



Evaluation des risques pour les personnels de France-Télécom associés aux parasurtenseurs contenant des radioéléments

Rapport DRPH 2010 - 7

DIRECTION DE LA RADIOPROTECTION DE L'HOMME

SERVICE D'ETUDES ET D'EXPERTISES EN RADIOPROTECTION

SERVICE DE RADIOBIOLOGIE ET D'ÉPIDEMIOLOGIE

HISTORIQUE DES MODIFICATIONS

Version	Date	Auteur(s)	Pages ou paragraphes modifiés	Description ou commentaires
1	03/2010	A. THOMASSIN, C. METZ, A. RANNOU		Version initiale

LISTE DE DIFFUSION

Nom	Organisme
M. L. ZYLBERBERG	France Télécom Direction des Ressources Humaines

RESUME

L'entreprise France Télécom a utilisé et utilise encore des dispositifs appelés parasurtenseurs pour protéger son réseau de télécommunications vis-à-vis de tensions perturbatrices – principalement la foudre. Un grand nombre d'anciens parasurtenseurs encore en service aujourd'hui contiennent des radioéléments. Ce rapport vise à répondre à France Télécom qui souhaite que soient appréciés les niveaux de dose et de risque des personnels exposés à ces parasurtenseurs radioactifs lors de leur pose, lors de l'exploitation des installations en contenant ou lors de leur dépose. Différents scénarios, décomposés en situations d'exposition, sont considérés pour évaluer l'exposition. Il ressort des calculs réalisés que la dose efficace reçue lors de la pose des parasurtenseurs pourrait se situer entre $0,01 \text{ mSv.an}^{-1}$ et $0,14 \text{ mSv.an}^{-1}$, celle reçue lors de l'exploitation des installations en contenant entre $0,02 \text{ mSv.an}^{-1}$ et $0,08 \text{ mSv.an}^{-1}$, et celle à recevoir lors de leur dépose entre $0,02 \text{ mSv.an}^{-1}$ et $0,07 \text{ mSv.an}^{-1}$. Des évaluations de dose au sein et à la lèvre montrent que les doses reçues pour ces parties du corps se situeraient aux environs de 1 mSv.an^{-1} ; de même, une estimation de la dose au fœtus montre qu'elle serait très inférieure à $0,04 \text{ mSv.an}^{-1}$. Des considérations relatives à l'incorporation possible des radioéléments concernés (tritium, radium, radon) montrent que les doses correspondantes seraient également très faibles. Toutes ces évaluations dosimétriques permettent de conclure à l'absence de risque significatif de cancers radio-induits. Par contre, les calculs montrent que des doses à la peau des mains ont pu être plus significatives – de 4 mSv.an^{-1} à 40 mSv.an^{-1} – dues aux manipulations des parasurtenseurs sans protection; une dépose intensive de ces parasurtenseurs nécessitera, en conséquence, l'emploi de protections appropriées (gants, emballages blindés).

ABSTRACT

MOTS-CLES : parasurtenseur, radioactivité, dose, risque

TABLE DES MATIERES

1 INTRODUCTION	6
2 LE CONTEXTE	6
3 LES PARASURTENSEURS	8
3.1 LES TYPES	9
3.2 LES ACTIVITES	9
4 LA MODELISATION	11
4.1 LES ACTIVITES ET LES SPECTRES	11
4.2 LES GEOMETRIES ET LES OUTILS DE CALCUL	12
5 L'EXPOSITION	14
5.1 L'EXPOSITION EXTERNE	14
5.1.1 Les scénarios	14
5.1.2 Le scénario n° 1	15
5.1.3 Le scénario n° 2	16
5.1.4 Le scénario n° 3	17
5.1.5 Le scénario n° 4	18
5.1.6 Le scénario n° 5	19
5.1.7 Le scénario n° 6	20
5.1.8 Le cas particulier du parasurtenseur à la bouche	21
5.1.9 La dose au sein.....	21
5.1.10 La dose au foetus	22
5.2 L'EXPOSITION INTERNE	22
5.2.1 L'inhalation et l'ingestion	22
5.2.2 Le radon.....	23
5.2.3 Le tritium	25
6 LE RISQUE	25
6.1 INTRODUCTION	25
6.1.1 Cancers et rayonnements ionisants	25
6.1.2 L'exposition des travailleurs de France Télécom	26
6.2 SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES SUR LES RISQUES RADIO-INDUITS.....	26
6.2.1 Le cancer du sein	26
6.2.2 Le cancer de la peau.....	27
6.2.3 Les cancers de la cavité buccale et du pharynx	28
6.3 DEMARCHE D'ÉVALUATION QUANTITATIVE DU RISQUE DE CANCER RADIO-INDUIT	29
7 CONCLUSION	32
8 REFERENCES	33

ANNEXE I : CHAINES RADIOACTIVES	36
ANNEXE II : CARACTERISTIQUES RADIOLOGIQUES	37
ANNEXE III : INVENTAIRES ET ACTIVITES FORFAITAIRES	38
ANNEXE IV : DEBITS DE DOSE DES PARASURTENSEURS RPF	39
ANNEXE V : SOURCE PONCTUELLE	40
ANNEXE VI : SOURCE LINEAIRE.....	41
ANNEXE VII : MONTAGE D'UNE TETE DE CABLE.....	42
ANNEXE VIII : DOSE A LA PEAU OU A LA LEVRE.....	44
ANNEXE IX : DOSE A LA PEAU DU SEIN ET AU SEIN.....	45
ANNEXE X : DOSE EFFICACE	46

INTRODUCTION

Les personnels de France Télécom chargés de la maintenance du réseau téléphonique ont pu être exposés à des doses de rayonnements ionisants dues à la présence de matière radioactive dans des parasurtenseurs. Après avoir rappelé le contexte de l'étude, objet du présent rapport, les différents parasurtenseurs radioactifs sont passés en revue, en termes d'activité et de caractéristiques dosimétriques. La méthode de calcul des doses associées à différentes situations d'exposition supposées représentatives des conditions de travail au cours desquelles différentes catégories de personnels de France Télécom ont été exposés à ces parasurtenseurs est ensuite présentée. A partir de ces estimations de dose et des connaissances épidémiologiques actuelles sur les effets des rayonnements ionisants sur la santé de l'homme, le risque qui peut en résulter pour les personnels de France Télécom est discuté.

1 LE CONTEXTE

En 1998, le Comité d'Hygiène et de Sécurité des Conditions de Travail (CHSCT) de la Direction Régionale de Lyon de l'entreprise France Télécom a été saisi d'une demande d'étude à la suite de la survenue de plusieurs maladies cancéreuses (dont une forte proportion de cancer du sein) dans un service d'accueil téléphonique. Au cours de l'enquête menée, il a été découvert que des parasurtenseurs radioactifs avaient été utilisés par certains personnels chargés de la maintenance du réseau téléphonique. Il a alors été demandé, en complément de la demande initiale, d'évaluer les expositions passées, d'apprécier le risque sanitaire pour les personnels qui avaient manipulé ces matériels et de définir une conduite à tenir pour les dispositifs encore utilisés sur le réseau.

Une étude interne de France Télécom a alors été conduite au début des années 2000, [1], visant à apprécier les matériels et leur niveau de radioactivité ainsi que les doses susceptibles d'être reçues lors de leur utilisation et/ou manipulation. Cette étude a conduit à effectuer un certain nombre de mesures :

- des mesures d'activité, réalisées par l'Institut de Physique Nucléaire de Lyon (IPNL) ou par le Laboratoire de Physique Subatomique et des Technologies associées (SUBATECH) de Nantes ;
- des mesures de dose, réalisées par l'IPNL et l'Office de Protection contre les Rayonnements Ionisants (OPRI).

Les conclusions de cette étude – qui s'est limitée aux parasurtenseurs contenant du radium 226 – sont :

- la pertinence de recenser les parasurtenseurs de type 96 utilisés dans les répartiteurs d'abonnés, de petite taille et présentant une forte disparité d'activité, d'évaluer leur activité avant démontage et récupération, d'instituer un suivi médical spécifique pour les agents des services des lignes qui ont pu par le passé porter ces parasurtenseurs à la bouche, d'étudier la pertinence d'une approche épidémiologique portant sur le cancer du sein chez les personnels ayant manipulé ces parasurtenseurs ;
- la suggestion pour les parasurtenseurs utilisés dans les boîtes RPF (dont le risque d'irradiation paraît plus faible que pour les parasurtenseurs de type 96, mais qui présentent un risque de contamination plus important) de récupérer les matériels correspondants, d'instituer un suivi médical spécifique pour les agents des services des lignes qui ont pu par le passé porter ces parasurtenseurs à la bouche, d'examiner

si la fréquence des pathologies liées à la contamination par le radium 226 est plus élevée chez les personnels ayant manipulé ces matériels ;

- la recommandation de conduire une étude complémentaire pour la récupération des parasurtenseurs des boîtes RPC, dont les risques pour la santé paraissent minimes.

En parallèle de son étude interne, France Télécom a demandé à la société Hémisphères d'examiner les modalités de collecte des parafoudres en vue de leur élimination d'une part, et d'effectuer une synthèse relative aux parafoudres radioactifs d'autre part. Le premier document établi par Hémisphères [2] examine quatre scénarios d'élimination des parasurtenseurs en termes de dépose, entreposage intermédiaire et élimination finale envisageable avec l'Agence Nationale pour les Déchets Radioactifs (ANDRA). Cette étude ne présente pas de calculs de dose, et à ce titre n'a pas été particulièrement utile au présent travail de l'IRSN. En revanche, le second document, [3], faisant la synthèse des caractéristiques des parasurtenseurs radioactifs à partir notamment des données d'inventaire de France Télécom, et des données de mesure d'activité de ces parasurtenseurs réalisées par l'INPL et SUBATECH, fournit une image assez précise et assez exhaustive des caractéristiques radiologiques des parasurtenseurs, et a constitué, de ce fait, une base de travail très utile à l'IRSN.

En vue de l'élimination du réseau des parasurtenseurs radioactifs d'une part, et pour apprécier les niveaux d'exposition de ses personnels aux parasurtenseurs radioactifs (en termes de dose et de risque) d'autre part, France Télécom a demandé [4] à l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) une assistance pour la gestion du parc de parasurtenseurs à éliminer du réseau et une évaluation du risque radiologique pour les personnels attribuable à l'exposition aux parasurtenseurs contenant des radioéléments. Le premier volet de la demande a fait l'objet d'un accord-cadre conclu avec le Service d'Intervention et d'Assistance en Radioprotection (SIAR) de l'IRSN. Le second volet est l'objet du présent rapport ; celui-ci a été établi conjointement par l'Unité d'Expertise en Radioprotection des Travailleurs et de la Population (UETP) du Service d'études et d'Expertise en Radioprotection (SER) et le Laboratoire d'Épidémiologie (LEPID) du Service de Radiobiologie et d'Épidémiologie (SRBE), conformément à la proposition technique et financière [5] formulée par l'IRSN en réponse à la demande de France Télécom.

Les documents sur lesquels s'est appuyée cette étude sont ceux transmis par France Télécom à l'IRSN à la suite d'une réunion de travail le 9 juillet 2008 et confirmés lors de la réunion d'enclenchement de l'étude de l'IRSN le 11 septembre 2009 [6] ; il s'agit principalement de l'étude interne de France Télécom (et de ses annexes) en référence [1], du document de synthèse sur les parafoudres radioactifs de Hémisphères en référence [3], du catalogue des parafoudres France Télécom en référence [7], et du compte rendu d'une visite de terrain en référence [8].

Il est à noter que certaines informations ont par ailleurs été trouvées dans le rapport n° 10-08 de la Commission de Recherche et d'Information Indépendantes sur la Radioactivité (CRIIRAD), en référence [9], publié le 15 mars 2010 sur son site Internet¹.

¹ <http://www.criirad.org>.

2 LES PARASURTENSEURS

De manière à protéger efficacement son réseau vis-à-vis des phénomènes extérieurs d'origine électrique (principalement la foudre), France Télécom utilise des parasurtenseurs (anciennement dénommés parafoudres). Il s'agit de dispositifs étanches de petite taille, en verre, céramique ou métal, enfermant un petit volume d'air dans lequel deux électrodes se font face. Ces dispositifs servent à écouler le courant électrique lorsque la tension électrique des fils est trop importante, permettant ainsi de protéger les appareils auxquels les fils sont connectés. D'autres dispositifs de protection ont été utilisés comme par exemple les fusibles ou les bobines thermiques ; mais ces dispositifs n'ont pas contenu de radioéléments.

Les parasurtenseurs sont placés entre la terre et la ligne de l'abonné, ainsi que le montre la figure 1, extraite de l'étude en référence [1] :

- soit chez l'abonné (ou dans la rue) entre le réseau aérien et le réseau souterrain : il s'agit de boîtes dénommées RPF (raccordement, parafoudre, fusible) ou RPC (raccordement, parasurtenseur, coupure),
- soit dans le répartiteur d'abonnés (communément appelé central téléphonique) de France Télécom, entre le réseau souterrain et le réseau aérien, à l'arrivée de la ligne de l'abonné sur une « tête de câble ».

Chaque abonné dispose de deux fils et il y a un parasurtenseur sur chaque fil au niveau de la boîte de raccordement et un parasurtenseur sur chaque fil au niveau du répartiteur d'abonnés.

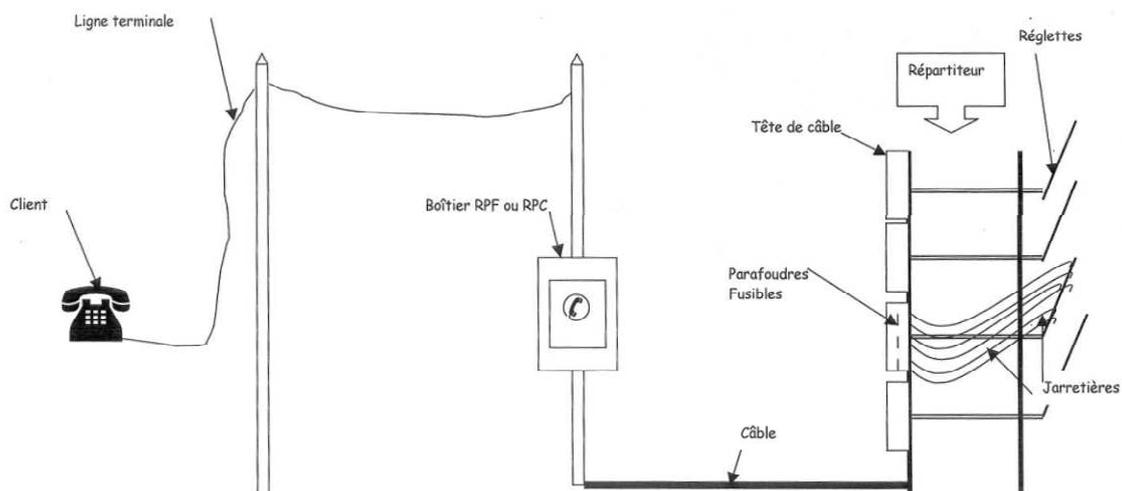


Figure 1 : Implantation des parasurtenseurs sur le réseau France Télécom

De manière à favoriser l'amorçage, certains parasurtenseurs contiennent des radioéléments pour pré-ioniser l'air. Ce sont ceux susceptibles d'exposer les personnels de France Télécom aux rayonnements ionisants, et auxquels ce rapport se limite.

Depuis la fin des années 90, France Télécom a procédé à :

- une identification des différents types de parasurtenseurs susceptibles de contenir des radioéléments ;
- une caractérisation radiologique des différents types de parasurtenseurs ;
- un inventaire sur l'ensemble du réseau de manière à estimer le nombre de parasurtenseurs de chaque type.

2.1 LES TYPES

D'après le catalogue des parafoudres de France Télécom [7], tous les parasurtenseurs contenant des radioéléments se présentent sous la forme de petites ampoules étanches à peu près cylindriques. Il en existe de nombreux modèles, variant suivant le diamètre (de 5 à 40 mm), la longueur (de 15 à 70 mm), la nature de l'enveloppe (verre, céramique ou métal) et le radioélément utilisé pour pré-ioniser l'air intérieur.

L'IRSN retient que les parasurtenseurs sont de petites tailles. Ceci permet de modéliser un parasurtenseur par une source ponctuelle pourvu que le point de calcul soit à quelques centimètres au moins du parasurtenseur (cf. § 4).

2.2 LES ACTIVITES

L'identification des radioéléments présents dans les parasurtenseurs a été faite par spectrométrie γ et par spectrométrie β à scintillation liquide (recherche du tritium).

Quatre radioéléments ont été identifiés : le tritium (H-3), le prométhium 147 (Pm-147), le radium 226 (Ra-226) et le thorium 232 (Th-232).

Le plomb 210 (Pb-210) est associé au radium 226 avec des activités relativement proches ; ce qui est normal dans la mesure où ce radioélément est un descendant de la chaîne radioactive du radium 226, en équilibre avec ce dernier si la chaîne de décroissance n'est perturbée par aucun phénomène. A l'inverse, des cas de parasurtenseurs contenant du plomb 210 sans contenir de radium 226 ont été observés, laissant à penser que du plomb 210 a pu être utilisé seul dans la fabrication de certains parasurtenseurs.

Quelques traces d'américium 241 (Am-241) ont été évoquées mais cela paraît peu vraisemblable ; de même pour un parasurtenseur qui aurait été mesuré avec du krypton 85 (Kr-85). Enfin, du potassium 40 (K-40) a également été détecté, probablement d'origine naturelle car certaines enveloppes de parasurtenseurs sont en céramique.

Le tableau I, extrait de l'étude en référence [3], présente les caractérisations radiologiques effectuées par des laboratoires spécialisés (SUBATECH, INPL) pour déterminer les radioéléments et les activités en présence dans les différents types de parasurtenseurs.

A partir des résultats de mesure, la société Hémisphères a établi un inventaire à l'échelle nationale, en attribuant une activité forfaitaire à chaque type de parasurtenseur, celle-ci étant raisonnablement pénalisante pour ne pas sous-estimer l'activité moyenne de chaque parasurtenseur, mais ne pas la surestimer non plus de manière excessive ; la valeur d'activité est arrondie à la dizaine, la centaine ou le millier le plus proche.

Tableau I : Caractérisation radiologique

Type	Radioélément	Activité (Bq)		Retenue
		SUBATECH	INPL	
Parasurtenseurs des répartiteurs d'abonnés				
M01	Ra-226	300-560	[5 , 43]	100
M06	Pm-147	< 1000		1000
M13	Pm-147	3700		400
M14	Pm-147	< 1200		1000
M15	Ra-226	20		20
M16	Ra-226	104		100
M17	Ra-226	320		300
M18	Kr-85	14 000		2000
M19	Ra-226	-		300
Parasurtenseurs sur boîtes RPF ou RPC				
C01	H-3	320		300
C02	H-3	320		300
C03	H-3	230		200
C04	H-3	130		100
C05	H-3	24		20
C07	H-3	3 200 000		3 000 000
C10	Th-232	28		30
C11	H-3	480 000		500 000
C12	Pm-147	< 1300		1000
C14	Ra-226	1000	1266	1000
C15	Th-232	51		50
C16	H-3	32 000		30 000
C18	Th-232	7,3		10
C19	Ra-226	3800		4000
C20	Ra-226	970-28	3000	1000
C21	Th-232	1		1
C22	H-3	5 400 000		5 000 000
C24	Th-232	20		20
C37	Ra-226	180		200
C38	Ra-226	4,6 - 9,7		10
C39	H-3	?		500 000
G09	H-3	4600		5000
G10	Ra-226	23		20

L'IRSN constate la très grande disparité des activités mesurées pour chaque radionucléide : de 20 à 3800 Bq pour le radium 226, de 1 à 50 Bq pour le thorium 232, de 24 à 5 400 000 Bq pour le tritium et de 1 000 à 3 700 Bq pour le prométhium 147.

Pour effectuer ses calculs de dose, l'IRSN prend en compte les radioéléments identifiés et les activités par type de parasurtenseur retenues présentés dans le tableau I. Toutefois, des descendants radioactifs du radium 226 et du thorium 232 ayant été identifiés avec des activités voisines de leur père, l'IRSN considère que les chaînes du radium 226 et du thorium 232 sont à l'équilibre radioactif ; cette hypothèse est raisonnablement pénalisante et cohérente avec le fait que les enveloppes des parasurtenseurs sont *a priori* étanches. Les annexes I et II présentent respectivement les chaînes radioactives du radium 226 et du thorium 232, ainsi que les caractéristiques radiologiques principales de ces radioéléments.

3 LA MODELISATION

3.1 LES ACTIVITES ET LES SPECTRES

Partant des deux constats suivants :

- les durées pendant lesquelles des personnels de France Télécom ont été potentiellement exposés aux parasurtenseurs sont longues ;
- la grande disparité des parasurtenseurs en termes d'activité et de radionucléides, ne permettant pas d'associer un ou des parasurtenseurs parfaitement caractérisés à une ou des situations d'exposition ;

l'IRSN considère qu'une évaluation raisonnable des expositions ne peut se faire qu'en retenant des sources moyennes et en évaluant des doses annuelles.

Pour ce faire, l'IRSN propose de reprendre la méthode de la société Hémisphères, c'est-à-dire de considérer l'activité retenue pour chaque parasurtenseur (valeurs du tableau I) pondérée par les inventaires qui lui avaient été transmis, en distinguant les parasurtenseurs des répartiteurs d'abonnés des parasurtenseurs des boîtes RPF ou RPC. Les inventaires cités sont présentés en annexe III.

Pour les répartiteurs d'abonnés, l'IRSN considère la source moyenne définie dans le document en référence [2] (page 55) à partir d'un inventaire particulièrement conséquent de 156 725 parasurtenseurs totalisant une activité de $1,53 \cdot 10^8$ Bq. Ceci conduit à retenir une activité de 977,5 Bq par parasurtenseur, composée à 99,66% de prométhium 147 et à 0,34% de radium 226 ;

Pour les boîtiers RPF ou RPC, la situation est un peu plus complexe dans la mesure où le document en référence [2] propose deux inventaires, ne conduisant pas à la même source moyenne. L'IRSN a retenu, sur la base d'un calcul à l'aide du code MICROSIELD® [10] présenté en annexe IV, la source moyenne générant les débits de dose les plus élevés (d'un facteur 2 environ). Ainsi, l'IRSN considère la source moyenne établie dans le document en référence [2] (page 57) à partir d'un inventaire de 2589 parasurtenseurs totalisant une activité de $6,82 \cdot 10^8$ Bq. Ceci conduit à retenir une activité de $2,6355 \cdot 10^5$ Bq par parasurtenseur, composée à 99,98% de tritium, à 0,018% de radium 226 et à 0,0054% de thorium 232.

Le tableau II présente une synthèse des sources qui sont utilisées dans les calculs.

Tableau II : Synthèse des sources pour les évaluations

		Répartiteur	RPF ou RPC
Activité par parasurtenseur (Bq)		977,5	2,6355 10 ⁵
Spectre (%)	tritium		99,9767
	prométhium 147	99,65635	
	radium 226	0,34365	0,01789
	thorium 232		0,0054

Il est à noter qu'en termes d'exposition externe, et pour les sources considérées, le prométhium 147 apportera une contribution négligeable devant celle du radium 226, de même que le tritium (émetteur β pur) n'apportera aucune contribution.

3.2 LES GEOMETRIES ET LES OUTILS DE CALCUL

Compte tenu que :

- les parasurtenseurs sont de petite taille ;
- les parasurtenseurs sont alignés verticalement sur les têtes de câble, distants les uns des autres de moins de 1 cm ;
- les boîtes servant à entreposer des parasurtenseurs ne sont pas de grandes dimensions ;

l'IRSN retient les modélisations géométriques suivantes pour les sources, en fonction des différentes configurations d'exposition :

- pour les configurations d'exposition autres que devant les têtes de câble et avec des distances entre les parasurtenseurs et l'opérateur supérieures à quelques centimètres, les parasurtenseurs sont représentés par une seule source ponctuelle (d'activité égale à la somme de leurs activités), quel que soit leur nombre ; il s'agit donc d'une hypothèse relativement pénalisante notamment pour les distances courtes (quelques centimètres ou dizaines de centimètres) ; c'est le cas par exemple des parasurtenseurs en stockage dans un magasin, d'une boîte de parasurtenseurs dans le coffre d'un véhicule ou des parasurtenseurs en place dans un boîtier RPF ou RPC ;
- pour les configurations d'exposition devant des têtes de câble des répartiteurs d'abonnés (installation ou remplacement de parasurtenseurs ou mouvements de jarretières), l'ensemble des parasurtenseurs de la tête de câble est représenté par une source linéaire de hauteur égale à la tête de câble et respectant l'activité totale de tous les parasurtenseurs installés sur la tête de câble ;

Les calculs réalisés pour les deux configurations de sources ci-dessus sont réalisés avec le code de calcul MICROSHIELD® [10]. Ce code largement éprouvé en radioprotection estime les débits de dose

efficace² et de dose à la peau³ (en moyenne corps entier) pour les sources de photons par la méthode d'atténuation en ligne droite. La géométrie d'irradiation retenue est celle dite antéro-postérieure, qui fournit les coefficients de conversion de flux de photons en débit de dose les plus élevés (démarche enveloppe). Par ailleurs, aucune protection n'a été retenue vis-à-vis des photons, dans la mesure où ni les épaisseurs faibles des matériaux constituant les parasurtenseurs ni l'air n'apportent des atténuations importantes – cela reste néanmoins une approche pénalisante. Il est à noter enfin que pour ces configurations, les rayonnements β ne contribuent pas à la dose et ne sont pas pris en compte. Les calculs sont détaillés dans les annexes V et VI ;

- dans le cas des expositions avec des distances très courtes entre le ou les parasurtenseurs et l'opérateur, deux configurations ont été distinguées, selon le nombre de parasurtenseurs :
 - configuration avec un seul parasurtenseur (manipulation d'un parasurtenseur à la main ou parasurtenseur à la bouche) : le parasurtenseur est représenté par un cylindre de diamètre 4 mm, de longueur 15 mm (parasurtenseur le plus petit – démarche enveloppe) au contact de la peau. A défaut de pouvoir définir un matériau moyen (nature, épaisseur et densité) pour représenter la protection (vis-à-vis des rayonnements α et β) apportée par l'enveloppe du parasurtenseur, il a été retenu la protection minimale qu'il paraissait raisonnable de considérer, à savoir 0,2 mm de verre ; ce qui est une hypothèse vraisemblablement pénalisante. La source de rayonnement proprement dite est intégralement concentrée au centre du cylindre ;
 - configuration avec plusieurs parasurtenseurs pouvant représenter un paquet de parasurtenseurs déposé dans une poche : le paquet est représenté par un parallélépipède de $2 \times 8 \times 2 \text{ cm}^3$, estimé représenter correctement une cinquantaine des parasurtenseurs précédents, et avec une activité volumique postulée homogène. Le parallélépipède est séparé de la peau par une épaisseur de 0,2 mm de verre et une épaisseur de 3 mm de coton (censée simuler l'épaisseur minimale de textile due à un ou deux vêtements portés par l'opérateur). Cette démarche est pénalisante de par le nombre relativement élevé de parasurtenseurs postulés dans la poche, la distance toujours supposée minimale entre la source et la peau et la faible protection retenue. De plus, c'est le cas de la poche poitrine, de préférence au cas de la poche basse, qui a été retenu, car il est pénalisant d'un facteur 1,5 environ.

Les calculs réalisés pour les deux configurations de sources ci-dessus sont réalisés avec le code de calcul MCNP [11]. Ce code également largement éprouvé simule le transport des particules neutres (photons, neutrons) et celles chargées (α et β) dans n'importe quelle géométrie et n'importe quel matériau. Ces calculs sont rendus nécessaires par le fait que certains des rayonnements β des

² La dose efficace est un indicateur de radioprotection qui prend en compte les doses équivalentes délivrées à chacun des organes du corps humain exposés à des rayonnements ionisants et leur sensibilité à ces rayonnements. Elle s'exprime en sievert (Sv) ou ses sous-unités (mSv ou μ Sv).

³ La dose équivalente à un tissu ou un organe est la dose moyenne délivrée par un rayonnement ionisant à ce tissu ou organe tenant compte de la nature et de l'énergie de celui-ci. Elle s'exprime en sievert (Sv) ou ses sous-unités (mSv ou μ Sv).

descendants des chaînes radioactives du radium 226 et du thorium 232 peuvent traverser l'épaisseur postulée de 0,2 mm de verre. Un fantôme anthropomorphe mathématique (cf. figure 3) a été utilisé pour estimer la dose aux organes, la dose moyenne corps entier et la dose en certains points d'intérêt. Il est à noter que dans le cas de sources de rayonnements quasiment au contact de l'opérateur, il y a un très fort gradient de la dose dans l'espace, dû à une décroissance géométrique du flux de photons inversement proportionnel au carré de la distance à la source d'une part, et à une portée limitée des rayonnements β dans la peau de l'ordre de quelques mm d'autre part. En conséquence, les doses ainsi calculées décroissent très fortement dès que le point de calcul s'éloigne. Les calculs sont détaillés dans les annexes VIII, IX et X.

4 L'EXPOSITION

Deux voies d'exposition sont à prendre en compte : d'une part, l'exposition externe qui résulte de la présence d'un opérateur à une distance plus ou moins proche d'un ou plusieurs parasurtenseurs (§ 5.1), d'autre part l'exposition interne due à l'incorporation de radionucléides pouvant être relâchés par un ou plusieurs parasurtenseurs suite à un manque d'étanchéité (§ 5.2).

L'indicateur que l'on cherche à déterminer pour estimer le risque associé à une exposition interne ou externe de l'organisme aux rayonnements ionisants est la *dose efficace annuelle*. Toutefois, des doses plus élevées peuvent être délivrées localement, notamment à la peau lorsque les parasurtenseurs sont tenus dans les mains ou mis dans une poche, ou encore aux lèvres lorsqu'un parasurtenseur est tenu à la bouche. La dose à la peau dans la zone la plus exposée est alors calculée et comparée à la dose moyenne à la peau pour l'organisme entier. La dose au sein associée au scénario des parasurtenseurs placés dans la poche a en outre été calculée compte tenu de l'excès de cancers du sein évoqué plus haut (§ 2). Enfin, la dose au fœtus a été calculée pour prendre en compte le cas d'une opératrice enceinte au moment de l'exposition.

4.1 L'EXPOSITION EXTERNE

4.1.1 LES SCENARIOS

Compte tenu :

- de mises en œuvre différentes des parasurtenseurs dans les répartiteurs d'abonnés et dans les boîtiers RPF ou RPC ;
- de la volonté d'apprécier les doses de manière **rétrospective** (installation et maintenance des parasurtenseurs) et **prospective** (récupération et évacuation des parasurtenseurs) [5] ;

il est retenu de calculer les doses pour 6 scénarios d'exposition ; à savoir :

- 2 scénarios relatifs à l'installation des parasurtenseurs :
 - scénario n°1 : Installation des parasurtenseurs dans les répartiteurs d'abonnés ;
 - scénario n°2 : Installation des parasurtenseurs dans les boîtiers RPF ou RPC ;

- 2 scénarios relatifs à l'exploitation des installations :
 - scénario n°3 : Exploitation et maintenance d'un répartiteur d'abonnés ;
 - scénario n°4 : Exploitation et maintenance des boîtiers RPF ou RPC ;
- 2 scénarios de dépose des parasurtenseurs des installations :
 - scénario n°5 : Enlèvement des parasurtenseurs des répartiteurs d'abonnés ;
 - scénario n°6 : Enlèvement des parasurtenseurs des boîtiers RPF ou RPC.

La dose est calculée pour un an de travail d'un opérateur affecté en intégralité à un scénario. De manière forfaitaire, il a été retenu 8 heures de travail par jour, 5 jours de travail par semaine et 48 semaines de travail par an.

La dose annuelle est calculée en décomposant chaque scénario en plusieurs situations normales d'exposition.

Pour les quatre premiers scénarios, il est postulé l'existence d'un magasin d'entreposage du matériel dans lequel il y a un stockage de 10 000 parasurtenseurs.

4.1.2 LE SCENARIO N° 1

Dans ce scénario, l'opérateur installe des têtes de câble dans des répartiteurs d'abonnés. Son travail se décompose en opérations de câblage des têtes de câble et de pose des parasurtenseurs. L'opérateur installe 4 têtes de câble par répartiteur d'abonnés et par semaine.

Il est fait le distinguo entre les grands répartiteurs d'abonnés et les petits répartiteurs d'abonnés. Pour les grands répartiteurs d'abonnés : une tête de câble a une hauteur égale à 4 m avec 896 parasurtenseurs, nécessite 8 heures de câblage et 4 heures de pose des parasurtenseurs. Pour les petits répartiteurs d'abonnés : une tête de câble a une hauteur égale à 2 m avec 448 parasurtenseurs, nécessite 4 heures de câblage et 2 heures de pose des parasurtenseurs.

De manière à calculer la dose annuelle, ce scénario est décomposé selon les situations suivantes :

- dans le magasin : l'opérateur passe 5 minutes dans le magasin pour prendre les 896 parasurtenseurs dont il a besoin pour une tête de câble. Pendant ce temps, il est considéré se trouver en moyenne à une distance égale à 30 cm du stockage des parasurtenseurs ;
- entre le magasin et la tête de câble : l'opérateur prend 5 minutes pour porter les parasurtenseurs du magasin à la tête de câble ;
- sur la tête de câble : pendant qu'il câble une tête de câble, l'opérateur est exposé aux parasurtenseurs des têtes de câble précédemment montées (opération dite de câblage). Pendant qu'il pose les parasurtenseurs d'une tête de câble (opération dite de pose), l'opérateur est supposé avoir déposé les parasurtenseurs correspondants dans une boîte, celle-ci se trouvant en moyenne à 50 cm de lui ; de plus, il est fait l'hypothèse que l'opérateur détient 50 parasurtenseurs en permanence dans une poche poitrine pendant tout le temps de pose des parasurtenseurs. L'opérateur est considéré se tenir en moyenne à 10 cm des têtes de câble pendant qu'il effectue un câblage et à 30 cm en moyenne quand il pose les parasurtenseurs.

Les doses annuelles calculées sont présentées dans le tableau III.

Tableau III : Scénario d'installation de répartiteurs - Doses (mSv.an⁻¹)

Situations d'exposition	Grands répartiteurs				Petits répartiteurs			
	Efficace	Peau			Efficace	Peau		
		Général	Sein	Main		Général	Sein	Main
Dans le magasin	0,001	0,002	0,002	0,002	0,001	0,002	0,002	0,002
Du magasin aux têtes de câble	0,000	0,001	0,054	0,054	0,000	0,001	0,027	0,027
Câblage des têtes de câble	0,008	0,009	0,009	0,009	0,004	0,004	0,004	0,004
Pose des parasurtenseurs	0,000	0,000	0,000	3,565	0,000	0,000	0,000	1,782
Parasurtenseurs dans la poche	0,000	0,004	0,146	0,004	0,000	0,002	0,073	0,002
Parasurtenseurs dans la boîte	0,002	0,003	0,003	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001
Total	0,01	0,02	0,21	3,64	0,01	0,01	0,11	1,82

Les valeurs du tableau III montrent que, lors de l'installation des répartiteurs, l'essentiel de la dose efficace provient du montage des têtes de câble, tandis que la dose aux mains provient essentiellement des opérations de pose des parasurtenseurs sur les têtes de câble, au cours de ce montage. Par ailleurs, la dose à la peau au niveau des seins est due essentiellement aux parasurtenseurs dans la poche.

4.1.3 LE SCENARIO N° 2

Dans ce scénario, l'opérateur installe des boîtiers RPF ou RPC avec 224 parasurtenseurs par boîtier. Son travail se décompose en des opérations de câblage du boîtier et de pose des parasurtenseurs. Le câblage d'un boîtier nécessite 3 heures, tandis que la pose des 224 parasurtenseurs du boîtier nécessite 1 heure. L'opérateur installe 2 boîtiers par jour.

De manière à calculer la dose annuelle, ce scénario est décomposé selon les situations suivantes :

- pour approvisionner le coffre du véhicule : chaque semaine, l'opérateur fait 5 allers-retours entre le coffre de son véhicule et le magasin pour approvisionner à chaque fois l'équivalent de 2 boîtiers. Chaque aller-retour dure 5 minutes et nécessite également 5 minutes dans le magasin (durée pendant laquelle l'opérateur se trouve en moyenne à une distance égale à 30 cm du stockage des parasurtenseurs) ;
- les trajets : l'opérateur se déplace avec son véhicule, de boîtiers en boîtiers, avec les parasurtenseurs dans son coffre (soit 2240 parasurtenseurs). Il est retenu une heure de trajet par jour et une distance de 50 cm entre les parasurtenseurs et l'opérateur au volant du véhicule (distance possible d'un véhicule de type utilitaire) ;
- sur chaque boîtier : l'opérateur prend environ 3 heures pour câbler un boîtier et 1 heure pour poser les parasurtenseurs. Pendant le temps de câblage, les parasurtenseurs sont supposés à une distance moyenne de l'opérateur égale à 1 m (les parasurtenseurs étant supposés laissés dans le coffre pendant le câblage). Pendant la pose des parasurtenseurs, l'opérateur est supposé à une distance moyenne de 30 cm des parasurtenseurs. De plus, l'opérateur est supposé avoir 50 parasurtenseurs en permanence dans une poche poitrine pendant tout le temps de pose des parasurtenseurs.

Les doses annuelles calculées sont présentées dans le tableau IV.

Tableau IV : Scénario d'installation des boîtiers RPF ou RPC - Doses (mSv.an⁻¹)

Situations d'exposition	Efficace	Peau		
		Général	Sein	Main
Dans le magasin	0,034	0,043	0,043	0,043
Du magasin au coffre	0,002	0,017	0,551	0,551
Montage des boîtiers RPF ou RPC	0,067	0,085	0,085	0,085
Pose des parasurtenseurs	0,000	0,000	0,000	37,146
Parasurtenseurs dans la poche	0,004	0,046	1,477	0,046
Pendant les trajets	0,033	0,041	0,041	0,041
Total	0,14	0,23	2,20	37,91

Les valeurs du tableau IV montrent que, lors de l'installation des boîtiers RPF ou RPC, la dose efficace provient non seulement des opérations de montage des boîtiers, mais aussi de l'exposition dans le magasin et aux sources dans le coffre du véhicule pendant les trajets ; par contre, toute la dose aux mains provient des opérations de pose des parasurtenseurs dans les boîtiers. De même que pour le scénario 1, la dose à la peau au niveau du sein est due essentiellement aux parasurtenseurs dans la poche.

4.1.4 LE SCENARIO N° 3

Dans ce scénario, l'opérateur est affecté à l'exploitation et la maintenance d'un répartiteur d'abonnés. Il est amené à s'approcher des têtes de câble soit pour les mouvements de jarretières, soit pour le remplacement de parasurtenseurs.

Les remplacements de parasurtenseurs ont principalement lieu lors d'évènements météorologiques de type orage. Il est retenu de manière forfaitaire 10 évènements par an, nécessitant à chaque fois le remplacement de 50 parasurtenseurs.

De manière à calculer la dose annuelle, ce scénario est décomposé selon les situations suivantes :

- dans le magasin :
 - le jour de chaque évènement de type orage – dont le nombre est estimé à 10 par an et nécessitant le remplacement de 50 parasurtenseurs – l'opérateur prend 50 parasurtenseurs dans le magasin qu'il dépose dans sa poche poitrine, opération qui lui prend environ 5 minutes. Pendant ce temps, il se trouve en moyenne à une distance égale à 30 cm du stockage des parasurtenseurs ;
 - par ailleurs et pour d'autres raisons d'exploitation du répartiteur d'abonnés, l'opérateur passe deux heures par jour dans le magasin, à une distance moyenne supposée égale à 50 cm du stockage des parasurtenseurs ;

- devant les têtes de câble :
 - l'opérateur procède aux mouvements de jarretières, à raison de 50 mouvements par jour dans un grand répartiteur d'abonnés et 1 par jour dans un petit répartiteur d'abonnés. Chaque mouvement de jarretière dure 2 minutes environ, opération au cours de laquelle l'opérateur est supposé se tenir à une distance moyenne égale à 30 cm des parasurtenseurs (les jarretières sont de l'autre côté de la tête de câble par rapport aux parasurtenseurs) ;
 - l'opérateur procède au remplacement des parasurtenseurs défectueux les jours d'évènements le nécessitant ; la recherche d'un parasurtenseur défectueux est estimée à 15 secondes, de même pour son remplacement. Toute la journée correspondante, l'opérateur est supposé avoir 50 parasurtenseurs dans sa poche poitrine en permanence, configuration qui couvre le fait qu'un parasurtenseur défectueux vient remplacer un parasurtenseur neuf.

Les doses annuelles calculées sont présentées dans le tableau V.

Tableau V : Scénario d'exploitation des répartiteurs - Doses (mSv.an⁻¹)

Situations d'exposition	Grands répartiteurs				Petits répartiteurs			
	Efficace	Peau			Efficace	Peau		
		Général	Sein	Main		Général	Sein	Main
Dans le magasin	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Du magasin aux têtes de câble	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Mouvements de jarretières	0,004	0,005	0,005	0,011	0,000	0,000	0,000	0,000
Recherche des parasurtenseurs	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Remplacement des parasurtenseurs	0,000	0,000	0,000	0,010	0,000	0,000	0,000	0,010
Parasurtenseurs dans la poche	0,000	0,000	0,015	0,000	0,000	0,000	0,015	0,000
Dans le magasin (autres)	0,015	0,018	0,018	0,018	0,015	0,018	0,018	0,018
Total	0,02	0,02	0,04	0,04	0,01	0,02	0,03	0,03

Les valeurs du tableau V montrent que, lors de l'exploitation des répartiteurs, la quasi-totalité des doses est reçue dans le magasin.

4.1.5 LE SCENARIO N° 4

Dans ce scénario, l'opérateur est affecté à l'entretien et la maintenance des boîtiers RPF et RPC.

De manière à calculer la dose annuelle, ce scénario est décomposé selon les situations suivantes :

- dans le magasin : chaque semaine, l'opérateur approvisionne le coffre de son véhicule de 100 parasurtenseurs qu'il prend dans le magasin. Cet approvisionnement nécessite de passer 5 minutes dans le magasin ; pendant ce temps, l'opérateur se trouve en moyenne à une distance égale à 30 cm du stockage des parasurtenseurs ;
- entre le magasin et le coffre du véhicule : chaque semaine l'opérateur fait un trajet qui dure 5 minutes pour porter 100 parasurtenseurs depuis le magasin jusqu'au coffre de son véhicule ;

- les trajets : l'opérateur se déplace avec son véhicule de boîtiers en boîtiers avec 100 parasurtenseurs en permanence dans son coffre. Il est retenu 2 heures de trajet par jour et une distance de 50 cm entre les parasurtenseurs et l'opérateur au volant du véhicule ;
- devant les boîtiers RPF ou RPC : l'opérateur est supposé se trouver l'équivalent de 6 heures par jour environ devant des boîtiers pour des opérations générales d'entretien, à une distance moyenne des parasurtenseurs égale à 30 cm ; il a été retenu que 5 parasurtenseurs étaient changés par boîtier entretenu, avec une durée estimée à 15 secondes pour chacun d'eux;
- durant son temps de travail hors trajet, l'opérateur est supposé avoir 50 parasurtenseurs dans sa poche poitrine.

Les doses annuelles calculées sont présentées dans le tableau VI.

Tableau VI : Scénario d'entretien et maintenance des boîtiers RPF ou RPC - Doses (mSv.an⁻¹)

Situations d'exposition	Efficace	Peau		
		Général	Sein	Main
Dans le magasin	0,007	0,009	0,009	0,009
Du magasin au coffre	0,000	0,001	0,025	0,025
Entretien des boîtiers	0,055	0,069	0,069	0,619
Remplacement des parasurtenseurs	0,000	0,000	0,000	0,415
Parasurtenseurs dans la poche	0,012	0,138	4,432	0,138
Pendant les trajets	0,003	0,004	0,004	0,004
Total	0,08	0,22	4,54	1,21

Les valeurs du tableau VI montrent que la dose efficace est due majoritairement à l'entretien des boîtiers, tandis que la dose à la peau provient des parasurtenseurs dans la poche et de leur manipulation, mais aussi de la simple présence au voisinage des boîtiers (opérations d'entretien sans remplacement de parasurtenseur).

4.1.6 LE SCENARIO N° 5

Dans ce scénario, l'opérateur est affecté à la dépose des parasurtenseurs des répartiteurs d'abonnés, à raison de 4 têtes de câble remplacées par semaine.

De manière à calculer la dose annuelle, ce scénario est décomposé selon les situations suivantes devant les têtes de câble :

- 8 heures sont nécessaires à l'opérateur pour remplacer une tête de câble dans un grand répartiteur d'abonnés (4 heures pour déposer les parasurtenseurs radioactifs et 4 heures pour poser les parasurtenseurs non radioactifs), et la moitié pour un petit répartiteur. La distance moyenne entre l'opérateur et les parasurtenseurs de la tête de câble est égale à 30 cm, à l'exception des mains, supposées à 10 cm en moyenne de la tête de câble la plus proche ;

- durant tout son temps de travail, l'opérateur dépose les parasurtenseurs radioactifs dans une boîte située à 50 cm de lui ; il remplace la boîte à chaque tête de câble. Chaque boîte, une fois remplie, est versée dans un conteneur approprié pour ne plus générer d'exposition.

Dans ce scénario, l'opérateur ne met pas de parasurtenseurs dans ses poches. Il n'y a pas de stockage de parasurtenseurs radioactifs dans le magasin ; le conteneur recevant les parasurtenseurs radioactifs est supposé stocké dans un local approprié, non fréquenté autrement que pour y apporter les parasurtenseurs radioactifs.

Les doses annuelles calculées sont présentées dans le tableau VII.

Tableau VII : Scénario de dépose des parasurtenseurs des répartiteurs - Doses (mSv.an⁻¹)

Situations d'exposition	Grands répartiteurs				Petits répartiteurs			
	Efficace	Peau			Efficace	Peau		
		Général	Sein	Main		Général	Sein	Main
Présence près des têtes de câble	0,017	0,021	0,021	0,041	0,003	0,004	0,004	0,008
Dépose des parasurtenseurs	0,000	0,000	0,000	3,565	0,000	0,000	0,000	1,782
Parasurtenseurs dans la boîte	0,004	0,005	0,005	0,005	0,001	0,001	0,001	0,001
Total	0,02	0,03	0,03	3,61	0,00	0,01	0,01	1,79

Les valeurs du tableau VII montrent que l'essentiel de la dose efficace et la totalité de la dose à la peau sont dus à la simple présence à proximité des têtes de câble ; tandis que la quasi-totalité de la dose à la peau des mains est due aux opérations de dépose manuelle des parasurtenseurs.

4.1.7 LE SCENARIO N° 6

Dans ce scénario, l'opérateur est affecté à la dépose des parasurtenseurs des boîtiers RPF ou RPC.

De manière à calculer la dose annuelle, ce scénario est décomposé selon les situations suivantes devant les boîtiers :

- 1,5 heure est nécessaire à l'opérateur pour remplacer les parasurtenseurs d'un boîtier (1 heure de dépose des parasurtenseurs radioactifs et 0,5 heure de pose des parasurtenseurs non radioactifs). La distance moyenne entre l'opérateur et les parasurtenseurs du boîtier est égale à 30 cm, à l'exception des mains, supposées à 10 cm en moyenne des parasurtenseurs du boîtier ;
- l'opérateur dépose les parasurtenseurs radioactifs dans une boîte située à 50 cm de lui. Une fois tous les parasurtenseurs remplacés, la boîte est versée dans un conteneur approprié pour ne plus générer d'exposition.

Compte tenu des temps de trajet de l'opérateur, il est retenu de traiter 4 boîtiers RPF ou RPC par jour.

Dans ce scénario, l'opérateur ne met pas de parasurtenseurs dans ses poches. Il n'y a pas de stockage de parasurtenseurs radioactifs dans le magasin ; le conteneur recevant les parasurtenseurs radioactifs est supposé stocké dans un local approprié, non fréquenté autrement que pour y apporter les parasurtenseurs radioactifs.

Les doses annuelles calculées sont présentées dans le tableau VIII.

Tableau VIII : Scénario de dépose des parasurtenseurs des boîtiers RPF ou RPC - Doses (mSv.an⁻¹)

Situations d'exposition	Efficace	Peau		
		Général	Sein	Main
Présence près des boîtiers	0,055	0,069	0,069	0,619
Dépose des parasurtenseurs	0,000	0,000	0,000	74,292
Parasurtenseurs dans la boîte	0,020	0,025	0,025	0,025
Total	0,07	0,09	0,09	74,94

Dans le tableau VIII, la valeur de la dose à la peau des mains relativement élevée appelle une attention particulière, indépendamment du caractère enveloppe des paramètres retenus pour la calculer (en effet, cette valeur ne postule aucune protection autre que 0,2 mm de verre). Le calcul à l'aide du code MCNP réalisé à cet effet montre que près de 98 % de la dose délivrée à la peau est due aux rayonnements β . Il s'ensuit que l'emploi de gants appropriés lors des opérations de reprise des parasurtenseurs, permettant de protéger efficacement la peau des rayonnements β émis par les objets manipulés, réduirait cette dose d'un facteur 50 environ.

Les valeurs du tableau VIII montrent que l'essentiel de la dose efficace et de la dose à la peau provient de la simple présence à proximité des boîtiers ; tandis que la quasi-totalité de la dose à la peau des mains est due aux opérations de dépose manuelle des parasurtenseurs.

4.1.8 LE CAS PARTICULIER DU PARASURTENSEUR A LA BOUCHE

Lors des opérations de mise en place ou de remplacement des parasurtenseurs, l'opérateur peut porter un parasurtenseur à la bouche. Le débit de dose délivré à la lèvre est estimé en supposant que le contact du parasurtenseur avec le tissu de la lèvre est total.

Un calcul avec le code MCNP a été réalisé conduisant à un débit de dose local à la lèvre de $5 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ dans le cas d'un parasurtenseur de répartiteur et $83 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ dans le cas d'un parasurtenseur de boîtier RPF ou RPC.

La dose annuelle locale à la lèvre n'est pas calculée, car il est difficile de chiffrer aussi bien la part des parasurtenseurs manipulés qu'un opérateur est susceptible de porter à sa bouche, que le temps moyen de séjour d'un parasurtenseur entre les lèvres de l'opérateur. A titre d'exemple uniquement, en postulant que la part en question serait de un sur dix et que le temps de séjour serait de 5 secondes, la dose annuelle à la lèvre serait de 1 mSv environ pour le cas des parasurtenseurs de boîtiers RPF ou RPC.

4.1.9 LA DOSE AU SEIN

La faible distance entre la source de rayonnement, quand elle est localisée dans une poche poitrine, et le sein justifie de réaliser un calcul de dose à cet organe, de manière à en apprécier l'exposition.

Un calcul réalisé avec le code MCNP pour une source représentant 50 parasurtenseurs (4 mm de diamètre, 15 mm de longueur, avec une enveloppe de 0,2 mm de verre) dans la poche poitrine, en considérant une épaisseur de

3 mm de coton entre la source et la peau du corps de l'opérateur, conduit à une dose annuelle maximale (dans le cas du scénario 4) au sein égale à 1,4 mSv.

4.1.10 LA DOSE AU FOETUS

Le débit de dose au fœtus a été calculé en considérant 50 parasurtenseurs (boîtier RPF ou RPC – cas pénalisant) localisés dans la poche basse d'une blouse. Il est de $3 \cdot 10^{-5}$ mSv.h⁻¹ pour un fœtus de 3 mois et de $2 \cdot 10^{-5}$ mSv.h⁻¹ pour un fœtus de 6 mois. De tels débits de dose sont très faibles ; ils se situent dans l'ordre de grandeur des fluctuations du débit de dose dû aux sources de rayonnement naturel. En admettant qu'une opératrice travaille 1 200 heures dans ces conditions pendant sa grossesse, la dose totale délivrée au fœtus est inférieure à 0,04 mSv.

4.2 L'EXPOSITION INTERNE

4.2.1 L'INHALATION ET L'INGESTION

D'une manière générale, l'exposition interne d'une personne due à une substance radioactive résulte de son incorporation, soit par inhalation, soit par ingestion. De manière exceptionnelle, une contamination peut se produire lors d'une blessure, la substance pénétrant dans l'organisme à travers la brèche créée dans la peau. Bien que ce dernier risque ne puisse être totalement exclu dans le cas présent, aucune modélisation simple ne peut être envisagée *a priori* ; ce scénario ne sera pas pris en compte dans la discussion qui suit.

La quantification des niveaux d'activité susceptibles d'être incorporés, que ce soit par inhalation ou par ingestion, nécessite de construire des scénarios, ce qui est une tâche très difficile en l'absence de données précises et donc empreinte de grandes incertitudes. Les estimations ci-après ne visent qu'à fournir quelques ordres de grandeur des doses et évaluer au mieux quel est le niveau de risque.

Les seules informations dont dispose l'IRSN en ce qui concerne la contamination externe éventuelle de parasurtenseurs sont les mesures par frottis réalisées par la CRIIRAD [9]. En l'occurrence, ces mesures n'ont révélé aucune contamination détectable. En revanche, des mesures effectuées à l'intérieur d'un boîtier RPF ont révélé des traces de contamination, ce qui atteste que les parasurtenseurs peuvent eux-mêmes être contaminés.

Risque d'inhalation :

Un objet étant contaminé en externe, l'incorporation par inhalation suppose une remise en suspension dans l'air de particules issues de cette contamination radioactive, suivie de l'inhalation proprement dite. Le taux de remise en suspension dépend de nombreux facteurs (nature de la contamination, caractéristiques du support, conditions aérodynamiques...). Par ailleurs, sauf cas exceptionnel, la probabilité que ces particules, une fois dans l'air, atteignent en totalité la sphère respiratoire n'est pas égale à 100 %. L'expérience conduit à envisager que nettement moins de 10 % des particules présentes à la surface d'un parasurtenseur contaminé et manipulé par un individu peut être inhalé. En considérant l'activité moyenne d'un parasurtenseur au radium, soit 135 Bq, et en admettant que 10 % de cette activité soit sortie de son enveloppe, on estime donc à moins de 1,35 Bq l'activité de radium (supposé à

l'équilibre avec ses descendants) susceptible d'être incorporée par inhalation lors d'une manipulation. La dose efficace annuelle associée à ce scénario serait alors de 10,8 μSv .

Le bris d'un parasurtenseur est un autre cas pouvant conduire à une remise en suspension de particules radioactives dans l'air suivie de leur inhalation. Là encore, la fraction d'activité ayant une « chance » d'être inhalée dans ces circonstances n'est vraisemblablement pas supérieure à quelques % et la dose efficace annuelle associée serait au plus de quelques dizaines de μSv .

Risque d'ingestion :

Le risque principal correspond au cas d'un parasurtenseur contaminé en surface qui est mis à la bouche, une fraction de la contamination étant alors susceptible d'être ingérée. Là encore, il est difficile de quantifier avec certitude cette fraction, celle-ci pouvant dépendre de plusieurs facteurs liés en particulier à la nature plus ou moins labile de la contamination et du temps de séjour dans la bouche. Il apparaît cependant peu vraisemblable que cela concerne davantage que quelques % de l'activité totale du parasurtenseur. Dans cette hypothèse, la dose efficace annuelle est estimée de l'ordre de quelques μSv .

Enfin, un autre risque possible est qu'un parasurtenseur soit contaminé, et que l'opérateur l'ayant manipulé porte ensuite ses mains à sa bouche. De nouveau, seule une petite fraction est susceptible d'être ingérée dans ces circonstances, ce qui ne devrait pas conduire à dépasser des doses efficaces sur l'année de quelques μSv .

4.2.2 LE RADON

Le radium 226 présent dans les parasurtenseurs se désintègre en donnant du radon 222, gaz radioactif susceptible d'être inhalé avec ses descendants s'il parvient à se disperser dans l'atmosphère. Cette dispersion dans l'atmosphère peut *a priori* se produire dans deux situations :

1^{ère} situation : le parasurtenseur est supposé parfaitement étanche ; le seul risque est que celui-ci soit cassé et libère alors le radon qui s'y est accumulé. L'activité de radon maximale dans le parasurtenseur au moment où il se casse est celle correspondant à l'équilibre radioactif du radon 222 avec le radium 226. Compte tenu de leur période radioactive respective, cet état d'équilibre est atteint au bout d'un temps égal à environ 7 fois la période du radon 222, soit environ 1 mois.

Un parasurtenseur contenant une activité moyenne estimée de 135 Bq⁴ de radium 226, l'activité de radon 222 à l'équilibre dans ce parasurtenseur est également de 135 Bq. Quand celui-ci est cassé, il s'échappe 135 Bq de radon 222 dans l'atmosphère ; à noter que cette hypothèse est majorante⁵. Le radon se dilue alors dans l'air de la pièce, ceci d'autant plus que celle-ci est grande. Si par exemple la pièce est un tout petit local de 5 m² avec une hauteur de plafond de 2,5 m, soit 12,5 m³ de volume, l'activité volumique de l'air en radon correspondant au rejet accidentel est alors de 135/12,5 soit 11 Bq/m³, ceci à supposer que le local n'est pas du tout ventilé. En supposant

⁴ Valeur moyenne de l'activité pour les parasurtenseurs au radium 226.

⁵ Le document [1] rapporte une expérience au cours de laquelle il a été mesuré une activité volumique de 30 000 Bq/m³ pour 4 parasurtenseurs de 3 000 Bq cassés dans une enceinte de 25 dm³. Cela correspond dans ce cas à un rejet de $30\,000 \times 25 \cdot 10^{-3} / 4$ soit 187 Bq par parasurtenseur de 3 000 Bq. Ceci indique que le radon ne s'échappe pas en totalité de manière instantanée.

le local normalement ventilé ($\sim 1 \text{ h}^{-1}$), l'activité volumique dans la pièce n'est plus que de $4 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ au bout de 1 heure et $1,5 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ au bout de 2 heures.

Ce niveau d'activité volumique est très faible, non détectable dans une ambiance habituelle où le radon est présent à des niveaux compris, selon l'heure et le lieu, entre quelques dizaines et, dans certains lieux, quelques centaines de Bq/m^3 .

Pour que l'activité volumique de radon 222 puisse augmenter de manière significative au-dessus de la valeur habituelle régnant dans un local, il faudrait que plusieurs dizaines, voire centaines, de parasurtenseurs se cassent au même moment dans ce local. Et encore, dans un local correctement ventilé, l'activité volumique diminuerait rapidement et le risque d'exposition serait de courte durée (cf. figure 2).

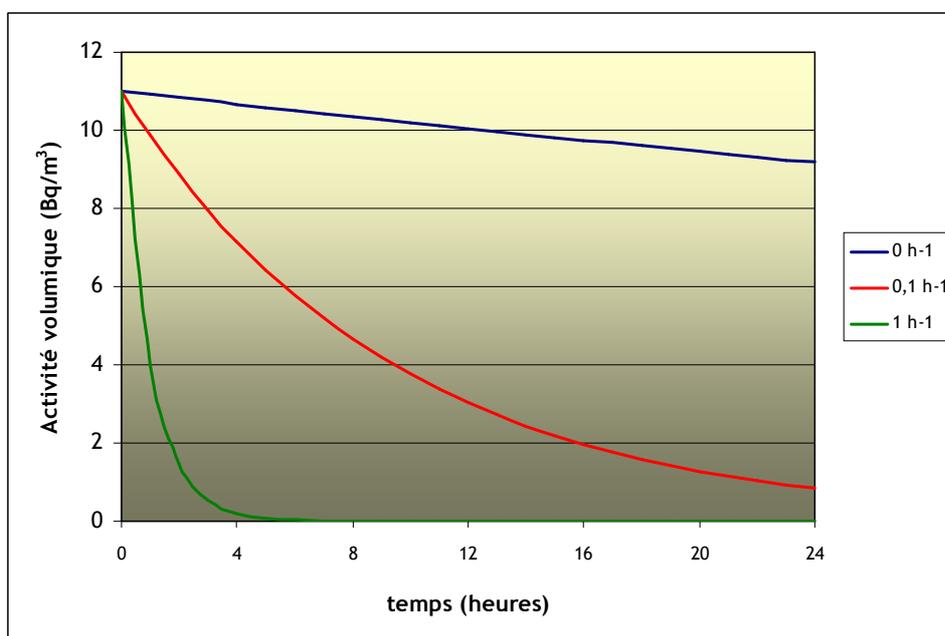


Figure 2 : Variation de l'activité volumique de radon 222 dans un local en fonction du taux de renouvellement d'air

2^{ème} situation : Le parasurtenseur est supposé ne pas être étanche. Une partie du radon produit au sein du parasurtenseur parvient à s'en échapper à mesure qu'il est produit.

C'est effectivement l'observation qui ressort de l'expérience rapportée par la CRIIRAD [9] : 9 lots (soit 210 parasurtenseurs) ont été placés avec un appareil de mesure en continu dans une enceinte fermée de $0,0466 \text{ m}^3$. En 5 heures, la concentration de radon est passée d'environ $50 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ à $250 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, soit un différentiel de $200 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ sur ce laps de temps. Le débit d'émanation est donc de $40 \text{ Bq}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$. Pour ces 210 parasurtenseurs, l'enrichissement en radon du volume de mesure est d'environ $1,8 \text{ Bq}\cdot\text{h}^{-1}$ (en prenant le volume de l'enceinte égal à $0,0466 \text{ m}^3$ mais qu'il faudrait corriger du volume pris par l'appareil de mesure et celui des parasurtenseurs). A supposer que tous ces parasurtenseurs soient stockés dans le petit local de $12,5 \text{ m}^3$ précédent, et que celui-ci soit très confiné (par exemple, avec un taux de renouvellement d'air de $0,1 \text{ h}^{-1}$), la contribution de ces parasurtenseurs à l'activité volumique du radon dans la pièce serait de $1,5 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$.

Là encore, cette activité volumique est très faible par rapport au niveau naturel ; elle ne pourrait devenir significative que dans l'hypothèse où le nombre de parasurtenseurs au radium stockés dans ces conditions serait de plusieurs milliers.

4.2.3 LE TRITIUM

Des mesures qualitatives effectuées par la CRIIRAD mettent en évidence que du tritium peut s'échapper de parasurtenseurs contenant ce radionucléide. Les données issues de ces mesures montrent que le taux de fuite est faible mais elles ne permettent pas d'en déduire les quantités auxquelles pourraient être exposés les personnels par les différentes voies possibles (en pratique, inhalation essentiellement). Compte tenu des valeurs très basses des coefficients de dose du tritium, les doses susceptibles d'être reçues ne peuvent être que très faibles (à titre indicatif, l'inhalation sous forme d'eau tritiée de toute l'activité d'un parasurtenseur qui contiendrait 1 million de Bq de tritium conduirait à une dose efficace engagée de 18 μ Sv). Les circonstances susceptibles de conduire à des doses dues au tritium significatives apparaissent donc assez peu vraisemblables.

5 LE RISQUE

Dans le cadre de la démarche d'estimation des doses associées à la manipulation de parasurtenseurs radioactifs pour les travailleurs de France Télécom, il a été demandé de disposer d'éléments de contexte portant sur les connaissances actuelles sur les cancers radio-induits et sur les méthodes d'évaluation quantitative des risques sanitaires. Le chapitre qui suit fournit des éléments de réponse quant à ces différents points.

5.1 INTRODUCTION

5.1.1 CANCERS ET RAYONNEMENTS IONISANTS

L'exposition à de faibles doses de rayonnements ionisants peut entraîner un risque accru de développer un cancer [12] [13]. Le dernier rapport de l'United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) fait le point des connaissances sur les risques pour différents sites spécifiques de cancers [12]. Les données épidémiologiques qui font référence dans le domaine, à l'heure actuelle, portent sur les cohortes des survivants des bombardements atomiques de Hiroshima et Nagasaki ayant reçu des expositions modérées à fortes, ceci de façon unique. Des études épidémiologiques sont aussi menées sur les patients irradiés pour raison médicale, qui reçoivent en général de fortes doses fractionnées sur des périodes relativement courtes. Les effets des expositions chroniques à de faibles doses de rayonnements ionisants sont directement étudiés à partir des études épidémiologiques sur des populations exposées professionnellement, telles que les médecins radiologues et manipulateurs en radiologie, les travailleurs de l'industrie nucléaire et les personnels navigants (rayonnements cosmiques).

Le comité scientifique UNSCEAR [12] conclut que, pour certains cancers (cancers des glandes salivaires, de l'œsophage, de l'estomac, du colon, du foie, du poumon, des os et des tissus conjonctifs, du sein (femme), des ovaires, de la vessie, du cerveau et système nerveux central et de la thyroïde ainsi que le mélanome de la peau,

les cancers de la peau hors mélanome et les leucémies), il existe des éléments en faveur d'un lien avec l'exposition aux rayonnements ionisants. Pour d'autres cancers, une association n'a été observée qu'aux très fortes doses principalement dues aux traitements par radiothérapie (cancer de l'intestin grêle, rectum et rein). Enfin, le comité conclut qu'il y a peu de preuve que certains cancers (leucémies lymphoïdes chroniques, cancer du pancréas, cancer de la prostate, cancer des cervicales, cancer des testicules, cancer de l'utérus, lymphome non hodgkinien, maladies de Hodgkin et myélomes multiples) soient liés aux rayonnements ionisants.

5.1.2 L'EXPOSITION DES TRAVAILLEURS DE FRANCE TELECOM

Les personnels chargés de la maintenance du réseau téléphonique à France Télécom ont pu être exposés à de faibles ou très faibles doses⁶ de rayonnements ionisants dues à la présence de matière radioactive dans les parasurtenseurs [1]. Les risques qui en résultent pour ces personnels peuvent être appréciés à l'aune des doses potentiellement reçues. Plus précisément, l'indicateur de dose pertinent s'agissant d'une exposition globale de l'organisme et du risque 'tous cancers' est la *dose efficace*. En cas d'exposition localisée au niveau d'un tissu ou d'un organe donné, l'indicateur pertinent est la *dose équivalente* à ce tissu ou à cet organe. Ainsi, compte tenu des situations d'exposition retenues (cf. § 4), trois organes ou localisations en particulier ont été identifiés : le sein, la peau et la cavité buccale.

La première partie du travail réalisé par l'IRSN a consisté en une synthèse des connaissances épidémiologiques sur les risques radio-induits pour les différents organes identifiés. La deuxième partie du travail a été de recenser les différents modèles publiés dans la littérature scientifique et d'examiner dans quelle mesure ces modèles pouvaient être adaptés pour l'évaluation du risque chez les travailleurs de France Télécom.

5.2 SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES SUR LES RISQUES RADIO-INDUITS

5.2.1 LE CANCER DU SEIN

Les rayonnements ionisants sont un facteur de risque reconnu de cancer du sein chez la femme et, de plus, le sein semble être un tissu particulièrement radiosensible [12] [16]. Les premiers effets cancérigènes des rayonnements ionisants sur le sein ont été observés chez les patientes atteintes de tuberculose traitées par un pneumothorax et suivies par radioscopie de la cage thoracique [17]. De nombreux travaux ont été réalisés chez les femmes soignées par radiothérapie pour un cancer [16]. L'incidence de cancer du sein chez la femme parmi les survivantes des bombardements atomiques de Hiroshima et Nagasaki a été étudiée en détail et montre une augmentation linéaire significative du risque avec la dose d'irradiation, y compris pour des doses faibles (inférieures à 0,5 Sv) [18] [19]. Une analyse sur l'incidence du cancer du sein chez la femme a permis une quantification du risque à partir de grandes cohortes dont l'étude des survivantes des bombardements atomiques de Hiroshima et Nagasaki et d'autres études après exposition médicale dans des populations américaines et européennes [19]. Les doses moyennes au sein reçues par les individus dans ces études variaient de 0,25 à 5,8 Sv au sein [16] et étaient reçues de façon

⁶ Le domaine des faibles doses peut être considéré comme celui des doses inférieures à environ 100 mSv, et le domaine des très faibles doses celui des doses inférieures à environ 10 mSv.

unique ou fractionnée sur des périodes courtes. Les résultats ne montrent pas de différence sur les risques liés aux doses de rayonnements ionisants reçues de façon unique ou fractionnée [20].

Concernant les expositions chroniques à de faibles doses de rayonnements ionisants, plusieurs études sur des populations de techniciennes en radiologie ayant exercé principalement avant les années 1970, ont montré une augmentation du risque de cancer du sein avec la durée d'exercice [16] [21]. Aucune étude sur les travailleurs de l'industrie nucléaire n'a pu mettre en évidence une augmentation du risque de cancer du sein chez la femme avec la dose de rayonnements ionisants reçue [16]. Cependant, les études sur les travailleurs de l'industrie du nucléaire n'incluent généralement que peu de femmes et souvent avec des expositions très faibles. En particulier, la dernière étude du Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) sur des cohortes de travailleurs du nucléaire de 15 pays différents ne retrouvait pas d'association entre l'exposition aux rayonnements ionisants et le risque de cancer du sein chez environ 40 000 femmes exposées en moyenne à une dose de 4 mSv cumulée durant leur carrière professionnelle [16] [22]. Certaines études sur les personnels navigants des compagnies aériennes ont montré une augmentation du risque de cancer du sein avec la durée d'emploi [23]. Cependant, ce résultat pourrait être dû à la perturbation du rythme circadien pouvant jouer un rôle dans le développement hormono-dépendant de certains cancers, tels que le cancer du sein [23]. Les doses reçues par les personnels navigants sur l'ensemble de leur carrière sont généralement comprises entre 10 et 30 mSv, parfois plus élevées mais très rarement supérieures à 80 mSv [24].

Les travailleurs de France Télécom susceptibles d'avoir été exposés aux rayonnements ionisants sont principalement des hommes. Le cancer du sein chez les hommes est une maladie relativement peu fréquente dans le monde entier et, en général représente moins de 0,5% des cancers dans la population masculine et environ 1% de tous les cancers du sein [14]. En raison de la rareté du cancer du sein chez les hommes, l'étiologie de cette maladie n'est pas bien connue, mais certains facteurs de risque sont similaires à ceux observés pour le cancer du sein chez la femme - par exemple, les antécédents familiaux de cancer du sein [15]. Les effets des rayonnements ionisants sur le risque de cancer du sein chez l'homme ont beaucoup moins bien été étudiés en raison de la rareté de ce cancer [25]. L'étude d'incidence des cancers du sein chez les hommes dans la cohorte des survivants des bombardements atomiques de Hiroshima et Nagasaki suggère un lien entre l'exposition à l'irradiation externe et la survenue de cancer du sein chez l'homme. Cependant, en raison du nombre restreint de cas, la relation exposition-risque n'a pas pu être quantifiée précisément [25].

En conclusion, le cancer du sein est reconnu comme un cancer radio-induit, associé à une exposition aux rayonnements ionisants chez les femmes. En raison de la rareté du cancer du sein chez les hommes, l'étiologie de cette maladie chez ces derniers n'est pas bien connue et les effets des rayonnements ionisants ont été beaucoup moins étudiés. Cependant, les résultats disponibles à ce jour suggèrent un lien entre l'exposition externe aux rayonnements ionisants et le risque de cancer du sein chez les hommes.

5.2.2 LE CANCER DE LA PEAU

Lorsqu'on s'intéresse aux cancers de la peau, on distingue généralement deux types de tumeurs : les mélanomes et les carcinomes de la peau. Pour ces derniers, la tumeur débute dans les mélanocytes, les cellules pigmentaires de la peau. Les carcinomes de la peau se développent soit dans la couche basale et on parle de carcinomes baso-

cellulaires; soit à partir de cellules plus superficielles, et on parle alors de carcinomes spino-cellulaires (ou encore épidermoïdes).

Concernant les mélanomes, il n'y a à l'heure actuelle que peu de preuves que ce type de cancer soit inductible par les rayonnements ionisants [12]. Dans l'étude des survivants des bombardements atomiques de Hiroshima et Nagasaki, aucune association entre le risque de mélanome et l'exposition aux rayonnements ionisants n'a été observée [26]. Cependant, le nombre de cas de mélanomes diagnostiqués dans cette cohorte et ce, même après plusieurs décennies de suivi, reste limité. La plupart des études qui suggèrent un lien ont une dosimétrie peu adéquate et ne contrôlent pas correctement le principal facteur de risque reconnu pour les mélanomes qui est l'exposition aux rayonnements ultra-violet [12].

Le risque de cancer de la peau hors mélanome a été examiné en détail dans la cohorte des survivants des bombardements atomiques de Hiroshima et Nagasaki [19] [26] et les résultats montrent clairement une association entre l'exposition aux rayonnements ionisants et le risque de carcinomes baso-cellulaires. Les doses reçues à la peau étaient en moyenne de 330 mSv [12]. Un risque élevé de cancer de la peau hors mélanome, en particulier de carcinome baso-cellulaire, a été observé dans les études portant sur des patients ayant reçu des expositions à visées thérapeutique ou diagnostique [27] [28] [29] [30]. Ces associations ont été retrouvées le plus fréquemment chez des personnes exposées à des doses de rayonnement relativement élevées dans l'enfance. Le risque de cancer de la peau hors mélanome a été étudié chez les médecins radiologues et manipulateurs en radiologie : plusieurs études ont montré un excès de cancer de la peau hors mélanome dans les premières années de pratique, en particulier dans l'étude des radiologues américains et chez les travailleurs du secteur médical Chinois exposés aux rayons-X [31].

En revanche, il existe peu de preuves d'une association entre les carcinomes spino-cellulaires et les rayonnements ionisants à faibles doses [19].

En conclusion, il n'y a que peu de preuves que le mélanome de la peau puisse être induit par les rayonnements ionisants. Au contraire, les résultats des études épidémiologiques sont en faveur de l'existence d'un effet des rayonnements ionisants sur le risque de carcinomes baso-cellulaires. Cependant, l'exposition aux rayonnements ultra-violet (UV) qui est le principal facteur de risque pour ces cancers peut biaiser l'estimation de la relation dose-réponse.

5.2.3 LES CANCERS DE LA CAVITE BUCCALE ET DU PHARYNX

Les cancers de la cavité buccale et du pharynx constituent un groupe hétérogène de tumeurs malignes (tumeur maligne des lèvres, de la langue, des glandes salivaires...). Les effets des rayonnements ionisants sur les cancers de la cavité buccale et du pharynx ne sont pas bien connus. Seules les tumeurs des glandes salivaires ont été étudiées dans le dernier rapport de l'UNSCEAR [12].

Les éléments disponibles à ce jour montrent que les cancers des glandes salivaires pourraient être induits par les rayonnements ionisants [12]. Les effets des rayonnements ionisants sur ce type de cancer ont été étudiés en détail chez les survivants des bombardements atomiques de Hiroshima et Nagasaki [19] [32] [33]. En particulier, ces travaux ont fourni des indications précieuses sur la relation entre les rayonnements ionisants et le type histologique [32] [33], et ont montré une relation dose-réponse forte pour le cancer muco-épidermoïde des

glandes salivaires. Un certain nombre d'études anciennes, basées pour la plupart sur de faibles effectifs, suggèrent une association entre les tumeurs des glandes salivaires et les irradiations reçues pour des raisons médicales à un âge jeune [34] [35] [36] [37]. Les résultats des études sur les populations ayant été exposées professionnellement sont divergents; certaines études retrouvant un excès de tumeurs des glandes salivaires [38] [39] [40] et d'autres non [41] [42] [43].

Concernant les autres cancers de la cavité buccale et du pharynx, peu de données sont disponibles dans la littérature scientifique. La dernière étude d'incidence sur la cohorte des survivants des bombardements atomiques de Hiroshima et Nagasaki a montré une association significative entre les cancers de la cavité buccale et du pharynx et la dose de rayonnements ionisants reçue [19]. Cependant, l'association n'était pas significative pour les cancers de la cavité buccale et du pharynx hors tumeurs des glandes salivaires.

Certaines études ont montré que le risque de second cancer de la cavité buccale était plus élevé chez les patients traités par radiothérapie pour un premier cancer de la tête ou du cou que chez ceux traités par chirurgie [44].

La plupart des études sur des populations exposées professionnellement ne retrouvent pas d'association entre le risque de cancer de la cavité buccale et du pharynx et l'exposition aux rayonnements ionisants [22] [45] [46] [47] [48]. L'étiologie des cancers de la cavité buccale et du pharynx varie sensiblement. Cependant, le tabac et l'alcool sont les principaux facteurs de risque pour la plupart de ces tumeurs [49].

En conclusion, sur l'ensemble des tumeurs de la cavité buccale et du pharynx, seules les tumeurs des glandes salivaires semblent être inductibles par les rayonnements ionisants, principalement pour des doses élevées. Très peu de données existent, à l'heure actuelle, sur les autres cancers de la cavité buccale et du pharynx. Pour ces derniers, il n'y a que peu ou pas de preuve qu'ils puissent être induits par les rayonnements ionisants.

5.3 DEMARCHE D'EVALUATION QUANTITATIVE DU RISQUE DE CANCER RADIO-INDUIT

La démarche d'évaluation quantitative du risque permet de calculer l'excès de risque induit pour une exposition aux rayonnements ionisants et éventuellement d'estimer le nombre de cas attribuable à la dose reçue dans une population donnée. L'intérêt de cette démarche est qu'elle fournit une estimation du risque plus facilement compréhensible par les non spécialistes par rapport aux résultats exprimés en termes de dose.

L'évaluation quantitative du risque nécessite de disposer de :

- scénarios d'exposition et des estimations de dose associées ;
- modèles de calcul de risque pour le cancer correspondant à l'organe considéré ;
- données d'incidence de base dans la population considérée.

La première étape de la démarche d'évaluation quantitative du risque a été réalisée par l'IRSN et est présentée au chapitre 4.

Plusieurs modèles de risque sont proposés par différents comités scientifiques internationaux, en particulier, pour tous les cancers solides, pour les leucémies et pour certains sites de cancers. [12] [13] [49]. En particulier des

modèles de risque sont disponibles pour le cancer du sein chez la femme [13] [20] et pour le cancer de la peau hors mélanome [12]. Aucun modèle de risque n'existe pour les mélanomes et les cancers de la cavité buccale [12] [13].

Des données d'incidence de base pour les cancers solides sont disponibles à partir des données publiées pour la population française sur l'année 2000 [50] pour les hommes et pour les femmes. Des données d'incidence du cancer du sein chez la femme sont aussi disponibles [50]. Ces données sont plus difficiles à obtenir dans le cas du cancer du sein chez l'homme qui est un cancer très rare en France et dans le cas des cancers de la peau hors mélanome qui ne sont pas enregistrés de manière exhaustive en France [50].

L'utilisation de ces modèles de risque pour estimer un risque sur la vie entière dû à une exposition professionnelle à des faibles et *a fortiori* très faibles doses comporte des incertitudes. En effet, la plupart des modèles de risque publiés dans la littérature sont fondés sur les études des survivants des bombardements de Hiroshima et Nagasaki, dont il faut rappeler qu'ils ont été exposés de façon unique alors que les travailleurs ont été potentiellement exposés de façon chronique. La transposition de ces modèles à d'autres populations repose sur des hypothèses.

L'extrapolation de ces modèles de risque aux faibles doses et faibles débits de dose est discutable. Bien que la majorité (64%) des individus de la cohorte des survivants des bombardements atomiques de Hiroshima et Nagasaki ont été exposés à des doses de rayonnements relativement faibles (0,5 mSv à 10 mSv), les survivants ayant été exposés à plus de 500 mSv sont ceux qui influencent le plus l'estimation du risque [13]. Les différents comités internationaux recommandent actuellement de réduire les estimateurs linéaires dérivés des études des survivants des bombardements atomiques de Hiroshima et Nagasaki par un facteur de 1,5 [12] ou de 2 [13] pour l'extrapolation de ces modèles à l'étude des effets des expositions chroniques à faibles doses de rayonnements ionisants.

La transposition des modèles de risque d'une population à une autre présente des incertitudes. En effet, les risques de base pour plusieurs sites de cancers peuvent être très différents pour la population française et la population japonaise. Par exemple, les risques de base du cancer de la prostate, du colon et du sein sont plus élevés en France.

La plupart des modèles de risque qui ont été élaborés basent leur estimation sur des modèles relatifs (Excès de Risque Relatif - ERR) et supposent donc que l'excès de risque dû aux radiations est proportionnel au risque de base de la population étudiée. L'utilisation d'un tel modèle pour la population française suppose que l'ERR estimé dans la population japonaise est le même dans la population française. L'application d'un modèle ERR à des populations ayant un risque de base très différent va aboutir pour une même dose à des estimations de nombre de cas attribuable très différentes.

L'autre type de modèle disponible dans la littérature est basé sur le calcul de l'Excès de Risque Absolu (EAR). Dans ce cas, l'excès de risque dû aux radiations ne dépend pas du risque de base mais seulement de la dose reçue. Ainsi, pour une même dose, l'EAR pour une population française serait le même que pour une population japonaise, même si les taux de base sont très différents.

Les résultats obtenus à partir de ces deux types de modèles (relatif et absolu) peuvent être sensiblement différents [12]. Suivant le cancer considéré, les connaissances disponibles pourront pousser à privilégier un modèle

plutôt qu'un autre. Pour la plupart des sites de cancer, en l'absence de données suffisamment solides, un mixte de ces 2 types de modèles est recommandé pour estimer les risques dans une autre population.

En conclusion, des modèles de risque existent qui permettraient d'estimer le nombre de cas de cancers attribuable aux doses estimées pour les travailleurs de France Télécom par l'IRSN. Ce résultat serait plus facilement compréhensible par les non spécialistes que les seules valeurs de doses efficaces et doses équivalentes calculées dans cette étude, même si ces grandeurs de protection constituent en elles-même des indicateurs de risque. Cependant, les estimations issues de tels modèles sont sujettes à de nombreuses incertitudes, d'autant plus grandes que les doses et les débits de dose en jeu sont très faibles. L'IRSN considère qu'il n'est pas justifié de procéder à une telle quantification du risque lorsque ces doses sont dans l'ordre de grandeur des fluctuations des doses dues aux sources de rayonnement naturel auxquelles tout homme est soumis.

6 CONCLUSION

D'après les calculs réalisés par l'IRSN sur la base de scénarios enveloppe d'exposition élaborés en concertation avec France Télécom, les doses efficaces reçues dans le passé par les opérateurs de France Télécom lors des opérations de montage ou d'exploitation des répartiteurs ou des boîtiers RPF ou RPC ne dépassent pas $0,14 \text{ mSv.an}^{-1}$. Aucun des scénarios envisagés vis-à-vis du risque d'exposition interne suite à des problèmes de contamination ou de bris des parasurtenseurs n'est davantage apparu susceptible de conduire à une dose efficace significative. Par contre, pour certaines opérations nécessitant la manipulation des parasurtenseurs, des doses plus élevées à la peau au niveau des mains ont été estimées – jusque 40 mSv.an^{-1} environ dans le cas du montage des boîtiers RPF ou RPC – sans toutefois atteindre la limite réglementaire (actuelle) de 50 mSv.an^{-1} fixée pour le public. La dose au sein associée à la détention de parasurtenseurs dans une poche poitrine a été estimée de l'ordre de 1 mSv.an^{-1} , tandis que la dose à la lèvre pour un opérateur tenant fréquemment des parasurtenseurs à la bouche est vraisemblablement inférieure 1 mSv.an^{-1} .

Ces doses sont faibles, et même très faibles, vis-à-vis du risque de cancers radio-induits. Elles peuvent être mises en perspective des valeurs maximales d'exposition fixées par la réglementation pour les personnes du public – 1 mSv.an^{-1} pour la dose efficace et 50 mSv.an^{-1} pour la dose à la peau – et du niveau moyen d'exposition des français aux sources naturelles de rayonnements – $2,4 \text{ mSv.an}^{-1}$ [51]. L'IRSN considère que des calculs de risques pour la santé associés à de tels niveaux de dose ne se justifient pas.

Une évaluation des doses susceptibles d'être reçues à l'avenir, lors de la reprise systématique des parasurtenseurs montre que :

- les doses efficaces seraient très faibles (de l'ordre de quelques centièmes de mSv.an^{-1}) sous réserve d'utiliser un conditionnement approprié des parasurtenseurs immédiatement après leur dépose ;
- les doses à la peau des mains, bien que localisées, seraient plus élevées et imposent l'usage de gants appropriés contre l'irradiation des rayonnements β pour être acceptables (de l'ordre du mSv).

Enfin, sans préjudice des recommandations plus complètes qu'il sera amené à formuler par ailleurs, dans le cadre du contrat d'assistance passé avec France Télécom pour la gestion du parc, l'IRSN souligne la nécessité de ventiler correctement les lieux où sont stockés des parasurtenseurs pour limiter le risque d'exposition interne.

REFERENCES

- [1] TORRES C, CRUSSIÈRE S, VERZIER A, Parasurtenseurs contenant du radium 226 - Rapport d'étude et ses annexes, France Télécom, Direction Régionale de Lyon, juin 2003
- [2] MURE J-M, Rapport - Optimisation du scénario de collecte des parafoudres, Rapport Hémisphères - 0102-514-RP-FT-3, janvier 2002
- [3] MURE J-M, Rapport - Documents de synthèse relatif aux parafoudres radioactifs, Rapport Hémisphères - 0702-573-RP-FT-4, juillet 2002
- [4] Lettre France Télécom du 15 avril 2009
- [5] Proposition d'étude relative au risque potentiel induit par les parasurtenseurs contenant des radioéléments, Lettre IRSN/DRPH 2009-71
- [6] France Télécom -IRSN : Exposition et risques liés aux activités de pose et de reprise des parasurtenseurs radioactifs. Enclenchement de la prestation, compte rendu de réunion du 11 septembre 2009, CR SER 2009-423, IRSN, septembre 2009
- [7] PAUGAM J, BOUGUENNEC M, Catalogue des parafoudres, Rapport RP/FTR&D/7118 - DRSA/DRA/TRA/PES/053, France télécom, février 2001
- [8] France Télécom - IRSN : Exposition et risques liés aux activités de pose et de reprise des parasurtenseurs radioactifs. Visite de terrain, Compte rendu de réunion, CR SER 2009-478, IRSN, 23 octobre 2009
- [9] CHAREYRON B, Analyses radiologiques de parasurtenseurs France TELECOM - Etude effectuée pour la CGT FAPT Cantal, Rapport CRIIRAD n°10-08, CRIIRAD, février 2010
- [10] Microshield Version 5, User's Manual, Grove Engineering, Octobre 1996
- [11] MCNP - A general Monte Carlo N-Particle Transport Code Version 4C, LA-13709-M, avril 2000
- [12] Effects of ionizing radiation : United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 2006 Report : Volume 1 - Report to the General Assembly, with Scientific Annexes A and B, New York, 2008
- [13] National Research Council Committee to Assess Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation, Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation : BEIR VII Phase 2, The National Academic Press, Washington, DC., 2006
- [14] PARKIN DM WS, FERLAY J, TEPPLO L, THOMAS DB, Cancer incidence in five continents, Lyon (France), International Agency for Research on Cancer, 2002
- [15] LEVI F, LUCCHINI F AND LA VECCHIA C, 2002, Epidemiology of male breast cancer, *Eur J Cancer Prev* 11 315-8
- [16] TELLE-LAMBERTON M, 2008, Epidemiologic data on radiation-induced breast cancer, *Rev Epidemiol Santé Publique* 56 235-43
- [17] MACKENZIE I, 1965, Breast Cancer Following Multiple Fluoroscopies, *Br J Cancer* 19 1-8
- [18] LAND CE, TOKUNAGA M, KOYAMA K, SODA M, PRESTON DL, NISHIMORI I AND TOKUOKA S, 2003, Incidence of female breast cancer among atomic bomb survivors, Hiroshima and Nagasaki, 1950-1990, *Radiat Res* 160 707-17
- [19] PRESTON DL, RON E, TOKUOKA S, FUNAMOTO S, NISHI N, SODA M, MABUCHI K AND KODAMA K, 2007, Solid cancer incidence in atomic bomb survivors : 1958-1998, *Radiat Res* 168 1-64
- [20] PRESTON DL, MATSSON A, HOLMBERG E, SHORE R, HILDRETH NG AND BOICE JD JR., 2002, Radiation effects on breast cancer risk: a pooled analysis of eight cohorts, *Radiat Res* 158 220-35
- [21] DOODY MM, FREEDMAN DM, ALEXANDER BH, HAUPTMANN M, MILLER JS, RAO RS, MABUCHI K, RON E, SIGURDSON AJ AND LINET MS, 2006, Breast cancer incidence in U.S., *Radiologic Technologists Cancer* 106 2707-15
- [22] CARDIS E, VRIJHEID M, BLETTNER M, GILBERT E, HAKAMA M, HILL C, HOWE G, KALDOR J, MUIRHEAD CR, SCHUBAUER-BERIGAN M, YOSHIMURA T, BERMAN F, COWPER G, FIX J, HACKER C, HEINMILLER B, MARSHALL M, THIERRY-CHEF I, UTTERBACK D, AHN YO, AMOROS E, ASHMORE P, AUVINEN A, BAE JM, BERNAR J, BIAU A, COMBALOT E, DEBOODT P, DIEZ SACRISTAN A, EKLOF M, ENGELS H, ENGHOLM G, GULIS G, HABIB RR, HOLAN K, HYVONEN H, KERÉKES A, KURTINAITIS J, MALKER H, MARTUZZI M, MASTAUSKAS A, MONNET A, MOSER M, PEARCE MS, RICHARDSON DB, RODRIGUEZ-ARTALEJO F, ROGEL A, TARDY H, TELLE-LAMBERTON M, TURAI I, USEL M AND VERESS K, 2007, The 15-Country Collaborative Study of Cancer Risk among Radiation Workers in the Nuclear Industry : estimates of radiation-related cancer risks, *Radiat Res* 167 396-416
- [23] HAMMER GP, BLETTNER M AND ZEEB H, 2009, Epidemiological studies of cancer in aircrew, *Radiat Prot Dosimetry* 136 232-9

- [24] LANGNER I, BLETNER M, GUNDESTRUP M, STORM H, ASPHOLM R, AUVINEN A, PUKKALA E, HAMMER GP, ZEEB H, HRAFINKELSSON J, RAFNSSON V, TULINIUS H, DE ANGELIS G, VERDECCHIA A, HALDORSEN T, TVETEN U, ELIASCH H, HAMMAR N AND LINNERSJO A, 2004, Cosmic radiation and cancer mortality among airline pilots: results from a European cohort study (ESCAPE), *Radiat Environ Biophys* **42** 247-56
- [25] RON E, IKEDA T, PRESTON DL AND TOKUOKA S, 2005, Male breast cancer incidence among atomic bomb survivors, *J Natl Cancer Inst* **97** 603-5
- [26] RON E, PRESTON DL, KISHIKAWA M, KOBUKE T, ISEKI M, TOKUOKA S, TOKUNAGA M AND MABUCHI K, 1998, Skin tumor risk among atomic-bomb survivors in Japan, *Cancer Causes Control* **9** 393-401
- [27] RON E, MODAN B, PRESTON D, ALFANDARY E, STOVALL M AND BOICE JD JR., 1991, Radiation-induced skin carcinomas of the head and neck, *Radiat Res* **125** 318-25
- [28] KARAGAS MR, McDONALD JA, GREENBERG ER, STUKEL TA, WEISS JE, BARON JA AND STEVENS MM, 1996, Risk of basal cell and squamous cell skin cancers after ionizing radiation therapy. For The Skin Cancer Prevention Study Group, *J Natl Cancer Inst* **88** 1848-53
- [29] SHORE RE, MOSESON M, XUE X, TSE Y, HARLEY N AND PASTERNAK BS, 2002, Skin cancer after X-ray treatment for scalp ringworm, *Radiat Res* **157** 410-8
- [30] DAVIS FG, BOICE JD JR., KELSEY JL AND MONSON RR, 1987, Cancer mortality after multiple fluoroscopic examinations of the chest, *J Natl Cancer Inst* **78** 645-52
- [31] YOSHINAGA S, HAUPTMANN M, SIGURDSON AJ, DOODY MM, FREEDMAN DM, ALEXANDER BH, LINET MS, RON E AND MABUCHI K, 2005, Nonmelanoma skin cancer in relation to ionizing radiation exposure among U.S. radiologic technologists, *Int J Cancer* **115** 828-34
- [32] LAND CE, SAKU T, HAYASHI Y, TAKAHARA O, MATSUURA H, TOKUOKA S, TOKUNAGA M AND MABUCHI K, 1996, Incidence of salivary gland tumors among atomic bomb survivors, 1950-1987. Evaluation of radiation-related risk, *Radiat Res* **146** 28-36
- [33] SAKU T, HAYASHI Y, TAKAHARA O, MATSUURA H, TOKUNAGA M, TOKUNAGA M, TOKUOKA S, SODA M, MABUCHI K AND LAND CE, 1997, Salivary gland tumors among atomic bomb survivors, 1950-1987, *Cancer* **79**, 1465-75
- [34] HEMPELMANN LH, HALL WJ, PHILLIPS M, COOPER RA AND AMES WR, 1975, Neoplasms in persons treated with x-rays in infancy : fourth survey in 20 years, *J Natl Cancer Inst* **55** 519-30
- [35] JANOWER ML AND MIETTINEN OS, 1971, Neoplasms after childhood irradiation of the thymus gland, *Jama* **215** 753-6
- [36] SAENGER EL, SILVERMAN FN, STERLING TD AND TURNER ME, 1960, Neoplasia following therapeutic irradiation for benign conditions in childhood, *Radiology* **74** 889-904
- [37] SHORE RE, ALBERT RE AND PASTERNAK BS, 1976, Follow-up study of patients treated by X-ray epilation for Tinea capitis; resurvey of post-treatment illness and mortality experience, *Arch Environ Health* **31** 21-8
- [38] MORRISON HI, VILLENEUVE PJ, LUBIN JH AND SCHAUBEL DE, 1998, Radon-progeny exposure and lung cancer risk in a cohort of Newfoundland fluorspar miners, *Radiat Res* **150** 58-65
- [39] WHORTON MD, MOORE DN, SEWARD JP, NOONAN KA AND MENDELSON ML, 2004, Cancer incidence rates among Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) employees : 1974-1997, *Am J Ind Med* **45** 24-33
- [40] WILSON RT, MOORE LE AND DOSEMECI M, 2004, Occupational exposures and salivary gland cancer mortality among African American and white workers in the United States, *J Occup Environ Med* **46** 287-97
- [41] MCGEOGHEGAN D AND BINKS K, 2000, The mortality and cancer morbidity experience of workers at the Springfields uranium production facility 1946-95, *J Radiol Prot* **20** 111-37
- [42] MCGEOGHEGAN D AND BINKS K, 2000, The mortality and cancer morbidity experience of workers at the Capenhurst uranium enrichment facility 1946-95, *J Radiol Prot* **20** 381-401
- [43] MCGEOGHEGAN D AND BINKS K, 2001, The mortality and cancer morbidity experience of employees at the Chapelcross plant of British Nuclear Fuels plc 1955-95, *J Radiol Prot* **21** 221-50
- [44] HASHIBE M, RITZ B, LE AD, LI G, SANKARANARAYANAN R AND ZHANG ZF, 2005, Radiotherapy for oral cancer as a risk factor for second primary cancers, *Cancer Letters* **220** 185-95
- [45] CARDIS E, GILBERT ES, CARPENTER L, HOWE G, KATO I, ARMSTRONG BK, BERAL V, COWPER G, DOUGLAS A, FIX J AND AL., 1995, Effects of low doses and low dose rates of external ionizing radiation : cancer mortality among nuclear industry workers in three countries, *Radiat Res* **142** 117-32
- [46] MUIRHEAD CR, O'HAGAN JA, HAYLOCK RG, PHILLIPSON MA, WILLCOCK T, BERRIDGE GL AND ZHANG W, 2009, Mortality and cancer incidence following occupational radiation exposure : third analysis of the National Registry for Radiation Workers, *Br J Cancer* **100** 206-12
- [47] VACQUIER B, CAER S, ROGEL A, FEURPRIER M, TIRMARCHE M, LUCCIONI C, QUESNE B, ACKER A AND LAURIER D, 2008, Mortality risk in the French cohort of uranium miners : extended follow-up 1946-1999, *Occup Environ Med* **65** 597-604
- [48] ZABLOTSKA LB, ASHMORE JP AND HOWE GR, 2004, Analysis of mortality among Canadian nuclear power industry workers after chronic low-dose exposure to ionizing radiation, *Radiat Res* **161** 633-41

- [49] RIGHINI CA, KARKAS A, MOREL N, SORIANO E AND REYT E, 2008, Risk factors for cancers of the oral cavity, pharynx (cavity excluded) and larynx, *Presse Med* **37** 1229-40
- [50] Remontet I, Estève J, Bouvier AM, Grosclaude P, Launoy G, Menegoz F, Exbrayat C, Tretare B, Carli PM, Guizard AV, Troussard X, Berceili P, Colonna M, Halna JM, Hedelin G, Macé-Lesec'h J, Peng J, Buemi A, Velten M, Jouglu E, Arveux P, Le Bodic L, Michel E, Sauvage M, Schwartz C, Faivre J. Cancer incidence and mortality in France over the period 1978-2000. *Rev Epidemiol Sante Publique*. 2003 ;51:3-30
- [51] RANNOU A, AUBERT B ET SCANFF P, Exposition de la population française aux rayonnements ionisants, Rapport IRSN DRPH/SER/2006-02
- [52] DELACROIX D, GUERRE J-P ET LEBLANC P, Guide pratique Radionucléides & Radioprotection, EDP Sciences, 2004

ANNEXE I : CHAINES RADIOACTIVES

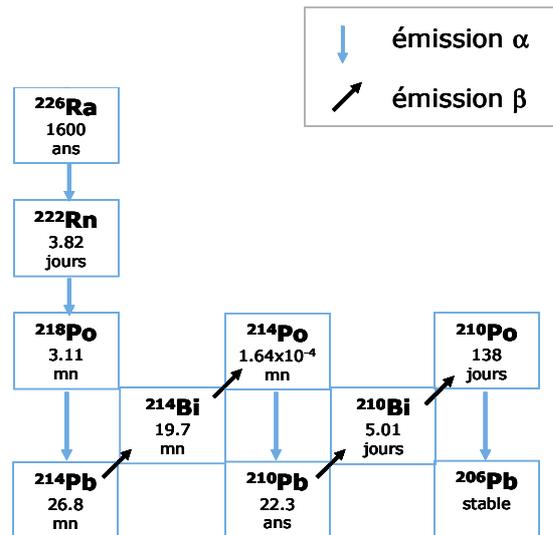


Figure 3 : Chaîne de décroissance du radium 226

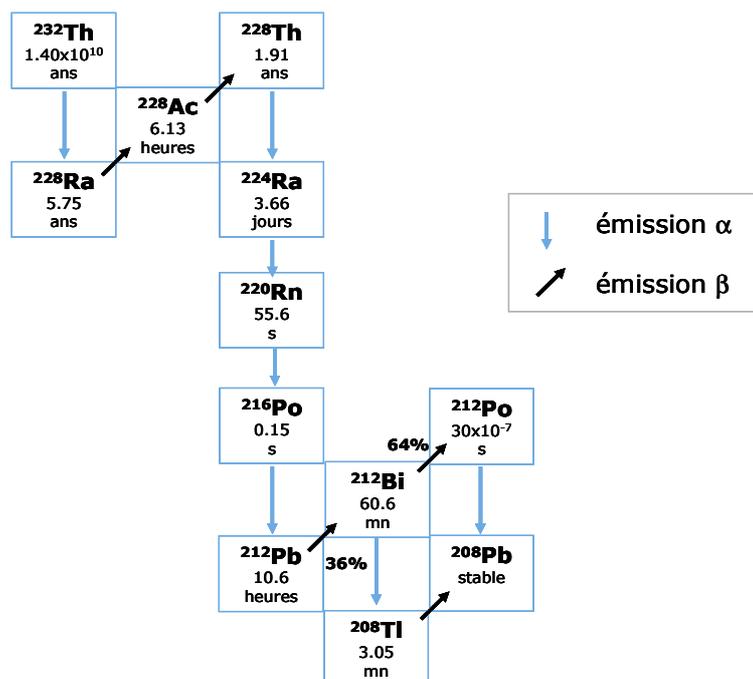


Figure 4 : Chaîne de décroissance du thorium 232

ANNEXE II : CARACTERISTIQUES RADIOLOGIQUES

Tableau IX : Principales caractéristiques radiologiques du tritium (H-3)

	Gamma / X		Bêta (E max)		Electrons		Alpha		Exemption*	
	E (keV)	%	E (keV)	%	E (keV)	%	E (keV)	%	Bq	Bq/kg
E1			19	100					1.10 ⁹	1.10 ⁶
E2										
E3										
% omis			0							

Tableau X : Principales caractéristiques radiologiques du prométhium 147 (Pm-147)

	Gamma / X		Bêta (E max)		Electrons		Alpha		Exemption*	
	E (keV)	%	E (keV)	%	E (keV)	%	E (keV)	%	Bq	Bq/kg
E1	121	< 1	225	100					1.10 ⁷	1.10 ⁴
E2										
E3										
% omis			0							

Tableau XI : Principales caractéristiques radiologiques du radium 226 (Ra-226) avec tous ses descendants

	Gamma / X		Bêta (E max)		Electrons		Alpha		Exemption*	
	E (keV)	%	E (keV)	%	E (keV)	%	E (keV)	%	Bq	Bq/kg
E1	186	3	1540	18	205	7	5490	100	1.10 ⁴	1.10 ¹
E2	610	46	1892	8	261	9	6003	100		
E3	1764	16	3270	17	335	2	7687	100		
% omis		193		356		123		200		

Tableau XII : Principales caractéristiques radiologiques du thorium 232 (Th-232)

	Gamma / X		Bêta (E max)		Electrons		Alpha		Exemption*	
	E (keV)	%	E (keV)	%	E (keV)	%	E (keV)	%	Bq	Bq/kg
E1	12	8			9	8	3953	23	1.10 ⁴	1.10 ¹
E2					40	17	4010	77		
E3					56	6				
% omis		< 1				< 1		< 1		

* Seuils d'exemption :

Certaines activités nucléaires sont dispensées d'autorisation en raison du peu de risques qu'elles entraînent. Les critères permettant d'exercer une activité nucléaire sans autorisation sont fixés à l'article R.1333-27 du code de la santé publique.

En particulier, si la quantité de radionucléides présents dans l'établissement est inférieure à certains seuils d'exemption, une autorisation n'est pas nécessaire. Ces valeurs d'exemption sont notamment définies dans l'annexe 13-8 du code de la santé publique et dans l'arrêté du 2 décembre 2003 fixant des seuils d'exemption d'autorisation pour les activités nucléaires mentionnées à l'article R.1333-26 du code de la santé publique.

ANNEXE III : INVENTAIRES ET ACTIVITES FORFAITAIRES

Tableau XIII : Inventaire national de novembre 2001 des parasurtenseurs de répartiteurs [2]

Type	Nombre		Activité (Bq)		
	Parasurtenseurs	Proportion	Radioélément	Parasurtenseur	Totale
M01	2529	1,61%	Ra-226	100	2,53E+05
M16	444	0,28%	Ra-226	100	4,44E+04
M15	98	0,06%	Ra-226	20	1,96E+03
M17	720	0,46%	Ra-226	300	2,16E+05
M19	112	0,07%	Ra-226	100	1,12E+04
M06	152532	97,32%	Pm-147	1000	1,53E+08
M13	250	0,16%	Pm-147	400	1,00E+05
M14	40	0,03%	Pm-147	1000	4,00E+04
Total	156725	100,00%			1,53E+08

Tableau XIV : Inventaire des parasurtenseurs de boîtiers - type C99 DR Lyon [2]

Type	Nombre		Activité (Bq)		
	Parasurtenseurs	Proportion	Radioélément	Parasurtenseur	Totale
C01	113	4,36%	H-3	300	3,39E+04
C03	600	23,17%	H-3	200	1,20E+05
C04	250	9,66%	H-3	100	2,50E+04
C07	227	8,77%	H-3	3,00E+06	6,81E+08
C16	33	1,27%	H-3	3,00E+04	9,90E+05
C14	87	3,36%	Ra-226	1000	8,70E+04
C20	35	1,35%	Ra-226	1000	3,50E+04
C38	5	0,19%	Ra-226	10	5,00E+01
C10	1200	46,35%	Th-232	30	3,60E+04
C15	16	0,62%	Th-232	50	8,00E+02
C21	23	0,89%	Th-232	1	2,30E+01
Total	2589	100,00%			6,82E+08

Tableau XV : Inventaire des parasurtenseurs de boîtiers - RPC données novembre 2001 [2]

Type	Nombre		Activité (Bq)		
	Parasurtenseurs	Proportion	Radioélément	Parasurtenseur	Totale
C20	12	0,04%	Ra-226	1000	1,20E+04
C99	16674	51,04%	H-3	2,63E+05	4,39E+09
			Ra-226	4,71E+01	7,86E+05
			Th-232	1,42E+01	2,37E+05
C12	3980	12,18%	Pm-147	1000	3,98E+06
C18	180	0,55%	Th-232	1,00E+01	1,80E+03
C22	7589	23,23%	H-3	5,00E+06	3,79E+10
G09	2251	6,89%	H-3	5000	1,13E+07
G11	1982	6,07%	Néant	0	0,00E+00
Total	32668	100,00%			4,24E+10

ANNEXE IV : DEBITS DE DOSE DES PARASURTENSEURS RPF

A partir des deux inventaires indiqués dans l'étude Hémisphères en référence [2], deux sources moyennes peuvent être établies ; elles sont présentées dans le tableau XVI.

Tableau XVI : Sources moyennes des boîtiers RPF ou RPC selon l'inventaire

		Inventaire C99 DR Lyon à partir de [2] p.57	RPC Novembre 2001 à partir de [2] p.59
Activité par parasurtenseur (Bq)		2,6355 10 ⁵	1,2965 10 ⁶
Spectre (%)	tritium	99,9767	99,9882
	prométhium 147		0,0094
	radium 226	0,01789	0,0019
	thorium 232	0,0054	0,0006

Les débits de dose dus aux photons de ces deux sources sont calculés avec le code de calcul MICROSHIELD® [10] qui modélise le transport des photons dans la matière avec la méthode dite d'atténuation en ligne droite.

Chaque parasurtenseur est représenté par une source ponctuelle. Les différents débits de dose calculés (type de dose et géométrie d'irradiation) avec MICROSHIELD® sont présentés dans le tableau XVII pour une distance de 10 cm entre la source ponctuelle et le point de calcul.

Tableau XVII : Débits de dose d'un parasurtenseur moyen selon l'inventaire, en mSv.h⁻¹

Type de dose	Géométrie d'irradiation	Inventaire C99 DR Lyon	RPC Novembre 2001
en profondeur	parallèle	1,74 10 ⁻⁶	9,25 10 ⁻⁷
	opposée	1,43 10 ⁻⁶	7,58 10 ⁻⁷
	rotationnelle	1,42 10 ⁻⁶	7,52 10 ⁻⁷
	isotrope	1,27 10 ⁻⁶	6,73 10 ⁻⁷
à la peau	parallèle	1,94 10 ⁻⁶	1,03 10 ⁻⁶
	opposée	1,79 10 ⁻⁶	9,46 10 ⁻⁷
	rotationnelle	1,78 10 ⁻⁶	9,43 10 ⁻⁷
	isotrope	1,41 10 ⁻⁶	7,45 10 ⁻⁷
efficace	antéro-postérieure	1,53 10 ⁻⁶	8,08 10 ⁻⁷
	postéro-antérieure	1,37 10 ⁻⁶	7,27 10 ⁻⁷
	latérale	1,07 10 ⁻⁶	5,67 10 ⁻⁷
	rotationnelle	1,24 10 ⁻⁶	6,55 10 ⁻⁷
	isotrope	1,08 10 ⁻⁶	5,73 10 ⁻⁷

Les valeurs du tableau XVI montrent d'une part que le parasurtenseur moyen établi à partir de l'inventaire C99 de la DR de Lyon génère des débits de dose significativement plus élevés, d'un facteur 2 environ, que ceux du parasurtenseur moyen établi à partir de l'inventaire RPC de novembre 2001, et d'autre part que la géométrie d'irradiation antéro-postérieure est enveloppe des autres géométrie d'irradiation.

ANNEXE V : SOURCE PONCTUELLE

Le tableau XVIII présente les débits de dose, selon la géométrie d'irradiation, en profondeur, à la peau et efficace à 1 m d'une source ponctuelle représentant soit un parasurtenseur moyen de répartiteur, soit un parasurtenseur moyen de boîtier RPF ou RPC, calculés avec le code MICROSIELD®. Les sources correspondantes sont celles du tableau I, avec les descendants du radium 226 et du thorium 232.

Tableau XVIII : Débits de dose d'un parasurtenseur moyen selon l'inventaire, en mSv.h⁻¹

Type de dose	Géométrie d'irradiation	Répartiteur	Boîtier RPF ou RPC
en profondeur	parallèle	8,60 10 ⁻¹⁰	1,74 10 ⁻⁸
	opposée	7,06 10 ⁻¹⁰	1,43 10 ⁻⁸
	rotationnelle	7,04 10 ⁻¹⁰	1,42 10 ⁻⁸
	isotrope	6,29 10 ⁻¹⁰	1,27 10 ⁻⁸
à la peau	parallèle	9,30 10 ⁻¹⁰	1,92 10 ⁻⁸
	opposée	8,71 10 ⁻¹⁰	1,77 10 ⁻⁸
	rotationnelle	8,70 10 ⁻¹⁰	1,77 10 ⁻⁸
	isotrope	6,80 10 ⁻¹⁰	1,40 10 ⁻⁸
efficace	antéro-postérieure	7,58 10 ⁻¹⁰	1,52 10 ⁻⁸
	postéro-antérieure	6,82 10 ⁻¹⁰	1,37 10 ⁻⁸
	latérale	5,29 10 ⁻¹⁰	1,07 10 ⁻⁸
	rotationnelle	6,13 10 ⁻¹⁰	1,23 10 ⁻⁸
	isotrope	5,35 10 ⁻¹⁰	1,08 10 ⁻⁸

Il est précisé que le flux de photons, et donc le débit de dose qui s'ensuit, varient selon l'inverse du carré de la distance de la source ponctuelle au point de calcul, sous la réserve d'une distance au moins égale à quelques cm. Ces calculs sont utilisés pour dans le cas des parasurtenseurs dans le magasin, dans le coffre d'un véhicule, dans une boîte ou un boîtier RPF ou RPC.

ANNEXE VI : SOURCE LINEAIRE

Le tableau XIX présentent les débits de dose, pour la géométrie d'irradiation pénalisante de chaque type de dose, à la peau (générale) et efficace à une distance égale à 1 m (à mi-hauteur) d'une source linéaire représentant soit une tête de câble de grand répartiteur (hauteur égale à 4 m avec 896 parasurtenseurs), soit une tête de câble de petit répartiteur (hauteur égale à 2 m avec 448 parasurtenseurs), calculés avec le code MICROSIELD. Les sources sont les parasurtenseurs moyens de répartiteurs du tableau I ; ce type de calcul n'intéressant que des situations d'exposition relatives à des répartiteurs.

Tableau XIX : Débits de dose d'un parasurtenseur moyen selon l'inventaire, en mSv.h⁻¹

Distance (cm)	Grand répartiteur		Petit répartiteur	
	Dose efficace	Dose à la peau	Dose efficace	Dose à la peau
10	5,17 10 ⁻⁶	6,37 10 ⁻⁶	4,99 10 ⁻⁶	5,91 10 ⁻⁶
30	1,60 10 ⁻⁶	1,98 10 ⁻⁶	1,45 10 ⁻⁶	1,71 10 ⁻⁶
50	9,00 10 ⁻⁷	1,11 10 ⁻⁶	7,50 10 ⁻⁷	8,89 10 ⁻⁷
70	5,99 10 ⁻⁷	7,34 10 ⁻⁷	4,65 10 ⁻⁷	5,51 10 ⁻⁷
90	4,33 10 ⁻⁷	5,31 10 ⁻⁷	3,15 10 ⁻⁷	3,74 10 ⁻⁷
110	3,29 10 ⁻⁷	4,03 10 ⁻⁷	2,27 10 ⁻⁷	2,69 10 ⁻⁷
130	2,60 10 ⁻⁷	3,17 10 ⁻⁷	1,71 10 ⁻⁷	2,02 10 ⁻⁷
150	2,10 10 ⁻⁷	2,56 10 ⁻⁷	1,33 10 ⁻⁷	1,57 10 ⁻⁷
170	1,73 10 ⁻⁷	2,11 10 ⁻⁷	1,06 10 ⁻⁷	1,25 10 ⁻⁷
190	1,45 10 ⁻⁷	1,77 10 ⁻⁷	8,63 10 ⁻⁸	1,02 10 ⁻⁷
210	1,23 10 ⁻⁷	1,50 10 ⁻⁷	7,16 10 ⁻⁸	8,48 10 ⁻⁸
230	1,05 10 ⁻⁷	1,28 10 ⁻⁷	6,03 10 ⁻⁸	7,14 10 ⁻⁸
250	9,14 10 ⁻⁸	1,11 10 ⁻⁷	5,15 10 ⁻⁸	6,10 10 ⁻⁸
270	8,00 10 ⁻⁸	9,72 10 ⁻⁸	4,44 10 ⁻⁸	5,26 10 ⁻⁸
290	7,05 10 ⁻⁸	8,56 10 ⁻⁸	3,87 10 ⁻⁸	4,58 10 ⁻⁸
310	6,26 10 ⁻⁸	7,59 10 ⁻⁸	3,40 10 ⁻⁸	4,03 10 ⁻⁸
330	5,59 10 ⁻⁸	6,78 10 ⁻⁸	3,01 10 ⁻⁸	3,57 10 ⁻⁸
350	5,02 10 ⁻⁸	6,08 10 ⁻⁸	2,69 10 ⁻⁸	3,18 10 ⁻⁸
370	4,53 10 ⁻⁸	5,48 10 ⁻⁸	2,41 10 ⁻⁸	2,85 10 ⁻⁸
390	4,11 10 ⁻⁸	4,97 10 ⁻⁸	2,17 10 ⁻⁸	2,57 10 ⁻⁸
410	3,74 10 ⁻⁸	4,52 10 ⁻⁸	1,97 10 ⁻⁸	2,33 10 ⁻⁸
430	3,42 10 ⁻⁸	4,13 10 ⁻⁸	1,79 10 ⁻⁸	2,12 10 ⁻⁸
450	3,14 10 ⁻⁸	3,79 10 ⁻⁸	1,64 10 ⁻⁸	1,94 10 ⁻⁸
470	2,89 10 ⁻⁸	3,49 10 ⁻⁸	1,51 10 ⁻⁸	1,78 10 ⁻⁸
490	2,67 10 ⁻⁸	3,22 10 ⁻⁸	1,39 10 ⁻⁸	1,64 10 ⁻⁸

Ces calculs sont utilisés dans le cas de l'opérateur réalisant des mouvements de jarretières ou remplaçant des parasurtenseurs sur les têtes de câble.

ANNEXE VII : MONTAGE D'UNE TÊTE DE CÂBLE

Le scénario n°1 d'installation de répartiteurs considère la situation d'exposition dite de montage des têtes de câble. Cette situation est en fait une suite de situations d'exposition, dans la mesure où la source à laquelle est exposé l'opérateur évolue avec le temps au fur et à mesure qu'il pose des parasurtenseurs. L'évaluation dosimétrique a donc été faite en décomposant le montage de 4 têtes de câble par semaine selon les opérations présentées dans les tableaux XX et XXI, selon que le répartiteur est petit (tête de câble de hauteur 2 m) ou grand (tête de câble de hauteur 4 m).

Dans les tableaux XX et XXI, les abréviations suivantes sont employées : TC pour tête de câble, et exp pour durée d'exposition. Les points de calcul sont repérés avec leur distance d à la tête de câble en cours de pose de parasurtenseurs et la hauteur h au sol. Les têtes de câble sont équidistantes de 20 cm et comportent 224 parasurtenseurs par mètre de hauteur.

Tableau XX : Situations d'exposition pour le montage d'une tête de câble de petit répartiteur

Opération	Exposition		
	Source	d / h (cm)	exp (h)
pose des parasurtenseurs du 1 ^{er} m / 1 ^{ère} TC	linéaire 1 m	10 / 50	1
pose des parasurtenseurs du 2 ^{ème} m / 1 ^{ère} TC	linéaire 2 m	10 / 150	1
câblage du 1 ^{er} m / 2 ^{ème} TC	1 ^{ère} TC	10 / 50	2
câblage du 2 ^{ème} m / 2 ^{ème} TC	1 ^{ère} TC	10 / 150	2
pose des parasurtenseurs du 1 ^{er} m / 2 ^{ème} TC	1 ^{ère} TC + linéaire 1 m	10 / 50	1
pose des parasurtenseurs du 2 ^{ème} m / 2 ^{ème} TC	1 ^{ère} TC + linéaire 2 m	10 / 150	1
câblage du 1 ^{er} m / 3 ^{ème} TC	1 ^{ère} TC + 2 ^{ème} TC	10 / 50	2
câblage du 2 ^{ème} m / 3 ^{ème} TC	1 ^{ère} TC + 2 ^{ème} TC	10 / 150	2
pose des parasurtenseurs du 1 ^{er} m / 3 ^{ème} TC	1 ^{ère} TC + 2 ^{ème} TC + linéaire 1 m	10 / 50	1
pose des parasurtenseurs du 2 ^{ème} m / 3 ^{ème} TC	1 ^{ère} TC + 2 ^{ème} TC + linéaire 2 m	10 / 150	1
câblage du 1 ^{er} m / 4 ^{ème} TC	1 ^{ère} TC + 2 ^{ème} TC + 3 ^{ème} TC	10 / 50	2
câblage du 2 ^{ème} m / 4 ^{ème} TC	1 ^{ère} TC + 2 ^{ème} TC + 3 ^{ème} TC	10 / 150	2
pose des parasurtenseurs du 1 ^{er} m / 4 ^{ème} TC	1 ^{ère} TC + 2 ^{ème} TC + 3 ^{ème} TC + linéaire 1 m	10 / 50	1
pose des parasurtenseurs du 2 ^{ème} m / 4 ^{ème} TC	1 ^{ère} TC + 2 ^{ème} TC + 3 ^{ème} TC + linéaire 2 m	10 / 150	1

Tableau XXI : Situations d'exposition pour le montage d'une tête de câble de grand répartiteur

Opération	Exposition		
	Source	d / h (cm)	exp (h)
pose des parasurtenseurs du 1 ^{er} m / 1 ^{ère} TC	linéaire 1 m	10 / 50	1
pose des parasurtenseurs du 2 ^{ème} m / 1 ^{ère} TC	linéaire 2 m	10 / 150	1
pose des parasurtenseurs du 3 ^{ème} m / 1 ^{ère} TC	linéaire 3 m	10 / 250	1
pose des parasurtenseurs du 4 ^{ème} m / 1 ^{ère} TC	linéaire 4 m	10 / 350	1
câblage du 1 ^{er} m / 2 ^{ème} TC	1 ^{ère} TC	10 / 50	2
câblage du 2 ^{ème} m / 2 ^{ème} TC	1 ^{ère} TC	10 / 150	2
câblage du 3 ^{ème} m / 2 ^{ème} TC	1 ^{ère} TC	10 / 250	2
câblage du 4 ^{ème} m / 2 ^{ème} TC	1 ^{ère} TC	10 / 350	2
pose des parasurtenseurs du 1 ^{er} m / 2 ^{ème} TC	1 ^{ère} TC + linéaire 1 m	10 / 50	1
pose des parasurtenseurs du 2 ^{ème} m / 2 ^{ème} TC	1 ^{ère} TC + linéaire 2 m	10 / 150	1
pose des parasurtenseurs du 3 ^{ème} m / 2 ^{ème} TC	1 ^{ère} TC + linéaire 3 m	10 / 250	1
pose des parasurtenseurs du 4 ^{ème} m / 2 ^{ème} TC	1 ^{ère} TC + linéaire 4 m	10 / 350	1
câblage du 1 ^{er} m / 3 ^{ème} TC	1 ^{ère} TC + 2 ^{ème} TC	10 / 50	2
câblage du 2 ^{ème} m / 3 ^{ème} TC	1 ^{ère} TC + 2 ^{ème} TC	10 / 150	2
câblage du 3 ^{ème} m / 3 ^{ème} TC	1 ^{ère} TC + 2 ^{ème} TC	10 / 250	2
câblage du 4 ^{ème} m / 3 ^{ème} TC	1 ^{ère} TC + 2 ^{ème} TC	10 / 350	2
pose des parasurtenseurs du 1 ^{er} m / 3 ^{ème} TC	1 ^{ère} TC + 2 ^{ème} TC + linéaire 1 m	10 / 50	1
pose des parasurtenseurs du 2 ^{ème} m / 3 ^{ème} TC	1 ^{ère} TC + 2 ^{ème} TC + linéaire 2 m	10 / 150	1
pose des parasurtenseurs du 3 ^{ème} m / 3 ^{ème} TC	1 ^{ère} TC + 2 ^{ème} TC + linéaire 3 m	10 / 250	1
pose des parasurtenseurs du 4 ^{ème} m / 3 ^{ème} TC	1 ^{ère} TC + 2 ^{ème} TC + linéaire 4 m	10 / 350	1
câblage du 1 ^{er} m / 4 ^{ème} TC	1 ^{ère} TC + 2 ^{ème} TC + 3 ^{ème} TC	10 / 50	2
câblage du 2 ^{ème} m / 4 ^{ème} TC	1 ^{ère} TC + 2 ^{ème} TC + 3 ^{ème} TC	10 / 150	2
câblage du 3 ^{ème} m / 4 ^{ème} TC	1 ^{ère} TC + 2 ^{ème} TC + 3 ^{ème} TC	10 / 250	2
câblage du 4 ^{ème} m / 4 ^{ème} TC	1 ^{ère} TC + 2 ^{ème} TC + 3 ^{ème} TC	10 / 350	2
pose des parasurtenseurs du 1 ^{er} m / 4 ^{ème} TC	1 ^{ère} TC + 2 ^{ème} TC + 3 ^{ème} TC + linéaire 1 m	10 / 50	1
pose des parasurtenseurs du 2 ^{ème} m / 4 ^{ème} TC	1 ^{ère} TC + 2 ^{ème} TC + 3 ^{ème} TC + linéaire 2 m	10 / 150	1
pose des parasurtenseurs du 3 ^{ème} m / 4 ^{ème} TC	1 ^{ère} TC + 2 ^{ème} TC + 3 ^{ème} TC + linéaire 3 m	10 / 250	1
pose des parasurtenseurs du 4 ^{ème} m / 4 ^{ème} TC	1 ^{ère} TC + 2 ^{ème} TC + 3 ^{ème} TC + linéaire 4 m	10 / 350	1

ANNEXE VIII : DOSE A LA PEAU OU A LA LEVRE

Le calcul de la dose à la peau est effectué avec le code MCNPX 2.6c de simulation du transport des particules dans la matière.

La source retenue est un parasurtenseur de diamètre 4 mm et de longueur 15 mm, pouvant représenter les plus petits parasurtenseurs manipulés, selon le catalogue des parasurtenseurs de France Télécom en référence [7].

La modélisation est un cylindre annulaire de diamètre extérieur 4 mm et de diamètre intérieur 3,8 mm. La paroi de 0,2 mm est postulée en verre, d'une part parce que le catalogue des parasurtenseurs de France Télécom ne précise pas les épaisseurs des enveloppes des parasurtenseurs et que le verre atténue moins les rayonnements que le métal (à épaisseur égale), et d'autre part parce que cette épaisseur paraît raisonnable.

A défaut de savoir comment sont distribués les radioéléments à l'intérieur du parasurtenseur, il a été retenu de concentrer toute l'activité du parasurtenseur en son centre géométrique.

Le parasurtenseur est au contact de la peau, pour représenter correctement sa manipulation ou le fait qu'il est porté entre les lèvres. Le calcul (dose moyennée sur 1 cm² de peau) est fait à 70 µm de profondeur d'un fantôme parallélépipédique de tissu mou.

Pour la dose à la peau, les émetteurs gamma et bêta sont considérés. Les raies d'émission et les probabilités correspondantes des émetteurs gamma sont tirées de la librairie JEF 2.2. Les spectres des émetteurs bêta sont issus de la base de données RADAR (Radiation Dose Assessment Ressource, <http://www.doseinfo-radar.com/RADARHome.html>).

Les débits de dose unitaires rapportés à 1 Bq de radium 226 (en équilibre radioactif avec ses descendants) ou à 1 Bq de thorium 232 (en équilibre avec ses descendants) sont présentés dans le tableau XXII.

Tableau XXII : Débits de dose unitaire à la peau, en mSv.h⁻¹

radioélément	contribution	débit de dose (mSv.h ⁻¹)
radium 226	bêta	1,45 10 ⁻³
	gamma	2,80 10 ⁻⁵
	total	1,48 10 ⁻³
thorium 232	bêta	9,01 10 ⁻⁴
	gamma	2,34 10 ⁻⁵
	total	9,24 10 ⁻⁴

Le débit de dose à la peau pour un parasurtenseur se calcule en pondérant le total de chaque radioélément par l'activité de ce radioélément dans le parasurtenseur considéré.

ANNEXE IX : DOSE A LA PEAU DU SEIN ET AU SEIN

Le calcul de la dose à la peau du sein et au sein est effectué avec le code MCNPX 2.6c de simulation du transport des particules dans la matière.

La source est un parallélépipède rectangle de $2 \times 8 \times 2 \text{ cm}^3$ pouvant représenter raisonnablement le volume de 50 petits parasurtenseurs en vrac dans la poche de la blouse de l'opérateur ; il est postulé que les radioéléments sont répartis de manière homogène dans ce volume. Une protection de 0,2 mm de verre est retenue (enveloppe d'un parasurtenseur) entre le volume source et l'opérateur ; cette modélisation est pénalisante dans la mesure où chaque parasurtenseur dispose d'une enveloppe. De plus, une épaisseur de 3 mm de coton, censée représenter *a minima* le ou les vêtements de l'opérateur est considérée. Le calcul est fait à 70 μm de profondeur pour le calcul pour la peau (moyennée sur 1 cm^2), à 1, 2, 3, et 4 cm de profondeur pour le calcul pour le sein, d'un fantôme parallélépipédique de tissu mou.

Les raies d'émission et les probabilités correspondantes des émetteurs gamma sont tirées de la librairie JEF 2.2. Les spectres des émetteurs beta sont issus de la base de données RADAR (Radiation Dose Assessment Ressource, <http://www.doseinfo-radar.com/RADARHome.html>).

Les débits de dose unitaires rapportés à 1 Bq de radium 226 (en équilibre radioactif avec ses descendants) ou à 1 Bq de thorium 232 (en équilibre avec ses descendants) dans tout le volume source sont présentés dans les tableaux XXIII et XXIV, respectivement pour la peau du sein et le sein.

Tableau XXIII : Débits de dose unitaire à la peau du sein, en mSv.h^{-1}

	radioélément	contribution	débit de dose
peau du sein	radium 226	beta	$6,91 \cdot 10^{-8}$
		gamma	$1,06 \cdot 10^{-6}$
		total	$1,13 \cdot 10^{-6}$ ^(a)
	thorium 232	beta	$2,25 \cdot 10^{-8}$
		gamma	$5,59 \cdot 10^{-7}$
		total	$5,82 \cdot 10^{-7}$

^(a) : cette valeur inférieure d'un facteur 1 000 environ au débit de dose délivrée à la peau nue (tableau XXII) s'explique d'une part par la différence de géométrie de la source, d'autre part par l'effet important joué par les vêtements

Tableau XXIV : Débits de dose unitaire au sein, en mSv.h^{-1}

radioélément	profondeur (cm)	débit de dose
radium 226	1	$3,48 \cdot 10^{-7}$
	2	$2,14 \cdot 10^{-7}$
	3	$1,51 \cdot 10^{-7}$
	4	$1,07 \cdot 10^{-7}$
thorium 232	1	$2,00 \cdot 10^{-7}$
	2	$1,35 \cdot 10^{-7}$
	3	$8,69 \cdot 10^{-8}$
	4	$6,53 \cdot 10^{-8}$

ANNEXE X : DOSE EFFICACE

La source est un parallélépipède rectangle de $2 \times 8 \times 2 \text{ cm}^3$ pouvant représenter raisonnablement le volume de 50 petits parasurtenseurs en vrac dans la poche de la blouse de l'opérateur ; les radioéléments sont postulés être répartis de manière homogène dans ce volume. Une protection de 0,2 mm de verre est retenue (enveloppe d'un parasurtenseur) entre le volume source et l'opérateur ; cette modélisation est pénalisante dans la mesure où chaque parasurtenseur dispose d'une enveloppe. De plus, une épaisseur de 3 mm de coton, censée représenter *a minima* le ou les vêtements de l'opérateur est considérée.

Pour le calcul de la dose efficace, le fantôme mathématique de Cristy et Eckerman est utilisé (cf. figure 5). Les calculs sont réalisés pour des parasurtenseurs situés soit dans une poche poitrine, soit dans une poche basse d'un pantalon. La dose moyenne aux différents organes est calculée.

Pour la dose à la peau, les émetteurs gamma et bêta sont considérés. Pour la dose efficace, seuls les émetteurs gamma sont pris en compte. Les raies d'émission et les probabilités correspondantes des émetteurs gamma sont tirées de la librairie JEF 2.2. Les spectres des émetteurs bêta sont issus de la base de données RADAR (Radiation Dose Assessment Ressource, <http://www.doseinfo-radar.com/RADARHome.html>).

Les débits de dose unitaires rapportés à 1 Bq de radium 226 (en équilibre radioactif avec ses descendants) ou à 1 Bq de thorium 232 (en équilibre avec ses descendants) dans tout le volume source sont présentés dans le tableau XXV.

Tableau XXV : Débits de dose unitaire aux organes, en mSv.h^{-1}

organe	radium 226		thorium 232	
	poche poitrine	poche basse	poche poitrine	poche basse
colon	$5,77 \cdot 10^{-10}$	$1,99 \cdot 10^{-8}$	$2,98 \cdot 10^{-10}$	$1,11 \cdot 10^{-9}$
poumons	$1,24 \cdot 10^{-8}$	$1,15 \cdot 10^{-9}$	$7,38 \cdot 10^{-9}$	$5,18 \cdot 10^{-11}$
estomac	$1,54 \cdot 10^{-9}$	$3,40 \cdot 10^{-9}$	$8,25 \cdot 10^{-10}$	$1,68 \cdot 10^{-10}$
gonades	$3,28 \cdot 10^{-11}$	$9,79 \cdot 10^{-8}$	$1,42 \cdot 10^{-11}$	$5,75 \cdot 10^{-9}$
vessie	$1,54 \cdot 10^{-10}$	$7,05 \cdot 10^{-8}$	$6,99 \cdot 10^{-11}$	$4,06 \cdot 10^{-9}$
œsophage	$5,23 \cdot 10^{-9}$	$1,13 \cdot 10^{-9}$	$3,02 \cdot 10^{-9}$	$5,36 \cdot 10^{-11}$
foie	$4,11 \cdot 10^{-9}$	$4,36 \cdot 10^{-9}$	$2,36 \cdot 10^{-9}$	$2,16 \cdot 10^{-10}$
thyroïde	$3,32 \cdot 10^{-9}$	$2,47 \cdot 10^{-10}$	$1,85 \cdot 10^{-9}$	$1,20 \cdot 10^{-11}$
cœur	$1,32 \cdot 10^{-8}$	$1,38 \cdot 10^{-9}$	$7,73 \cdot 10^{-9}$	$6,16 \cdot 10^{-11}$
reins	$1,32 \cdot 10^{-9}$	$3,68 \cdot 10^{-9}$	$7,19 \cdot 10^{-10}$	$1,77 \cdot 10^{-10}$
efficace	$3,04 \cdot 10^{-9}$	$1,98 \cdot 10^{-9}$	$1,84 \cdot 10^{-9}$	$1,18 \cdot 10^{-12}$

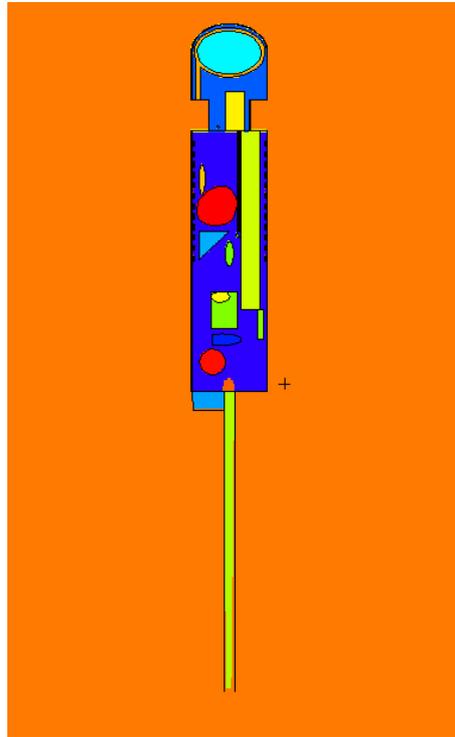


Figure 5 : Fantôme de Cristy et Eckerman utilisé pour les calculs de dose efficace