans le domaine du nucléaire

Secteurs d'activité	Nombre de travailleurs suivis	Nombre total d'examens	Nombre d'examens considérés positifs ^(*)
Propulsion nucléaire	20	32	0
Armement	1 525	1 047	4
Enrichissement et conversion	325	163	0
Fabrication du combustible	713	722	0
Réacteurs de production d'énergie	193	1 685	0
Retraitement	485	667	9
Démantèlement des installations nucléaires	684	1 168	2
Logistique et maintenance du nucléaire (prestataires)	20	32	0
Autres activités (nucléaire)	1 053	1 400	0
Total	5 001	6 888	15

(*) Les examens considérés positifs sont ceux dont le résultat est supérieur à la limite d'interprétation opérationnelle définie au préalable avec le prescripteur, ou, à défaut, à la limite de détection (LD).

Le tableau 19 présente le bilan des analyses radiotoxicologiques de prélèvements nasaux réalisées en 2011. Le nombre important d'analyses observé s'explique par le fait qu'il s'agit d'une surveillance systématique en sortie de locaux classés en zone contrôlée.

Tableau 19 - Surveillance de routine par des analyses radiotoxicologiques de prélèvements nasaux dans le domaine du nucléaire

Secteurs d'activité	Nombre de travailleurs suivis	Nombre total d'examens	Nombre d'examens considérés positifs ^(*)
Armement	1 525	53 114	3
Enrichissement et conversion	349	55	0
Réacteurs de production d'énergie	965	9 915	0
Démantèlement des installations nucléaires	279	10 176	nc
Logistique et maintenance du nucléaire (prestataires)	131	2 650	0
Total	3 249	75 910	3

(*) Les examens considérés positifs sont ceux dont le résultat est supérieur à la limite d'interprétation opérationnelle définie au préalable avec le prescripteur, ou, à défaut, à la limite de détection (LD).

Le tableau 20 présente la répartition des examens anthroporadiométriques réalisés en 2011. Pour 86 % d'entre eux, ces examens sont réalisés par EDF sur les sites des centrales nucléaires, pour les travailleurs d'EDF ainsi que pour les prestataires.

Le secteur du retraitement est le deuxième secteur réalisant le plus grand nombre de ce type d'examens, dont bénéficient l'ensemble des secteurs du nucléaire.

Tableau 20 - Surveillance de routine par des examens anthroporadiométriques dans le domaine du nucléaire

Secteurs d'activité	Nombre de travailleurs suivis	Nombre total d'examens	Nombre d'examens considérés positifs ^(*)
Transport (nucléaire)	53	53	0
Propulsion nucléaire	4 568	5 442	0
Armement	1 644	1 780	0
Fabrication du combustible	178	178	0
Réacteurs de production d'énergie ^(**)	44 150	180 628	26
Retraitement	7 320	10 809	29
Démantèlement des installations nucléaires	2 485	3 425	nc
Effluents, déchets et matériaux récupérables	175	188	0
Logistique et maintenance du nucléaire (prestataires)	3 567	3 883	0
Autres activités (nucléaire)	1 259	2 877	0
Total	65 399	209 263	55

nc : non communiqué

^(*) Les examens considérés positifs sont ceux dont le résultat est supérieur à la limite d'interprétation opérationnelle définie au préalable avec le prescripteur, ou, à défaut, à la limite de détection (LD).

^(**) Cette ligne inclut également les prestataires intervenant dans les centrales nucléaires d'EDF.

Le tableau 21 présente le bilan détaillé des mesures anthroporadiométriques réalisées par EDF en 2011. L'évolution du nombre d'examens d'une année sur l'autre dépend en grande partie des variations de l'activité au sein de chaque site (arrêts de tranche, activités de démantèlement,...).

Tableau 21 - Bilan détaillé des mesures anthroporadiométriques réalisées par EDF pour les travailleurs des centrales nucléaires suivis en 2011

ANTHROPORADIOMETRIE EDF - année 2011		
Nombre de travailleurs EDF		21 738
Nombre de travailleurs d'entreprises extérieures		22 412
<u>Nombre total d'examens effectués</u>		189 250
pour surveillance de routine :		180 628
pour surveillance spéciale :		4 881
pour surveillance de chantier :		3 741
Détail par centrale nucléaire (toutes surveillances)		Nombre d'examens (***)
BELLEVILLE	6 736	(-38 %)
BLAYAIS	10 743	(+4 %)
BUGEY	14 751	(-5 %)
CATTENOM	11 474	(+40 %)
CHINON	10 670	(-14 %)
CHOOZ	6 457	(-26 %)
CIVAUX	8 398	(+63 %)
CRUAS	9 838	(+6 %)
DAMPIERRE	13 701	(+48 %)
FESSENHEIM	13 706	(x2,4)
FLAMANVILLE	6 196	(+3 %)
GOLFECH	5 003	(-12 %)
GRAVELINES	15 225	(+6 %)
NOGENT	5 948	(-14 %)
PALUEL	8 382	(-3 %)
PENLY	8 832	(+86 %)
SAINT ALBAN	6 486	(+16 %)
SAINT LAURENT	8 510	(+53 %)
TRICASTIN	15 144	(+20 %)
CREYS MALVILLE	2 393	(+21 %)
BRENNILIS	657	(+46 %)

(***) Evolution par rapport à 2010.

4.3.2.2. Surveillance spéciale ou surveillance de contrôle

Les examens réalisés dans le cadre d'une surveillance spéciale ou de contrôle (tableau 22) se répartissent majoritairement entre les travailleurs des centrales nucléaires d'EDF (61 % des examens) et ceux du secteur du retraitement (18 % des examens).

Tableau 22 - Examens réalisés à la suite d'un incident ou d'une suspicion de contamination (surveillance spéciale ou de contrôle) dans le domaine du nucléaire

Secteurs d'activité	Nombre de travailleurs suivis	Nombre total d'examens	Nombre d'examens considérés positifs ^(*)
Propulsion nucléaire	22	22	0
Armement	187	333	16
Enrichissement et conversion	533	209	0
Fabrication du combustible	154	372	4
Réacteurs de production d'énergie (**)	7 007	8 638	385
Retraitement	163	2 532	42
Démantèlement des installations nucléaires	71	305	1
Logistique et maintenance du nucléaire (prestataires)	85	360	3
Autres activités (nucléaire)	170	1 474	0
Total	8 404	14 264	455

(*) Les examens considérés positifs sont ceux dont le résultat est supérieur à la limite d'interprétation opérationnelle définie au préalable avec le prescripteur, ou, à défaut, à la limite de détection (LD).

(**) Cette ligne inclut également les prestataires intervenant dans les centrales nucléaires d'EDF.

4.3.2.3. Estimations dosimétriques

Dans le nucléaire, 349 travailleurs ont fait en 2011 l'objet d'une estimation de dose efficace engagée. Pour 6 d'entre eux, une dose supérieure ou égale à 1 mSv a été enregistrée : 3 travailleurs dans les opérations de logistique et de maintenance (prestataires), 2 travailleurs dans le secteur de la fabrication du combustible et 1 travailleur dans celui du démantèlement. La dose maximale s'élève à 2,2 mSv et concerne un prestataire.

4.3.3. DEPASSEMENTS DES LIMITES ANNUELLES REGLEMENTAIRES DE DOSE

Concernant la dose efficace, un dépassement de la limite annuelle de 20 mSv a été enregistré en 2011 dans le secteur des opérations de logistique et de maintenance (prestataire), à la valeur de 23,5 mSv.

Aucune dose supérieure à la limite annuelle de 500 mSv pour les extrémités n'a été enregistrée dans le domaine nucléaire.

4.3.4. SUIVI DES EVENEMENTS ET INCIDENTS DE RADIOPROTECTION

En 2011, 135 événements de radioprotection (ERP) recensés concernent des personnes travaillant dans le nucléaire (Tableau 23). Les événements du domaine nucléaire sont très majoritairement issus (70 %) du secteur des réacteurs de production d'énergie.

Tableau 23 - Répartition des événements ayant impliqué des travailleurs dans les différents secteurs d'activité du nucléaire

Domaine nucléaire	Nombre d'événements recensés
Réacteurs de production d'énergie	94
Enrichissement et conversion	14
Installations de recherche liées au nucléaire	9
Effluents, déchets et matériaux récupérables	8
Fabrication du combustible	5
Démantèlement des installations nucléaires	3
Retraitement	2
Total	135

La quasi-totalité des événements (132 ERP) recensés dans le domaine nucléaire ont été déclarés :

- au titre du guide ASN 2005 concernant les INB et le transport de matières radioactives selon :
 - o les critères de déclaration au titre de la radioprotection (112 événements) ;
 - o les critères de déclaration aux titres de la sûreté et de la radioprotection :
 - 5 ERP déclarés à la fois aux titres de la sûreté et de la radioprotection ;
 - 4 ERP déclarés uniquement au titre de la sûreté mais avec un impact sur la radioprotection ;
- au titre du guide ASN n°11 concernant les critères de déclaration hors INB et transport (4 événements) ;
- au titre du guide de déclaration des événements survenus dans les INBS (6 événements).

Trois événements n'ont pas fait l'objet d'une déclaration. Il s'agit des signalements de dépassement de limite réglementaire de dose.

Parmi les événements déclarés, 5 événements ont été classés au niveau 1 de l'échelle INES, ils ont respectivement concerné :

- l'identification de sources radioactives, jusqu'à présent non répertoriées, dans différentes installations du site de Cadarache ;
- la contamination d'un agent d'une entreprise prestataire, au niveau du visage, avec une dose à la peau de 430 mSv. Cette contamination est intervenue lors de travaux effectués dans le cadre de la visite décennale du réacteur n°1 de Penly ;

- une rupture de confinement à la suite d'une intervention de maintenance inappropriée lors d'un arrêt de réacteur de la Centrale nucléaire de Nogent-sur-Seine ;
- une dispersion de contamination dans le bâtiment réacteur de la centrale nucléaire de Chinon générée par une perte de confinement du circuit primaire lors de travaux électriques ;
- la contamination ponctuelle d'un intervenant ayant entraîné une exposition cutanée (194 mSv) supérieure au quart d'une limite annuelle réglementaire à la centrale nucléaire de Dampierre.

La répartition des ERP concernant les INB, déclarés selon les critères du guide ASN 2005, montre que 32 % d'entre eux relèvent du critère « zonage » et que 36 % n'ont pas été véritablement déclarés selon un critère précis mais au titre du critère 10 (tableau 24).

Tableau 24 - Evénements du domaine nucléaire en fonction des critères de l'annexe 7 du guide de déclaration ASN concernant les INB et le transport de matières radioactives

Critères de déclaration radioprotection INB	Nombre d'événements recensés
2-Dépassement du quart d'une limite annuelle de dose individuelle	1
3-Propreté radiologique	22
4-Analyse de radioprotection formalisée	2
6-Source	9
7-Zonage	37
9-Contrôle périodique appareil de surveillance radiologique	4
10- Tout autre écart significatif pour l'ASN ou l'exploitant	42
Total	117

4.4. EXPOSITION DES TRAVAILLEURS DU DOMAINE INDUSTRIEL (NON NUCLEAIRE)

L'industrie non nucléaire regroupe toutes les activités industrielles hors nucléaire concernées par l'usage des rayonnements ionisants : contrôles non destructifs (gammagraphie), étalonnage, irradiation industrielle, fabrication de produits radiopharmaceutiques et autres activités utilisant des sources radioactives telles que les humidimètres et les gamma-densitomètres, les jauges d'épaisseur ou de niveau, les ioniseurs, etc.

La méthode utilisée pour établir les bilans statistiques est décrite aux paragraphes 3.1 et 3.2.

4.4.1. BILAN DES EXPOSITIONS EXTERNES

4.4.1.1. Dosimétrie « corps entier »

Dosimétrie « corps entier » : analyse suivant les activités professionnelles

Exposition externe totale (photons et neutrons)

En 2011, les 32 190 travailleurs recensés de l'industrie non nucléaire ont totalisé une dose collective de 16,87 homme.Sv. La dose individuelle annuelle moyenne pour ce domaine est de 0,52 mSv sur l'effectif total et de 1,60 mSv sur l'effectif exposé. La dose individuelle annuelle maximale, égale à 69,8 mSv, a été enregistrée dans le secteur du contrôle non destructif.

Le tableau 25 présente la répartition des données collectées suivant les secteurs d'activité de ce domaine. L'industrie non nucléaire est le domaine où l'activité professionnelle des travailleurs surveillés est la moins bien connue : 76 % des travailleurs n'ont pas pu être classés suivant la nomenclature des activités (cet effectif représente 77 % de la dose collective dans ce domaine). 21 % des travailleurs sont classés dans le secteur du contrôle non destructif (utilisation de gammagraphes, de générateurs X ou de jauges industrielles), contribuant à hauteur de 22 % à la dose collective. Les 3 % restants se répartissent entre la production et le conditionnement de radio-isotopes, les opérations de logistique et de maintenance et le soudage par faisceau d'électrons, sans toutefois que les effectifs associés puissent être considérés représentatifs de ces secteurs d'activité.

Rappelons qu'il est probable qu'une fraction non négligeable de la dose collective attribuée au domaine de l'industrie non nucléaire soit en réalité reçue par des travailleurs d'entreprises classées dans ce domaine mais qui interviennent aussi en sous-traitance des exploitants nucléaires.

Pour chaque secteur d'activité, les statistiques civiles et militaires ont été regroupées. Les travailleurs des activités de défense suivis par le SPRA se répartissent entre les secteurs du contrôle, le secteur de la logistique et de la maintenance, ainsi que dans la catégorie « Autres ». Ils représentent 3 % de l'effectif total de l'industrie non nucléaire, avec une contribution à hauteur de 0,7 % de la dose collective de ce domaine.

Tableau 25 - Surveillance de l'exposition externe (toutes composantes de rayonnements) dans l'industrie non nucléaire

Secteur d'activité	Effectif surveillé	Dose collective (homme.Sv)	Dose individuelle moyenne sur l'effectif total ^(a) (mSv)	Dose individuelle moyenne sur l'effectif exposé ^(b) (mSv)	Répartition des effectifs par classes de dose					
					< seuil	du seuil à 1 mSv	de 1 à 6 mSv	de 6 à 15 mSv	de 15 à 20 mSv	> 20 mSv
Contrôles utilisant des sources de rayonnements	5077	3,61	0,71	1,84	3114	1144	646	173	0	0
Contrôles : utilisation de gamma-graphes et générateurs X	1596	0,12	0,08	0,28	1151	434	10	1	0	0
Contrôle : jauges industrielles	60	0,00	0,00	sans objet	60	0	0	0	0	0
Soudage par faisceau d'électron	167	0,01	0,06	0,55	148	16	3	0	0	0
Production et conditionnement de radio-isotopes	440	0,10	0,23	1,26	360	54	24	2	0	0
Logistique et maintenance (prestataires)	242	0,04	0,19	0,27	73	163	6	0	0	0
Autres	24608	12,97	0,53	1,65	16763	5010	2243	581	9	2
Total	32190	16,87	0,52	1,60	21669	6821	2932	757	9	2

(a) Dose individuelle moyenne sur l'effectif total = dose collective / effectif total surveillé.

(b) Dose individuelle moyenne sur l'effectif exposé = dose collective / effectif surveillé pour lequel la dose est supérieure au seuil d'enregistrement.

Contribution des neutrons

La surveillance de l'exposition aux neutrons a concerné 7 164 travailleurs de l'industrie non nucléaire en 2011 (soit 22 % de l'effectif total surveillé dans ce domaine), avec une dose collective associée de 52,1 homme.mSv et une dose individuelle maximale de 1,8 mSv. Là encore, la grande majorité de ces travailleurs (87 %) ne sont pas classés suivant leur secteur d'activité.

Dosimétrie « corps entier » : évolution sur la période 1996-2011

La figure 29 présente l'évolution de l'effectif suivi et des doses collectives dans l'industrie non nucléaire entre 1996 et 2011.

Les effectifs plus importants observés entre 2004 et 2008 s'expliquent par le fait que les travailleurs non classés étaient inclus dans les effectifs de l'industrie non nucléaire. Depuis l'introduction de la nouvelle nomenclature en 2009, ce n'est plus le cas. Même si cette nouvelle classification ne permet pas encore de détailler précisément les statistiques par secteur d'activité dans ce domaine, les statistiques obtenues grâce à sa mise en place montrent que l'effectif de l'industrie non nucléaire et la dose collective associée sont très probablement assez stables sur la période 1996-2011.

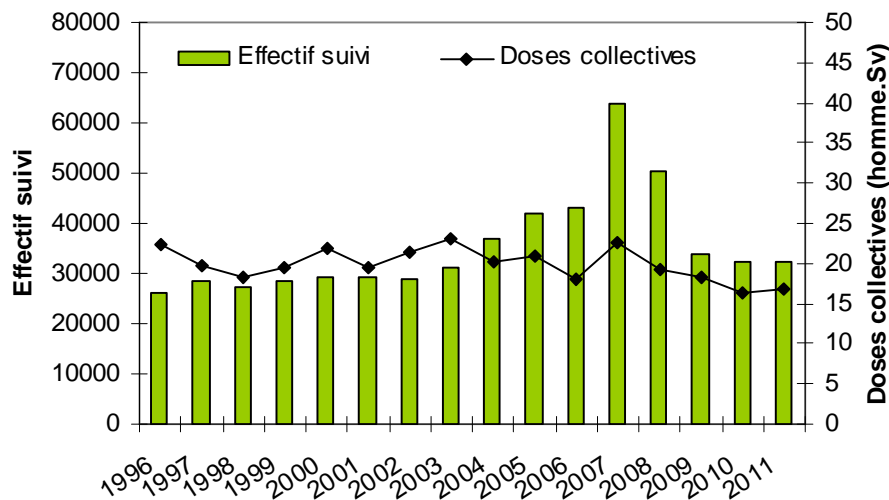


Figure 29 - Evolution de l'effectif surveillé et des doses collectives dans l'industrie non nucléaire (période 1996-2011)

4.4.1.2. Dosimétrie des extrémités

Le suivi de l'exposition aux extrémités a concerné 2 400 travailleurs, soit 7 % de l'effectif de ce domaine bénéficiant d'une surveillance au corps entier.

Dosimétrie par bague

Dans l'industrie non nucléaire, 55 % des effectifs surveillés par dosimétrie des extrémités en 2011 portent un dosimètre bague. Cette proportion est stable sur les dernières années : 57 % en 2008, 51 % en 2009 et 52 % en 2010.

La dose totale enregistrée pour les 1 313 travailleurs bénéficiant d'une dosimétrie par bague atteint 3,03 Sv, dose reçue à 92 % par des travailleurs dont le secteur d'activité n'est pas connu. Les travailleurs identifiés comme intervenant dans le secteur du contrôle ont reçu les 8 % restants.

Dosimétrie au poignet

La dose totale enregistrée pour les 1 087 travailleurs suivis par dosimétrie au poignet atteint 0,47 Sv. Parmi ces travailleurs, 29 % sont identifiés comme appartenant au secteur du contrôle non

destructif, avec une contribution de 8 % à la dose totale. L'activité de 63 % des travailleurs est inconnue (74 % de la dose totale).

4.4.2. BILAN DES EXPOSITIONS INTERNES

4.4.2.1. Surveillance de routine

L'industrie non nucléaire est le domaine où sont pratiqués le moins d'examens de surveillance de l'exposition interne. Ceci s'explique par le peu d'activités industrielles mettant en jeu des sources non scellées. Au total, 403 examens ont été réalisés en 2011, qui se répartissent entre les analyses radiotoxicologiques urinaires (87 %) et les examens anthroporadiométriques (13 %). Le tableau 26 détaille la répartition de ces examens par secteur d'activité. Pour celles dont l'activité du travailleur est identifiée, les analyses radiotoxicologiques urinaires sont plutôt utilisées dans les secteurs de la production et conditionnement de radio-isotopes et des contrôles pour la sécurité des personnes et des biens.

Les examens anthroporadiométriques sont majoritairement réalisés dans le secteur de la production de radio-isotopes (47 examens sur 52 au total, aucun examen n'ayant conduit à un résultat considéré positif).

Tableau 26 - Surveillance de routine par des analyses radiotoxicologiques urinaires dans l'industrie non nucléaire

Secteurs d'activité	Nombre de travailleurs suivis	Nombre total d'examens	Nombre d'examens considérés positifs ^(*)
Production et conditionnement de radio-isotopes	6	72	0
Contrôles pour la sécurité des personnes et des biens	33	62	0
Logistique et maintenance dans l'industrie non nucléaire (prestataires)	49	71	0
Autres activités (industrie non nucléaire)	45	146	0
Total	133	351	0

^(*) Les examens considérés positifs sont ceux dont le résultat est supérieur à la limite d'interprétation opérationnelle définie au préalable avec le prescripteur, ou, à défaut, à la limite de détection (LD).

4.4.2.2. Surveillance spéciale ou surveillance de contrôle

A nouveau, le secteur d'activité précis n'est pas connu pour la grande majorité des examens réalisés dans le cadre d'une surveillance spéciale ou de contrôle (tableau 27).

Tableau 27 - Examens réalisés à la suite d'un incident ou d'une suspicion de contamination (surveillance spéciale ou de contrôle) dans l'industrie non nucléaire

Secteurs d'activité	Nombre de travailleurs suivis	Nombre total d'examens	Nombre d'examens considérés positifs ^(*)
Production et conditionnements de radio-isotopes	1	2	0
Logistique et maintenance dans l'industrie non nucléaire (prestataires)	1	2	0
Autres activités (industrie non nucléaire)	49	158	3
Total	51	162	3

(*) Les examens considérés positifs sont ceux dont le résultat est supérieur à la limite d'interprétation opérationnelle définie au préalable avec le prescripteur, ou, à défaut, à la limite de détection (LD).

4.4.2.3. Estimations dosimétriques

Dans l'industrie non nucléaire, il n'y a eu aucun calcul de dose engagée en 2011.

4.4.3. DEPASSEMENTS DES LIMITES ANNUELLES REGLEMENTAIRES DE DOSE

Concernant la dose efficace, 2 cas de dépassement de la limite de 20 mSv ont été recensés, avec une dose maximale enregistrée égale à 69,8 mSv chez un concepteur de dispositifs d'imagerie pour le médical.

4.4.4. SUIVI DES EVENEMENTS ET INCIDENTS DE RADIOPROTECTION

Au cours de l'année 2011, 14 événements de radioprotection (ERP) concernant des personnes travaillant dans le domaine des usages industriels et service des rayonnements ionisants ont été recensés par l'IRSN. La majorité d'entre eux se sont produits dans le secteur des contrôles utilisant des sources de rayonnements.

Tableau 28 - Répartition des événements du domaine industriel non nucléaire suivant les secteurs d'activité

Usages Industriels et services	Nombre d'événements recensés
Contrôles utilisant des sources de rayonnements	10
Stérilisations	1
Autres	3
Total	14

Parmi les 14 événements recensés, l'IRSN n'a eu connaissance que de 2 déclarations (au titre de la radioprotection selon le guide ASN n°11 concernant les critères de déclaration des événements hors INB et hors transport).

4.5. EXPOSITION DES TRAVAILLEURS DU DOMAINE DE LA RECHERCHE

Le domaine des activités de recherche et d'enseignement recouvre les travaux effectués au sein de laboratoires pharmaceutiques, de centres universitaires, de laboratoires des organismes nationaux de recherche (INSERM, INRA, CNRS,...), ainsi que dans des établissements suivis par le SPRA. Les travaux de recherche du CEA sont en majorité effectués pour l'industrie nucléaire. Cependant une partie d'entre eux concerne d'autres domaines : sciences du vivant, étude des matériaux, applications médicales, applications militaires, etc.

La méthode utilisée pour établir les bilans statistiques est décrite aux paragraphes 3.1 et 3.2.

4.5.1. BILAN DES EXPOSITIONS EXTERNES

4.5.1.1. Dosimétrie « corps entier »

Dosimétrie « corps entier » : analyse suivant les activités professionnelles

Exposition externe totale (photons et neutrons)

Les 14 601 travailleurs surveillés dans le domaine de la recherche en 2011, qui représentent 4 % de l'effectif total surveillé en France, totalisent une dose collective de 0,67 homme.Sv. Les doses individuelles annuelles sont plus faibles dans ce domaine, avec une valeur moyenne de 0,05 mSv sur l'effectif total et de 0,47 mSv sur l'effectif exposé. C'est cependant dans ce domaine que la dose maximale est enregistrée, tous domaines confondus : il s'agit d'une dose individuelle annuelle égale à 160 mSv.

Le tableau 29 présente la répartition des données collectées suivant les secteurs d'activité de ce domaine. Il apparaît qu'un tiers des effectifs appartient au secteur des activités de recherche liées aux installations nucléaires, et que près des deux tiers interviennent dans les activités d'enseignement et de recherche autre que médicale ou nucléaire. Cependant, le faible effectif observé pour la recherche médicale, pharmaceutique et vétérinaire laisse à penser qu'une partie des travailleurs de ce secteur sont enregistrés par erreur dans celui de l'enseignement et la recherche (hors recherche médicale et nucléaire).

Pour chaque secteur d'activité, les données de suivi des travailleurs des activités civiles et militaires ont été regroupées. Les travailleurs des activités de défense suivis par le SPRA se retrouvent exclusivement dans les secteurs de la recherche (hors médical et nucléaire) et de l'enseignement. Ils représentent 5,4 % de l'effectif total du domaine de la recherche, avec une contribution de 9,5 % à la dose collective.

Contribution des neutrons

La surveillance de l'exposition aux neutrons a concerné 4 102 travailleurs du domaine de la recherche en 2011 (soit 28 % de l'effectif de ce domaine), avec une dose collective associée de

55,7 homme.mSv (0,056 homme.Sv) et une dose individuelle maximale enregistrée de 1,1 mSv. La grande majorité de ces travailleurs (78 %) intervient dans les activités de recherche liées aux installations nucléaires ; ils reçoivent 69 % de la dose collective neutron de ce domaine.

Tableau 29 - Surveillance de l'exposition externe (toutes composantes de rayonnements) dans le domaine de la recherche

Secteur d'activité	Effectif surveillé	Dose collective (homme.Sv)	Dose individuelle moyenne sur l'effectif total ^(a) (mSv)	Dose individuelle moyenne sur l'effectif exposé ^(b) (mSv)	Répartition des effectifs par classes de dose					
					< seuil	du seuil à 1 mSv	de 1 à 6 mSv	de 6 à 15 mSv	de 15 à 20 mSv	> 20 mSv
Recherche (hors recherche médicale et nucléaire) et enseignement	9 643	0,45	0,05	0,45	8 637	989	15	1	0	1
Recherche médicale, vétérinaire et pharmaceutique	73	0,004	0,06	0,28	58	15	0	0	0	0
Recherche liée aux installations nucléaires	4 885	0,21	0,04	0,52	4 475	367	43	0	0	0
Total	14 601	0,67	0,05	0,47	13 170	1 371	58	1	0	1

(a) Dose individuelle moyenne sur l'effectif total = dose collective / effectif total surveillé.

(b) Dose individuelle moyenne sur l'effectif exposé = dose collective / effectif surveillé pour lequel la dose est supérieure au seuil d'enregistrement.

Dosimétrie « corps entier » : évolution sur la période 1996-2011

La figure 30 présente l'évolution de l'effectif suivi et des doses collectives associées sur la période 1996-2011.

La nette diminution de l'effectif suivi entre 2008 et 2009 est due à l'introduction de la nouvelle nomenclature des activités (précédemment l'ensemble des travailleurs du CEA étaient inclus dans le domaine de la recherche). L'augmentation de l'effectif entre 2009 et 2010 s'explique par le fait que l'ensemble des activités de recherche sont désormais incluses dans ce domaine : recherche médicale, recherche liée au nucléaire, autre recherche et enseignement. Dans ce domaine où les doses sont relativement moins élevées que dans les autres, ces évolutions concernant l'effectif suivi n'ont pas un grand impact sur la dose collective associée.

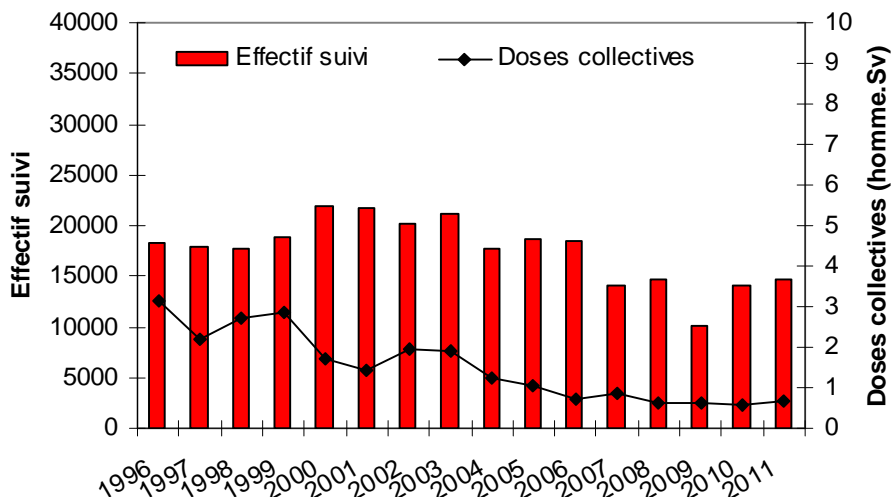


Figure 30 - Evolution de l'effectif surveillé et des doses collectives dans le domaine de la recherche (période 1996-2011)

4.5.1.2. Dosimétrie des extrémités

Dosimétrie par bague

53 % des effectifs ayant une dosimétrie des extrémités en 2011 portent un dosimètre bague. Cette proportion confirme la nette diminution observée en 2010 (55 %) par rapport à 2008 (70 %) et 2009 (67 %). La dose totale enregistrée auprès des 966 travailleurs bénéficiant d'une dosimétrie par bague atteint 1,58 Sv. Cette dose est reçue à 65 % par des travailleurs du secteur de la recherche (hors médical et nucléaire) et de l'enseignement, et à 34 % par des travailleurs exerçant des activités de recherche au sein des installations nucléaires. Les travailleurs identifiés comme intervenant dans le secteur de la recherche médicale, vétérinaire et pharmaceutique ont reçu les 1 % restants, mais leur faible effectif rend les statistiques associées peu représentatives de ce secteur.

Dosimétrie au poignet

La dose totale enregistrée auprès des 848 travailleurs suivis par dosimétrie au poignet atteint 0,07 Sv, dont 71 % sont reçus au sein des installations de recherche liées au nucléaire et le reste dans le secteur de la recherche (hors médical et nucléaire) et de l'enseignement, le secteur de la recherche médicale, vétérinaire et pharmaceutique semblant là encore sous-représenté (1 seul travailleur recensé).

4.5.2. BILAN DES EXPOSITIONS INTERNES

4.5.2.1. Surveillance de routine

Dans le domaine de la recherche, près de la moitié des 10 503 examens réalisés dans le cadre de la surveillance de routine sont des analyses radiotoxicologiques urinaires (figure 31), suivies par les examens anthroporadiométriques (42 %).

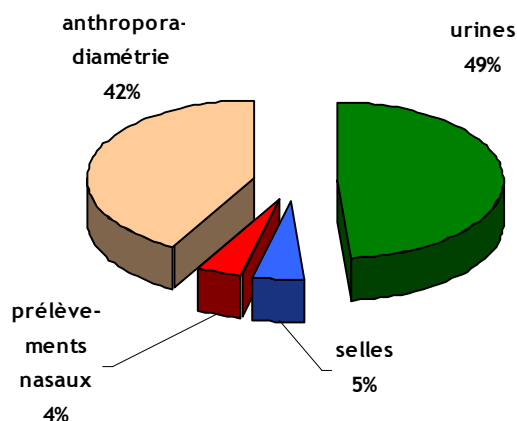


Figure 31 - Répartition des examens réalisés dans le domaine de la recherche (surveillance de routine)

Les analyses radiotoxicologiques urinaires sont mises en œuvre très majoritairement (82 %) dans le secteur des installations de recherche liées au nucléaire (tableau 30).

Tableau 30 - Surveillance de routine par des analyses radiotoxicologiques urinaires dans le domaine de la recherche

Secteurs d'activité	Nombre de travailleurs suivis	Nombre total d'examens	Nombre d'examens considérés positifs ^(*)
Recherche médicale, vétérinaire et pharmaceutique	254	792	4
Installations de recherche liées au nucléaire	1 619	4 173	0
Recherche (hors médical et nucléaire) et enseignement	48	143	1
Total	1 921	5 108	5

(*) Les examens considérés positifs sont ceux dont le résultat est supérieur à la limite d'interprétation opérationnelle définie au préalable avec le prescripteur, ou, à défaut, à la limite de détection (LD).

Le tableau 31 présente les statistiques concernant les examens anthroporadiométriques, qui sont presque exclusivement réalisés dans le secteur des installations de recherche liées au nucléaire.

Tableau 31 - Surveillance de routine par des examens anthroporadiométriques dans le domaine de la recherche

Secteurs d'activité	Nombre de travailleurs suivis	Nombre total d'examens	Nombre d'examens considérés positifs ^(*)
Installations de recherche liées au nucléaire	3 883	4 401	0
Recherche (hors médical et nucléaire) et enseignement	14	18	0
Total	3 897	4 419	0

(*) Les examens considérés positifs sont ceux dont le résultat est supérieur à la limite d'interprétation opérationnelle définie au préalable avec le prescripteur, ou, à défaut, à la limite de détection (LD).

4.5.2.2. Surveillance spéciale ou surveillance de contrôle

Les examens réalisés dans le cadre d'une surveillance spéciale ou d'une surveillance de contrôle sont les plus nombreux dans le secteur des installations de recherche liées au nucléaire, puis dans la recherche médicale, vétérinaire et pharmaceutique (tableau 32).

Tableau 32 - Examens réalisées à la suite d'un incident ou d'une suspicion de contamination (surveillance spéciale ou de contrôle) dans le domaine de la recherche

Secteurs d'activité	Nombre de travailleurs suivis	Nombre total d'examens	Nombre d'examens considérés positifs ⁽¹⁾
Recherche médicale, vétérinaire et pharmaceutique	103	239	1
Installations de recherche liées au nucléaire	115	447	1
Recherche (hors médical et nucléaire) et enseignement	30	77	0
Total	248	763	2

⁽¹⁾ Les examens considérés positifs sont ceux dont le résultat est supérieur à la limite d'interprétation opérationnelle définie au préalable avec le prescripteur, ou, à défaut, à la limite de détection (LD).

4.5.2.3. Estimations dosimétriques

Dans le domaine de la recherche, 7 travailleurs (4 dans le secteur de la recherche médicale, vétérinaire et pharmaceutique, et 2 dans le secteur des installations de recherche liées au nucléaire) ont fait en 2011 l'objet d'un calcul de dose engagée. Seul l'un d'entre eux, appartenant au secteur des installations liées au nucléaire, a une dose efficace engagée supérieure à 1 mSv : la valeur de 3,2 mSv estimée constitue la plus forte dose engagée estimée en 2011 sur l'ensemble des travailleurs des différents domaines.

4.5.3. DEPASSEMENTS DES LIMITES ANNUELLES REGLEMENTAIRES DE DOSE

Un cas de dépassement d'une limite annuelle réglementaire de dose a été enregistré dans le secteur de la recherche (hors médicale et nucléaire) et de l'enseignement avec une dose externe de 160 mSv; il s'agit de la dose la plus élevée enregistrée en 2011, tous domaines confondus.

4.5.4. SUIVI DES EVENEMENTS ET INCIDENTS DE RADIOPROTECTION

Deux événements survenus dans des établissements de recherche (hors INB) autre que nucléaire et médical ont été recensés en 2011 :

- 1 ERP concernant la découverte de points chauds non conformes ou non identifiés en zone contrôlée, avec risque d'inhalation ;
- 1 ERP concernant une légère contamination interne.

5. EXPOSITION DES TRAVAILLEURS A LA RADIOACTIVITE NATURELLE

La surveillance des travailleurs exposés à la radioactivité dite « naturelle renforcée » liée aux matières premières utilisées (industries NORM) ou au radon sur les lieux de travail était toujours en cours d'organisation fin 2011, suite à des évolutions réglementaires intervenues ces dernières années dans ces deux secteurs. En revanche, les personnels navigants soumis à une exposition aux rayonnements cosmiques font l'objet d'un suivi dosimétrique déjà effectif, bien que non exhaustif.

5.1. INDUSTRIES « NORM »

Certaines activités industrielles telles que la production de céramiques réfractaires, la combustion de charbon en centrales thermiques ou encore le traitement de minerais (d'étain, d'aluminium, etc.) mettent en œuvre des matières premières contenant naturellement des radionucléides (chaînes de filiation de l'uranium et du thorium). La manipulation et la transformation de ces matières qualifiées de « NORM ²² » peuvent entraîner une augmentation notable de l'exposition des travailleurs par rapport à leur exposition due à la radioactivité naturelle de l'environnement.

Cette problématique dite des « expositions naturelles renforcées » a été prise en compte pour la première fois au plan réglementaire au travers de dispositions introduites dans le code du travail par le décret 2003-296 et définies plus précisément par l'arrêté du 25 mai 2005 relatif aux activités professionnelles mettant en œuvre des matières premières contenant naturellement des radionucléides non utilisés en raison de leurs propriétés radioactives. Cet arrêté précise la liste des activités ou des catégories d'activités professionnelles concernées et impose notamment aux chefs d'établissements concernés de réaliser une évaluation des doses pour les travailleurs. A l'instar des autres catégories professionnelles, la surveillance dosimétrique individuelle n'est imposée pour les travailleurs concernés que s'ils sont susceptibles d'être exposés à des doses supérieures à 1 mSv/an.

5.1.1. BILANS DES ETUDES REÇUES

L'IRSN a été chargé de centraliser les résultats des évaluations des doses reçues par les travailleurs réalisées par les industriels dans le cadre de l'application de l'arrêté du 25 mai 2005, afin d'établir une cartographie des doses reçues en France dans les différents secteurs industriels concernés.

En 2010 et 2011, aucune nouvelle étude n'a été transmise à l'IRSN dans le cadre de l'application de l'arrêté du 25 mai 2005. Le nombre total d'études reçues sur la période 2005-2011 s'élève donc à 86. Si certaines activités professionnelles, telles que la combustion de charbon, la production ou l'utilisation de zircon et de céramiques réfractaires, sont bien représentées parmi les études reçues, d'autres catégories, telles que le traitement d'eaux souterraines par filtration, les établissements thermaux, la production ou l'utilisation de composés contenant du thorium ou des terres rares, ne

²² NORM = Naturally Occurring Radioactive Materials

font l'objet que d'un faible nombre d'études, ce qui soulève la question de la représentativité des données associées vis-à-vis de l'ensemble de l'industrie française.

La quasi-totalité des études reçues comprennent des évaluations de dose ; elles portent sur plus de 400 postes de travail identifiés par les industriels. Environ 67 % des doses efficaces individuelles annuelles calculées pour les travailleurs sont inférieures à 0,5 mSv, 18 % sont comprises entre 0,5 mSv et 1 mSv, et 15 % sont supérieures à la limite de 1 mSv, au-delà de laquelle les travailleurs doivent être considérés comme « professionnellement exposés » au sens du code du travail et faire l'objet d'une surveillance individuelle dosimétrique et médicale. Des postes de travail dans certaines catégories professionnelles visées par l'arrêté du 25 mai 2005 présentent des doses efficaces individuelles annuelles pouvant même être supérieures à 20 mSv, limite annuelle pour les travailleurs fixée par le code du travail. Certains postes de travail ont d'ailleurs fait l'objet d'une analyse plus approfondie de la part de l'IRSN (Cf. § 5.1.2.). Concernant le suivi individuel de l'exposition des travailleurs occupant les postes pour lesquels une dose efficace annuelle supérieure à 1 mSv a été estimée lors de ces études, trois situations sont observées :

- dans la majorité des cas, le suivi effectif des travailleurs n'est pas abordé dans les dossiers et/ou l'IRSN n'a pas de retour à la suite des études sur les éventuelles mesures prises en termes de suivi individuel ;
- dans certains cas, des mesures d'optimisation de la radioprotection au poste de travail ont permis de réduire l'exposition annuelle en dessous de la valeur de 1 mSv, sans mise en place par la suite d'un suivi individuel ;
- dans quelques cas, les résultats du suivi dosimétrique individuel (souvent préexistant à l'étude) sont effectivement transmis à SISERI.

5.1.2. BILAN DES ANALYSES REALISEES PAR L'IRSN

L'arrêté du 25 mai 2005 impose aux industriels, lors de leurs évaluations des doses efficaces pour leurs travailleurs, de tenir compte de l'exposition externe, de l'exposition interne par inhalation de poussières ainsi que de l'exposition interne par inhalation du radon et de ses descendants.

Pour ce qui concerne les doses efficaces individuelles présentées, l'IRSN a mis en évidence l'hétérogénéité des approches retenues par les industriels dans leur prise en compte :

- de l'exposition externe ou de l'exposition interne par inhalation de poussières. Certains industriels n'en tiennent pas compte même si ces voies peuvent constituer une voie significative d'exposition ;
- de la contribution du radon et de ses descendants dans le calcul de la dose efficace individuelle ;
- de la contribution de la radioactivité naturellement présente dans l'environnement autour de l'installation pour le calcul de la dose efficace individuelle.

Pour ces raisons, il n'est pas possible de comparer directement les doses efficaces individuelles rapportées par les différents industriels.

Pour chaque secteur d'activité, lorsque les données étaient disponibles, l'IRSN a compilé les doses efficaces ajoutées hors radon²³, c'est-à-dire en supplément de l'exposition due à la radioactivité naturellement présente dans l'environnement et hors exposition due au radon et à ses descendants. Le tableau 33 présente ces données portant sur environ 250 postes de travail associés à sept catégories d'activités professionnelles. La gamme des doses efficaces ajoutées compilées par l'IRSN ainsi que la part des doses supérieures à 1 mSv/an sont présentées dans ce tableau.

Tableau 33 - Doses efficaces ajoutées compilées par l'IRSN (période 2005-2011)

Catégorie	Nombre de postes de travail	Gamme de doses efficaces ajoutées	Part des doses supérieures à 1 mSv/an
Combustion de charbon en centrale thermique	32	< 1 µSv/an à 0,4 mSv/an	0%
Traitement des minerais d'étain, d'aluminium, de cuivre, de titane, de niobium, de bismuth et de thorium	42	50 µSv/an à 4 mSv/an	30%
Production de céramiques réfractaires et activités de verrerie, fonderie, sidérurgie et métallurgie en mettant en œuvre	100	13 µSv/an à 1,5 mSv/an	2%
Production ou utilisation de composés contenant du thorium	6	< 1 µSv/an à 82 mSv/an	35%
Production de zircon et de baddeleyite, et activités de fonderie et métallurgie en mettant en œuvre	57	< 1 µSv/an à 2 mSv/an	15%
Production d'engrais phosphatés et fabrication d'acide phosphorique	6	10 µSv/an à 0,5 mSv/an	0%
Traitement de terres rares et production de pigments en contenant	3	65 µSv/an à 0,3 mSv/an	0%

Les doses efficaces ajoutées relatives à la combustion de charbon en centrale thermique, à la production d'engrais phosphatés et à la fabrication d'acide phosphorique ainsi qu'au traitement de terres rares et à la production de pigments en contenant sont toutes inférieures à 1 mSv/an. Notons toutefois le faible nombre de données relatives à ces deux dernières catégories d'activités professionnelles. La quasi-totalité des doses efficaces ajoutées relatives à la production de céramiques réfractaires et aux activités de verrerie, fonderie, sidérurgie et métallurgie sont inférieures à 1 mSv/an. Ceci est cohérent avec les données publiées dans la littérature.

De nombreuses doses efficaces ajoutées pour les catégories relatives à la production de zircon et de baddeleyite, aux activités de fonderie et métallurgie en mettant en œuvre et au traitement des

²³ La contribution du radon et de ses descendants a été traitée par le biais de l'activité volumique du radon.

minerais d'étain, d'aluminium, de cuivre, de titane, de niobium, de bismuth et de thorium sont de l'ordre de 2 mSv/an à 3 mSv/an.

Concernant la catégorie relative à la production ou à l'utilisation de composés contenant du thorium, notons le faible nombre de données disponibles et le fait que deux postes de travail présentent des doses efficaces ajoutées très supérieures à 1 mSv/an : 82 mSv/an et 60 mSv/an. L'inhalation de poussières est la voie d'exposition principale pour ces deux postes de travail. Pour l'un des postes, afin de réduire l'exposition des travailleurs, l'industriel a envisagé d'imposer le port d'équipements de protection individuelle, de procéder périodiquement à l'aspiration des poussières dans les locaux et d'installer un système de filtration de l'air ambiant des locaux. Le second poste de travail est actuellement suspendu. Dans l'optique où l'industriel souhaiterait redémarrer l'activité à ce poste de travail, l'IRSN a notamment recommandé une surveillance individuelle de routine de l'exposition interne : des analyses radiotoxicologiques d'urines et de selles, ainsi qu'un suivi de l'exposition associée au radon au moyen d'un dosimètre « alpha » individuel.

L'absence en 2011 de la transmission de nouvelles études par les industriels en application de l'arrêté du 25 mai 2005 n'a pas permis d'approfondir la connaissance des expositions des travailleurs concernant les activités professionnelles mettant en œuvre des matières contenant naturellement des radionucléides non utilisées en raison de leurs propriétés radioactives. Des études sont pourtant attendues pour différentes catégories professionnelles telles que le traitement d'eaux souterraines par filtration ou les établissements thermaux.

5.2. RADON

Suite à la mise en place de la réglementation relative à l'exposition des travailleurs au radon en 2008 (arrêté du 7 août 2008 et décision n°2008-DC-0110 de l'ASN homologuée par l'arrêté du 8 décembre 2008) et conformément à deux décisions de l'ASN (décisions n° 2009-DC-0135 et n° 2009-DC-0136 du 7 avril 2009, homologuées par l'arrêté du 5 juin 2009), l'IRSN a mis en place, fin 2009, deux nouveaux cursus de formation destinés aux organismes désirant obtenir les agréments Niveau 1 option A (mesure dans tous types de bâtiment) et Niveau 1 option B (mesure dans les cavités et ouvrages souterrains) de l'ASN. Au cours de l'année 2011, l'IRSN a dispensé 3 sessions de formation N1A auprès de 32 stagiaires issus d'une vingtaine d'organismes et 1 session de formation N1B ayant accueilli une dizaine de stagiaires de 4 organismes.

A l'issue de la commission d'agrément de juillet 2011, 41 organismes ont obtenu l'agrément Niveau 1 option A et 9 organismes ont été agréés pour le Niveau 1 option B.

Outre ces cursus réglementaires, une formation spécifique à la radioprotection des travailleurs exposés au radon a été créée pour le compte d'une entreprise de travaux publics en charge du creusement d'une galerie en souterrain. Cette formation a été dispensée sur site auprès de 35 salariés de l'entreprise.

Au cours de l'année 2011, des premiers dépistages réglementaires du radon dans les lieux de travail ont été réalisés par l'IRSN ou par des organismes agréés. Au total, ce sont une trentaine d'établissements qui ont fait réaliser ces mesures.

Enfin, dans une démarche d'harmonisation des textes méthodologiques de référence pour le dépistage réglementaire du radon (code de la santé publique et code du travail), l'IRSN a initié en 2010 la transposition des guides méthodologiques relatifs au mesurage du radon dans les bâtiments souterrains²⁴, les établissements thermaux²⁵ et dans les cavités et les ouvrages souterrains²⁶ en norme AFNOR. A l'issue de ce travail réalisé dans le cadre d'un groupe de travail de la commission M60.3 du Bureau de Normalisation des Equipements Nucléaires, deux normes ont été produites : la norme AFNOR NF M60-771 relative au dépistage du radon dans tous types de bâtiment publiée en 2011 et la norme NF M60-772 relative au dépistage du radon dans les cavités et ouvrages souterrains à paraître en 2012.

²⁴ Rapport IRSN/DEI/SARG/2009-019

²⁵ Rapport IRSN/DEI/SARG/2008-028

²⁶ Rapport IRSN/DEI/SARG/2009-020

5.3. EXPOSITION AU RAYONNEMENT COSMIQUE

Conformément à l'arrêté du 8 décembre 2003, les compagnies aériennes françaises sont tenues d'évaluer l'exposition de leur personnel navigant aux rayonnements cosmiques dès lors que cette exposition est susceptible de dépasser 1 mSv/an et, si tel est le cas, de surveiller ces personnels. Afin d'évaluer les doses efficaces reçues par ces personnels, le système SIEVERT a été mis en service par l'IRSN en 2001, en coopération avec la Direction générale de l'aviation civile (DGAC), l'Observatoire de Paris et l'Institut Polaire français - Paul Emile Victor (IPEV) (§ 2.2.5).

En 2011, 18 compagnies françaises, dont Air France, avaient un abonnement à SIEVERT. Ainsi environ 25 000 personnels navigants ont bénéficié d'un suivi de leur exposition aux rayonnements cosmiques tout au long de l'année.

Parmi ces compagnies, Air France, Regional (filiale du groupe Air France pour les vols en Europe), Air Calédonie International, Unijet et Darta ont envoyé à l'IRSN les doses reçues par leurs personnels en 2011. Le tableau 34 présente le bilan réalisé pour l'année 2011 concernant les personnels navigants de l'aviation civile. Selon ce bilan, 19 % des doses individuelles annuelles sont inférieures à 1 mSv, et 81 % des doses sont comprises entre 1 mSv et 5 mSv. Cette répartition des doses est un peu différente de celle observée en 2009 et 2010 (15% des doses inférieures à 1 mSv), mais reste très proche de celle observée dans d'autres pays européens, comme par exemple l'Allemagne ou les Pays-Bas. La dose individuelle annuelle moyenne est de 2,0 mSv (2,1 mSv en 2010). La dose individuelle annuelle maximale atteint 4,7 mSv, soit une valeur stable par rapport à 2010 (4,9 mSv).

Tableau 34 - Bilan 2011 des doses individuelles annuelles des personnels navigants de l'aviation civile (compagnies Air France, Regional, Air Calédonie International, Unijet et DARTA)

Effectif	Répartition des doses individuelles annuelles (mSv)					Dose moyenne (mSv)	Dose maximale (mSv)
	< 1	1 à 2	2 à 3	3 à 4	4 à 5		
21 195	3 968 (18,7 %)	7 039 (33,2 %)	6 802 (32,1 %)	3 265 (15,4 %)	121 (0,6 %)	2,0	4,7

Le tableau 35 présente un bilan des doses reçues par les personnels navigants de l'aviation militaire. A la différence du bilan présenté dans le tableau 36, ces doses ne sont pas le résultat d'un calcul, mais sont issues de mesures de l'équivalent de dose Hp(10) à l'aide de dosimètres individuels (composantes photonique et neutronique).

Tableau 35 - Bilan 2011 des doses individuelles annuelles des personnels navigants de l'aviation militaire

Effectif	Répartition des doses individuelles annuelles (mSv)		Dose moyenne (mSv)	Dose maximale (mSv)
	< 1	≥ 1		
487	458 (94 %)	29 (6 %)	0,4	2,6

6. ENJEUX ACTUELS EN RADIOPROTECTION

Un certain nombre de questions font aujourd'hui l'objet de réflexions et de travaux dans le domaine de la radioprotection des travailleurs. Ces travaux ont notamment pour objectif de bien cerner les problématiques posées, de développer des approches méthodologiques pour évaluer au mieux les enjeux des situations rencontrées, de définir des doctrines permettant à terme d'harmoniser les pratiques en France, mais aussi à une plus large échelle. Ces travaux mobilisent les experts mais aussi les chercheurs de l'IRSN, en fonction de leur complexité ou de leur degré d'avancement. Pour l'année 2011, ces travaux ont notamment concerné les problématiques du zonage radiologique, de la mesure de débit d'équivalent de dose en champs pulsés, de l'abaissement de la limite de dose au cristallin, de la surveillance de l'exposition interne aux radionucléides de période courte ou encore la participation à certains travaux de l'association HERCA (Heads of the European Radiological protection Competent Authorities).

L'année 2011, marquée par l'accident nucléaire de Fukushima-Daiichi, a également conduit l'institut à mobiliser toute son expertise pour faire face aux conséquences de cet accident au Japon mais aussi en France.

6.1. ZONAGE RADIOLOGIQUE

En février 2011, l'ASN et la DGT ont saisi conjointement les Présidents des groupes permanents d'experts en radioprotection (GPRAD et GPMED) afin d'engager une démarche de réflexion prospective en matière de délimitation et d'accès aux zones réglementées en application du code du travail. Dans ce cadre, le groupe de travail « GT-Zonage », constitué au sein du GPRAD et du GPMED, a programmé un ensemble d'actions sur l'année 2011 en vue de consulter très largement les secteurs d'activités concernés et de faire remonter vers le GT le retour d'expérience des acteurs de terrain ainsi que les difficultés d'application de l'arrêté du 15 mai 2006 relatif aux conditions de délimitation et de signalisation des zones surveillées et contrôlées et des zones spécialement réglementées ou interdites compte tenu de l'exposition aux rayonnements ionisants, ainsi qu'aux règles d'hygiène, de sécurité et d'entretien qui y sont imposées.

L'IRSN a participé au colloque organisé en novembre 2011 dans ce cadre, dont il retient que les problèmes rencontrés dans l'application de l'arrêté se retrouvent dans nombre de situations également identifiées dans ses expertises. L'analyse des événements de radioprotection enregistrés dans la base ERIA (Cf. § 2.3.2.1) révèle ainsi une fréquence importante des incidents caractérisés par un défaut d'application de la réglementation sur le zonage. Il s'agit par exemple de défauts d'affichage de zone, fréquemment rencontrés dans le domaine médical, ou encore de cas de franchissement de seuil, intervenant le plus souvent dans le secteur des contrôles par gammagraphie, sur les chantiers extérieurs notamment.

Le groupe de travail doit présenter aux groupes permanents d'experts en radioprotection ses préconisations pour la révision de l'arrêté dans le courant de l'année 2012 et l'IRSN devrait donner son avis sur le projet de texte, à la lumière du retour d'expérience issu de ses expertises.

6.2. EVALUATION DU DEBIT D'EQUIVALENT DE DOSE EN CHAMPS PULSES

La mesure de débit de dose dans le cas des installations où interviennent des champs de rayonnements ionisants pulsés pose des difficultés pour la mise en application de l'arrêté du 15 mai 2006 relatif au zonage radiologique. A la demande conjointe de l'ASN et de la DGT, l'IRSN a proposé en août 2009 une méthodologie générique pour réaliser cette mesure. Cette méthode est basée sur une évaluation de l'équivalent de dose au corps entier intégré sur une durée d'une seconde. Dans son principe, cette méthode est applicable à la grande majorité des cas de figure de champs pulsés rencontrés dans les différents domaines d'activité (impulsion unique ou train d'impulsions).

Afin de mettre en œuvre cette méthodologie, une session de mesures auprès d'une installation d'irradiation de référence située à Saclay a eu lieu en octobre 2010, à laquelle ont participé les représentants de huit organismes agréés pour les contrôles de radioprotection. Ces actions ont fait l'objet d'un rapport transmis aux autorités en 2011. De la réflexion menée sur ce sujet, il ressort que la méthodologie proposée constitue bien une réponse pratique au besoin d'une mesure adéquate et reproductible du débit de dose « instantané », grandeur à laquelle se réfère l'arrêté du 15 mai 2006, quelles que soient les caractéristiques du champ de rayonnement considéré. De plus, les radiamètres utilisés, dans la mesure où les recommandations formulées par l'IRSN sont suivies, permettent de réaliser des évaluations fiables des équivalents de dose produits par des champs pulsés.

6.3. CONSEQUENCES DE L'ABAISSMENT DE LA LIMITE DE DOSE AU CRISTALLIN

Les études scientifiques les plus récentes ont mis en évidence l'existence d'un risque de cataracte à des niveaux d'exposition aux rayonnements ionisants significativement inférieurs à ceux qui avaient été considérés pour recommander la limite actuelle de dose équivalente au cristallin de 150 mSv par an chez les travailleurs. Le 21 avril 2011, la Commission internationale de protection radiologique a publié une déclaration en faveur d'une réduction de cette limite de dose à 20 mSv par an²⁷. Suite à cette déclaration, le Groupe d'experts de l'Article 31 du Traité Euratom a exprimé une opinion favorable à la prise en compte de cette révision dans le projet de nouvelle directive européenne relative à la radioprotection.

La perspective de l'abaissement de la limite réglementaire annuelle de dose au cristallin constitue un nouveau challenge en matière de radioprotection puisqu'elle devra se traduire par :

- une surveillance systématique de l'exposition de cet organe par dosimétrie passive ;
- une protection (individuelle et collective) obligatoire des yeux dans certains secteurs d'activité ;
- une sensibilisation et une formation des personnels.

Bien que ces dispositions soient d'ores et déjà réglementairement prévues dans le code du travail, force est de constater que leur mise en œuvre est quasi inexistante. L'IRSN estime que les situations d'exposition professionnelle du cristallin commencent à être bien documentées et que des moyens de

²⁷ ICRP. Statement on Tissue reactions. Approved by the Commission on April 21, 2011. <http://icrp.org/docs/ICRP%20Statement%20on%20Tissue%20Reactions.pdf>

surveillance et de protection à l'égard du risque qui en résulte existent. Cependant, il existe encore très peu de dosimètres aujourd'hui parfaitement adaptés et disponibles commercialement. Les moyens de protection individuelle et collective existants sont efficaces, même si les contraintes liées à leur utilisation rendent à ce jour leur acceptation par le personnel assez incertaine (en particulier les lunettes de protection). En tout état de cause, du temps et une adhésion de l'ensemble des acteurs concernés, dont au premier chef les personnels du secteur médical, seront nécessaires pour déployer ces moyens de manière totalement opérationnelle sur le terrain et être en mesure de respecter la nouvelle limite réglementaire annuelle qui s'annonce.

6.4. SURVEILLANCE DE L'EXPOSITION INTERNE AUX RADIONUCLEIDES DE PERIODE COURTE

Les laboratoires mobiles de l'IRSN ont été conçus pour répondre aux situations de crise et ils sont d'ailleurs régulièrement mobilisés à l'occasion des exercices de crise organisés par l'Institut. Au-delà de leur activité de crise, ces laboratoires mobiles sont particulièrement adaptés à la surveillance du personnel qui manipule des substances de courte période radioactive, comme c'est notamment le cas en médecine nucléaire. Les laboratoires mobiles de l'IRSN permettant de réaliser des mesures anthroporadiométriques sur site sont de deux types :

- deux moyens mobiles d'expertise en anthroporadiométrie qui se présentent sous la forme de camions équipés d'une installation de mesure constituée d'une enceinte ouverte plombée (type baignoire) dans laquelle s'allonge la personne à mesurer (Laboratoire Mobile d'anthroporadiométrie, ou LMA, sur la figure 32). Ce système est équipé de deux détecteurs germanium de haute résolution permettant de réaliser des mesures du corps entier, des poumons et de la thyroïde ;
- un moyen léger de mesures anthroporadiométriques du corps entier et de la thyroïde, équipé de 4 postes de mesure (Véhicule Léger d'anthroporadiométrie, ou VLA, sur la figure 33).



Figure 32 - Vues du laboratoire mobile d'anthroporadiométrie LMA

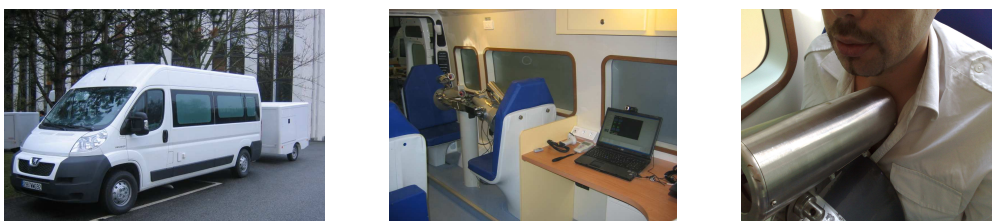


Figure 33 - Vues du laboratoire mobile d'anthroporadiométrie VLA

A la suite d'une première campagne de mesures menée en 2010 dans un CHU du Maine-et-Loire dont ont bénéficié des manipulateurs en électroradiologie médicale, des infirmiers, des techniciens de laboratoire, des préparateurs en pharmacie et des radio-pharmaciens, d'autres hôpitaux ont sollicité l'IRSN en 2011 et ces actions continuent en 2012. Le développement de l'utilisation de ces moyens mobiles permet d'améliorer significativement le suivi de l'exposition interne des travailleurs.

Des campagnes de mesure peuvent également être réalisées pour la caractérisation ponctuelle de postes de travail (chantiers...).

6.5. HARMONISATION DES PRATIQUES EN EUROPE : PARTICIPATION AUX TRAVAUX DU GROUPE HERCA

L'association HERCA (Heads of the European Radiological protection Competent Authorities), créée en 2007 à l'initiative de l'ASN, a pour objectif l'harmonisation des pratiques en matière de radioprotection en Europe. HERCA comprend cinq groupes de travail dont l'un (WG1) est notamment dédié à la radioprotection des travailleurs et aborde plus précisément le suivi des travailleurs extérieurs (« outside workers », selon la directive européenne) et sur un projet de passeport de dose européen. En 2011, l'IRSN a participé aux travaux de ce groupe qui portent actuellement sur une étude de faisabilité du développement d'un tel passeport. Sa mise en place doit permettre de garantir aux travailleurs transfrontaliers une surveillance de leur exposition équivalente à celles des travailleurs exposés exerçant exclusivement dans leur pays. L'instauration de ce passeport au sein de l'Europe impose une capacité à pouvoir échanger les résultats dosimétriques des travailleurs entre les différents pays et donc entre les différents registres nationaux. L'IRSN considère qu'une plateforme d'échanges de données entre les différents systèmes nationaux s'impose et apporte son expertise technique à l'ASN dans cette réflexion.

6.6. ACTIONS LIEES A L'ACCIDENT DE FUKUSHIMA REALISEES AUPRES DES TRAVAILLEURS

Parmi les nombreuses actions menées par l'Institut à la suite de l'accident survenu à Fukushima en mars 2011, un certain nombre ont concerné les travailleurs, même s'il s'agit le plus souvent de

catégories de travailleurs ne faisant pas habituellement l'objet d'une surveillance de l'exposition aux rayonnements ionisants.

Dans son rapport intitulé « *Fukushima, 1 an après* », où il présente ses premières analyses de l'accident survenu en mars 2011 et de ses conséquences²⁸, l'IRSN fait notamment le bilan des contrôles de contamination qu'il a effectués auprès des ressortissants français de retour du Japon (salariés expatriés exerçant au Japon, journalistes ayant couvert l'événement sur place, personnels navigants et particuliers) : en réponse aux interrogations de ces ressortissants, l'IRSN a proposé la réalisation de mesures anthroporadiométriques permettant de détecter la présence éventuelle de radionucléides ayant été incorporés dans l'organisme (au niveau du corps entier ou au niveau de la thyroïde). Au total, courant 2011, l'IRSN a réalisé 280 examens sur 268 personnes (Figure 34), dont 30 % se sont révélés positifs dans les premières semaines qui ont suivi l'accident. L'iode 131 est le radionucléide le plus souvent détecté, suivi par l'iode 132 et le tellure 132, et beaucoup plus rarement le césium 137. Pour chaque personne ayant eu un résultat positif, la dose efficace et la dose équivalente à la thyroïde ont été calculées. Pour la personne la plus exposée, la dose efficace était inférieure à 0,1 mSv et la dose équivalente à la thyroïde était inférieure à 1,4 mSv, ce qui a permis de conclure qu'aucune conséquence sanitaire n'était à craindre pour les ressortissants français mesurés, au vu des niveaux d'exposition observés.

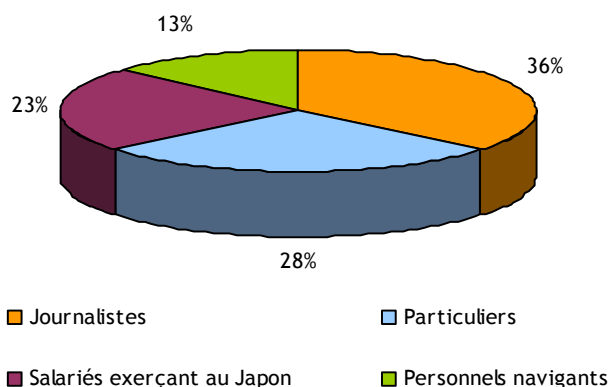


Figure 34 - Répartition des examens anthroporadiométriques réalisés entre le 14 mars 2011 et le 19 décembre 2011 en fonction des activités des personnes mesurées

Cet accident majeur, survenu très loin du territoire national, a cependant fait surgir de nouvelles questions relatives à la surveillance des travailleurs en France. Ainsi, l'IRSN a dû répondre à des demandes relevant de la compétence de la DGT, sur les sujets suivants :

- les risques dans le milieu du travail suite à une éventuelle contamination radioactive des pièces et des produits en provenance du Japon ;

²⁸ Rapport IRSN/DG/2012-001

- les risques pour les personnels manutentionnaires lors des opérations de déchargement des conteneurs du fret aérien ;
- les risques d'exposition aux rayonnements ionisants pour le personnel affecté aux opérations de contrôle des marchandises en provenance du Japon.

Le ministère du travail a également dû se saisir de nouvelles questions relatives à la radioprotection des travailleurs envoyés en mission au Japon. L'IRSN a pleinement rempli son rôle d'expert technique du ministère dans l'élaboration de sa réponse. Pour l'IRSN, l'un des enjeux principaux de radioprotection consiste à anticiper ce type de questions afin d'être en mesure d'y répondre au plus vite, en situation réelle de crise.

7. CHIFFRES CLEFS DE LA SURVEILLANCE DES EXPOSITIONS PROFESSIONNELLES AUX RAYONNEMENTS IONISANTS

Bilan de l'année 2011

Bilan de la surveillance de l'exposition externe par dosimétrie passive

- Effectif total surveillé : 343 988 travailleurs
- Dose collective de l'effectif total surveillé : 64,2 homme.Sv
- Dose individuelle annuelle moyenne sur l'ensemble des travailleurs surveillés : 0,19 mSv
- Dose individuelle annuelle moyenne sur l'ensemble des travailleurs surveillés ayant enregistré une dose supérieure au seuil d'enregistrement : 0,88 mSv
- Effectif ayant enregistré une dose individuelle annuelle > 1 mSv : 14 035 travailleurs (soit 4,1 % de l'effectif total surveillé par dosimétrie passive)
- Effectif ayant enregistré une dose individuelle annuelle > 20 mSv : 12 travailleurs
- Effectif ayant enregistré une dose individuelle annuelle aux extrémités > 500 mSv : 3 travailleurs

Bilan de la surveillance de l'exposition interne

- Nombre d'examens de routine réalisés : 341 377 examens (dont moins de 1 % considérés positifs)
- Effectif concerné par une estimation dosimétrique : 364 travailleurs
- Effectif ayant enregistré une dose efficace engagée > 1 mSv : 9 travailleurs

Bilan de la surveillance de l'exposition aux rayonnements cosmiques (aviation civile)

- Dose collective pour 21 195 personnels navigants : 41,4 homme.Sv
- Dose individuelle annuelle moyenne: 2,0 mSv

Evolution sur les 5 dernières années (dosimétrie externe passive)

	Effectif suivi	Dose collective (homme.Sv)	Dose moyenne sur l'effectif total (mSv)	Dose moyenne sur l'effectif exposé (mSv)	Part de l'effectif ayant une dose ≥ 1 mSv	Effectif ayant une dose ≥ 20 mSv
2007	293 876	56,83	0,19	0,89	4,1 %	32
2008	306 629	59,61	0,19	0,90	4,3 %	16
2009	319 091	65,68	0,21	0,89	4,6 %	15
2010	330 618	62,4	0,19	0,82	4,2 %	8
2011	343 988	64,2	0,19	0,88	4,1 %	12

8. CONCLUSIONS

La veille permanente en matière de radioprotection des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants constitue l'une des missions importantes de service public de l'IRSN. Dans ce cadre, l'Institut établit chaque année un bilan des expositions des travailleurs dans tous les secteurs d'activité soumise à un régime d'autorisation ou de déclaration en application du code de la santé publique (industrie nucléaire, industrie non nucléaire, applications médicales et vétérinaires, recherche) ainsi que des travailleurs de la défense et de ceux exposés à des sources naturelles de rayonnement sur leur lieu de travail.

Les chiffres clefs pour l'année 2011, ainsi que l'évolution des données de la dosimétrie externe passive sur les dernières années, sont résumés ci-contre. Depuis 5 ans maintenant, l'établissement des statistiques nationales relatives à l'exposition des travailleurs se fait selon une méthode stabilisée, ce qui permet d'observer les tendances de façon fiable. Globalement, on retire des statistiques de l'exposition externe passive corps entier de 2007 à 2011 une progression régulière chaque année de la population de travailleurs suivis de l'ordre de 4 %. Cette progression est principalement due à l'augmentation du nombre de travailleurs suivis dans le domaine des activités médicales et vétérinaires. Parallèlement à l'évolution des effectifs surveillés, une augmentation du même ordre de la dose collective associée est observée. Cela se traduit par une stabilité des doses individuelles moyennes annuelles, que celles-ci soient calculées sur l'effectif total ou sur l'effectif ayant enregistré une dose non nulle. La part de l'effectif ayant enregistré une dose annuelle supérieure à 1 mSv (limite réglementaire annuelle pour le public) est également stable sur cette période, légèrement supérieure à 4 %. Dans le même temps, le nombre des dépassements de la limite réglementaire annuelle (20 mSv pour les travailleurs exposés) est de l'ordre de 15.

Cette globale stabilité de l'exposition de l'ensemble des travailleurs peut cacher des disparités importantes entre différentes catégories de travailleurs. S'il est déjà possible d'évaluer globalement les différences d'exposition entre les travailleurs des différents grands domaines d'activité, il est nécessaire de progresser dans la connaissance des expositions au sein des différents secteurs d'activité de chacun de ces domaines, lesquelles peuvent varier de façon très significative, comme suggéré dans le bilan présenté. Pour cela, une information fiable sur l'activité des travailleurs fait actuellement défaut dans le dispositif de traçabilité de leurs expositions. De la même façon, une information plus précise sur le statut des travailleurs permettrait, par exemple, de mieux caractériser l'exposition des prestataires dans les différents domaines d'activité. C'est pourquoi, l'IRSN œuvre très activement au développement de SISERI, qui, après avoir atteint son premier objectif de centraliser, consolider et vérifier l'ensemble des données dosimétriques individuelles, doit maintenant pouvoir disposer de ces informations de façon complète et fiable. Ainsi, SISERI doit devenir un véritable registre national des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants, qui en complément des doses reçues par chaque travailleur, enregistre les informations relatives à son activité, son métier, son statut,... Cette évolution de SISERI a été actée dans le plan national du ministère du travail « Plan Santé au Travail » 2010-2014 et sera effective sur le plan réglementaire

avec la révision en cours de l'arrêté du 30 décembre 2004 relatif à la carte individuelle de suivi médical et aux informations individuelles de dosimétrie des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants.

Au-delà de la connaissance de l'exposition externe du corps entier, d'autres types d'exposition nécessitent également d'être mieux connues, parmi lesquels l'exposition interne, tout particulièrement dans le cas des radionucléides à courte période, ou encore l'exposition du cristallin. S'agissant de la surveillance de l'exposition interne, l'harmonisation des pratiques, à laquelle visent notamment les recommandations de bonne pratique concernant la surveillance médico-professionnelle de l'exposition interne aux radionucléides en installations nucléaires de base, publiées en juillet 2011, est nécessaire pour une meilleure caractérisation de la réalité des expositions professionnelles.

9. REFERENCES

- [1] Norme ISO 20553 (juillet 2006). Surveillance professionnelle des travailleurs exposés à un risque de contamination interne par des matériaux radioactifs.
- [2] Recommandations de bonne pratique. Surveillance médico-professionnelle de l'exposition interne aux radionucléides en installations nucléaires de base (juillet 2011). Société Française de Médecine du travail. <http://www.chu-rouen.fr/sfmt/pages/Recommandations.php>.
- [3] Norme CEI 62387-1 (juillet 2007). Instrumentation pour la radioprotection, systèmes dosimétriques intégrés passifs pour la surveillance de l'environnement et de l'individu.
- [4] Norme ISO 21909 (décembre 2005). Dosimètres individuel passifs pour les neutrons. Exigences de fonctionnement et d'essai.
- [5] Norme ISO 12790-1 (mars 2002). Radioprotection, les critères de performance pour l'analyse radiotoxicologique.
- [6] La radioprotection des travailleurs - Bilan de la surveillance de l'exposition externe en 2003 - IRSN - Rapport DRPH/SER/2004-38 du 22/12/04 - Olivier COUASNON et Alain RANNOU
- [7] La radioprotection des travailleurs - Bilan de la surveillance de l'exposition externe en 2003 (compléments apportés au rapport DRPH/SER/2004-38) - IRSN - Rapport DRPH/SER/2005-03 du 10/02/05 - Olivier COUASNON et Alain RANNOU
- [8] La radioprotection des travailleurs - Bilan 2004 - IRSN - Rapport DRPH/2005-09 du 15/11/05 - Alain RANNOU et Olivier COUASNON
- [9] La radioprotection des travailleurs - Activités de l'IRSN en 2005 dans le domaine de la gestion de la radioprotection - IRSN - Rapport DRPH/2006-09 du 04/12/06 - Alain RANNOU (coordinateur), Roselyne AMEON, Patrice BOISSON, Isabelle CLAIRAND, Olivier COUASNON, Didier FRANCK, Pascale SCANFF, Jean-Luc REHEL, Myriam THEVENET
- [10] La radioprotection des travailleurs - Bilan 2006 de la surveillance des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants en France - IRSN - DRPH/DIR/2008-4 du 01/02/08 - Alain RANNOU, Roselyne AMEON, Patrice BOISSON, Isabelle CLAIRAND, Olivier COUASNON, Didier FRANCK, Jean-Luc REHEL, Pascale SCANFF, Maylis TELLE-LAMBERTON
- [11] La radioprotection des travailleurs - Bilan 2007 de la surveillance des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants en France - IRSN - DRPH/DIR/2008-11 du 05/12/08 - Juliette FEUARDENT, Alain RANNOU, Roselyne AMEON, Isabelle CLAIRAND, Olivier COUASNON, Jean-Michel DELIGNE, Ronan MEAR, Jean-Philippe PIERRE, Nathalie PIRES, Jean-Luc REHEL, Pascale SCANFF, Antoine TALBOT, Maylis TELLE-LAMBERTON
- [12] La radioprotection des travailleurs - Bilan 2008 de la surveillance des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants en France - IRSN - DRPH/DIR/2009-16 du 02/10/09 - Juliette FEUARDENT,

Roselyne AMEON, James BERNIERE, Isabelle CLAIRAND, Johnny DUMEAU, Gwenaëlle LORIOT, Nathalie PIRES, Jean-Luc REHEL, Pascale SCANFF, Antoine TALBOT, Maylis TELLE-LAMBERTON

[13] La radioprotection des travailleurs - Exposition professionnelle aux rayonnements ionisants en France : bilan 2009 - IRSN - DRPH/DIR/2010-14 du 09/09/10 - Juliette FEUARDENT, Roselyne AMEON, Ben-Mekki AYADI, Isabelle CLAIRAND, Sylvie DERREUMAUX, Gwenaëlle LORIOT, Baptiste LOUIS, Nathalie PIRES, Françoise RANCILLAC, Jean-Luc REHEL, Pascale SCANFF

[14] La radioprotection des travailleurs - Exposition professionnelle aux rayonnements ionisants en France : bilan 2010 - IRSN - DRPH/DIR/2011-19 du 23/09/11 - Juliette FEUARDENT, Roselyne AMEON, Ben-Mekki AYADI, Olivier CHABANIS, Cécile CHALLETON-DE VATAHAIRE, Isabelle CLAIRAND, Danièle CRESCINI, Gwenaëlle LORIOT, Jean-Luc REHEL, Pascale SCANFF

ANNEXE I : NOMENCLATURE DES SECTEURS D'ACTIVITE

Utilisations médicales et vétérinaires	
1101000	Radiodiagnostic
1101010	<i>Radiologie conventionnelle</i>
1101020	<i>Radiologie conventionnelle + scanner</i>
1102000	Soins dentaires
1103000	Médecine du travail et dispensaires
1104000	Radiologie interventionnelle
1104010	<i>Cardiologie</i>
1104020	<i>Neurologie</i>
1104030	<i>Vasculaire</i>
1104040	<i>Autres</i>
1105000	Radiothérapie
1105010	<i>Radiothérapie avec Cobalt ou accélérateur</i>
1105020	<i>Radiothérapie autre (protons, neutrons)</i>
1105030	<i>Curiethérapie bas débit</i>
1105040	<i>Curiethérapie pulsée ou haut débit</i>
1106000	Médecine nucléaire
1106010	<i>Services spécialisés en diagnostic</i>
1106011	<i>Sans TEP</i>
1106012	<i>Avec TEP</i>
1106020	<i>Services mixtes thérapie-diagnostic</i>
1107000	Laboratoire d'analyse médicale avec radio-immunologie
1108000	Irradiation de produits sanguins
1109000	Recherche médicale, vétérinaire et pharmaceutique
1110000	Médecine vétérinaire
1111000	Logistique et maintenance du médical (prestataires)
1111010	<i>Logistique</i>
1111020	<i>Maintenance</i>
1112000	Autres
Transport de matières radioactives	
1201000	Nucléaire
1202000	Médical
1203000	Sources à usages divers (industriel, etc.)
Usages industriels et de services (hors entreprises de transport)	
1301000	Contrôles utilisant des sources de rayonnements
1301010	<i>Utilisation de gammagraphes et générateurs X</i>
1301011	<i>Utilisation de gammagraphes et générateurs X fixes</i>
1301012	<i>Utilisation de gammagraphes et générateurs X mobiles</i>
1301013	<i>Utilisation de gammagraphes et générateurs X fixes et mobiles</i>
1301020	<i>Détection de plomb dans les peintures</i>
1301030	<i>Utilisation de jauges industrielles</i>
1301031	<i>Utilisation de jauges industrielles à poste fixe</i>
1301032	<i>Utilisation de jauges industrielles avec matériel mobile</i>
1301033	<i>Utilisation de jauges industrielles fixes et mobiles</i>
1302000	Soudage par faisceau d'électron
1303000	Production et conditionnement de radio-isotopes (y compris industrie radio-pharmaceutique)
1304000	Radio-polymérisation et « traitement de surface »
1305000	Stérilisations
1306000	Contrôles pour la sécurité des personnes et des biens
1307000	Détection géologique (Well logging)
1308000	Logistique et maintenance dans le secteur industriel (Prestataires)
1308010	<i>Logistique</i>

1308020	<i>Maintenance</i>
1309000	Autres
Sources naturelles	
1401000	Aviation
1402000	Mines et traitement des minerais
1403000	Manipulation et stockage de matières premières contenant des éléments des familles naturelles du thorium et de l'uranium
1404000	Activités s'exerçant dans un lieu entraînant une exposition professionnelle au radon et à ses descendants
1404010	<i>Sources thermales et établissements thermaux</i>
1404020	<i>Captage et traitement des eaux</i>
1404030	<i>Autres</i>
1405000	Industries du gaz, du pétrole et du charbon
1406000	Autres
Nucléaire	
1501000	Propulsion nucléaire
1501010	<i>Equipage</i>
1501020	<i>Maintenance à terre</i>
1501030	<i>Intervention et préparation à l'intervention</i>
1502000	Armement
1502010	<i>Maintenance des installations</i>
1502020	<i>Transport</i>
1502030	<i>Intervention et préparation à l'intervention</i>
1503000	Extraction et traitement du minerai d'uranium
1504000	Enrichissement et conversion
1505000	Fabrication du combustible
1506000	Réacteurs de production d'énergie
1507000	Retraitement
1508000	Démantèlement des installations nucléaires
1509000	Effluents, déchets et matériaux récupérables (y compris ne provenant pas du cycle)
1509010	<i>Traitement des effluents</i>
1509020	<i>Traitement et conditionnement des déchets</i>
1509030	<i>Entreposage</i>
1509040	<i>Stockage</i>
1510000	Logistique et maintenance du Nucléaire (Prestataires)
1510010	<i>Logistique</i>
1510011	Logistique dont le personnel est attaché aux sites
1510012	Logistique dont le personnel est itinérant
1510020	<i>Maintenance</i>
1510021	Maintenance dont le personnel est attaché aux sites
1510022	Maintenance dont le personnel est itinérant
1511000	Installations de recherche liées au Nucléaire
1512000	Autres
Autres	
1601000	Recherche (autre que nucléaire et médical) et Enseignement
1601010	<i>Centre d'enseignement et formation</i>
1601020	<i>Etablissements de recherche (autre que nucléaire et médical)</i>
1602000	Situations de crise (pompiers, protection civile...)
1603000	Organismes d'inspection et de contrôle
1603010	<i>Organismes d'inspection et de contrôle publics</i>
1603020	<i>Organismes de contrôle privés</i>
1604000	Activités à l'étranger
1605000	Activités sécurité-radioprotection-environnement

