

# **Evaluation dosimétrique de cinq filières de production de biens manufacturés en situation post-accidentelle**

**Rapport n° PRP-HOM/SER/2017-00009**

**Pôle RadioProtection - HOMme**

**Service d'Etudes et d'expertise en Radioprotection**



# Table des Matières

<b>TABLE DES ILLUSTRATIONS ET DES TABLEAUX.....</b>	<b>6</b>
<b>1 INTRODUCTION .....</b>	<b>8</b>
<b>2 DEMARCHE D'ETUDE .....</b>	<b>8</b>
2.1 Objectif de l'étude .....	8
2.2 Analyse des filières .....	9
2.2.1 Enseignements apportés par l'étude des conséquences des accidents de Tchernobyl et de Fukushima.....	9
2.2.2 Description de l'organisation des filières en France.....	10
2.3 Description des situations d'exposition retenues .....	10
2.4 Définition du terme source .....	11
2.5 Outils de calculs .....	12
<b>3 LA FILIERE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION.....</b>	<b>12</b>
3.1 Enseignements apportés par l'accident de Fukushima .....	12
3.1.1 Exemple de la contamination d'un immeuble d'habitation à Nihonmatsu City.....	12
3.1.2 Les mesures de gestion adoptées par les autorités japonaises .....	13
3.1.3 Les enseignements apportés par cette affaire .....	14
3.2 Description de la filière « matériaux de construction » en France .....	14
3.2.1 Les matériaux concernés .....	14
3.2.2 Les étapes de la filière .....	15
3.3 Impact dosimétrique associé aux différentes étapes de la filière .....	20
3.3.1 Situations d'exposition retenues .....	20
3.3.2 Hypothèses sur le comportement des radionucléides de l'amont vers l'aval de la filière .....	22
3.3.3 Résultats des évaluations .....	22
<b>4 LA FILIERE TEXTILE : EXEMPLE DU LIN .....</b>	<b>24</b>
4.1 La filière Lin en France .....	24
4.1.1 Description de la plante .....	24
4.1.2 La production agricole .....	24
4.1.3 La valorisation du lin et de ses sous-produits .....	25
4.2 Enseignements tirés des accidents nucléaires passés .....	28

4.2.1	Radioécologie du lin .....	28
4.2.2	Sensibilité de la culture du lin aux rejets d'un accident radiologique ou nucléaire.....	29
4.3	<b>Impact dosimétrique associé à la filière lin .....</b>	<b>29</b>
4.3.1	Méthode d'évaluation de l'impact.....	29
4.3.2	Résultats des évaluations .....	31
4.3.3	Discussion .....	32
<b>5</b>	<b>LA FILIERE BOIS .....</b>	<b>32</b>
5.1	Généralités .....	32
5.2	<b>Description de la filière bois en France.....</b>	<b>33</b>
5.2.1	Généralités.....	33
5.2.2	Exploitation forestière .....	33
5.2.3	Industrie de première transformation.....	35
5.2.4	Industrie de seconde transformation .....	37
5.3	<b>Enseignements tirés des contaminations passées.....</b>	<b>37</b>
5.3.1	Comportement des radionucléides dans l'écosystème forestier .....	38
5.3.2	Comportement des radionucléides lors des étapes de valorisation du bois.....	41
5.3.3	Vulnérabilité de la filière bois à court, moyen et long termes .....	43
5.3.4	Les dispositifs de gestion mis en place après les accidents de Tchernobyl et Fukushima .....	44
5.4	<b>Impact dosimétrique associé à la filière bois .....</b>	<b>44</b>
5.4.1	Prise en compte de l'évolution au cours du temps.....	44
5.4.2	Scénarios étudiés pour chacun des deux stades de contamination .....	45
5.4.3	Résultats des évaluations d'impact radiologique .....	47
5.4.4	Discussion .....	49
<b>6</b>	<b>LE CAS D'UN PARC AUTOMOBILE .....</b>	<b>50</b>
6.1	<b>Enseignements tirés de l'accident de Fukushima .....</b>	<b>50</b>
6.1.1	Eléments sur la contamination des véhicules au Japon et sur les dispositions mises en place pour leur mise sur le marché.....	50
6.1.2	Evolution de la contamination des véhicules.....	51
6.2	<b>Les situations prises en compte en France.....</b>	<b>51</b>
6.3	<b>Evaluations d'impact dosimétrique .....</b>	<b>52</b>
6.3.1	Hypothèses de calcul .....	52

6.3.2	Résultats des évaluations .....	54
6.3.3	Discussion.....	54
<b>7</b>	<b>LE CAS DES PLASTIQUES ALIMENTAIRES.....</b>	<b>55</b>
7.1	Détail du scénario retenu.....	55
7.2	Résultats des évaluations d'impact dosimétrique.....	55
7.3	Discussion.....	56
<b>8</b>	<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>56</b>
	<b>LISTE DES REFERENCES .....</b>	<b>59</b>
	<b>ANNEXE 1 EXEMPLE D'ACTIVITES INDUSTRIELLES APPARTENANT AUX FILIERES TRAITEES, INSTALLEE DANS L'ENVIRONNEMENT D'UNE INSTALLATION NUCLEAIRE.....</b>	<b>63</b>
	<b>ANNEXE 2 VALEURS DE DEPOTS PRISES EN COMPTE POUR CHACUN DES SCENARIOS CODIRPA CONSIDERES.....</b>	<b>65</b>
	<b>ANNEXE 3 RESULTATS DES CALCULS UNITAIRES POUR LES DIFFERENTES FILIERES ET CAS D'ETUDES PRIS EN COMPTE.....</b>	<b>66</b>
	<b>ANNEXE 4 SEUILS DE GESTION DU BOIS ET DE SES SOUS-PRODUITS EN VIGUEUR EN UKRAINE APRES L'ACCIDENT DE TCHERNOBYL .....</b>	<b>73</b>
	<b>ANNEXE 5 : PARAMETRES, HYPOTHESES ET RESULTATS UNITAIRES POUR LE SCENARIO « BIBERON ».....</b>	<b>74</b>

## Table des illustrations et des tableaux

### *Illustrations*

Figure n° 1 : Mesures réalisées par les autorités préfectorales dans la carrière de Namie (20 Janvier 2012) [8] .....	13
Figure n° 2 : Principales étapes de l'extraction de matériaux en carrières à ciel ouvert.....	16
Figure n° 3 : Installations d'entreposage de matériaux extraits des carrières .....	16
Figure n° 4 : Etapes de fabrication des matériaux de terre cuite (source : site internet monomur.com) .....	18
Figure n° 5 : Quantités de granulats utilisées dans les grandes catégories de chantier .....	20
Figure n° 6 : Doses efficaces totales associées aux situations d'exposition de la filière matériaux de construction ...	23
Figure n° 7 : Principales étapes de la production agricole du lin .....	25
Figure n° 8 : Les étapes du teillage du lin - Exemple de la coopérative Terre de Lin de Saint-Pierre Le Viger.....	26
Figure n° 9 : La filière lin (d'après le site internet www.mastersoflinen.com ) .....	27
Figure n° 10 : Doses efficaces totales associées aux situations d'exposition de la filière lin - contamination au stade de la floraison.....	31
Figure n° 11 : Doses efficaces totales associées aux situations d'exposition de la filière lin - contamination au stade du rouissage.....	31
Figure n° 12 : Structure du tronc d'un arbre .....	33
Figure n° 13 : Principales activités menées au sein de la filière bois .....	34
Figure n° 14 : Les étapes de la fabrication de la pâte à papier et du papier .....	36
Figure n° 15 : voies de transfert de la contamination au sein du tronc d'un arbre .....	39
Figure n° 16 : Résultats des évaluations dosimétriques associées à une contamination unitaire de 1 Bq.kg <sup>-1</sup> pour les situations d'exposition associées à la filière bois - Stade du court terme.....	47
Figure n° 17 : Résultats des évaluations dosimétriques associées à une contamination unitaire de 1 Bq.kg <sup>-1</sup> dans le bois, pour les situations d'exposition associées à la filière bois - Stade du moyen / long terme .....	48
Figure n° 18 : Etudes comparatives de l'impact de différents scénarios d'usage du bois sur le public pour une contamination unitaire de 1 Bq.kg <sup>-1</sup> de <sup>137</sup> Cs dans le bois.....	49
Figure n° 19 : Résultats des évaluations dosimétriques pour les situations d'exposition associées au cas du parc automobile .....	54
Figure n° 20 : Résultats des évaluations dosimétriques pour le scénario biberon .....	55

## Tableaux

Tableau n° 1 : Radionucléides considérés dans l'étude .....	11
Tableau n° 2 : résultats des mesures faites le 20 janvier 2012 sur le site de la carrière de Namie (Bq.kg <sup>-1</sup> ) [4] .....	13
Tableau n° 3: Principaux matériaux de construction exploités en France .....	14
Tableau n° 4 : Risques poussières associés aux postes de travail en carrière .....	17
Tableau n° 5 : Situations d'exposition prises en compte pour l'évaluation de l'impact dosimétrique associé à la filière des matériaux de construction .....	21
Tableau n° 6 : Rendements moyens des sous-produits du lin .....	24
Tableau n° 7 : Facteurs de transfert sol-lin pour le césium .....	28
Tableau n° 8 : Situations d'exposition prises en compte pour l'évaluation de l'impact dosimétrique associé à la filière lin.....	30
Tableau n° 9 : Evolution de la contamination de l'écorce et du bois au cours du temps .....	41
Tableau n° 10 : Vulnérabilité des activités de la filière bois en fonction du temps .....	43
Tableau n° 11 : Seuils de gestion adoptés pour le bois en Russie après l'accident de Tchernobyl (Règles sanitaires SR 2.6.1.759-99, Ministère de la Santé) .....	44
Tableau n° 12 : Valeurs maximales de la concentration en césium dans le bois adoptées par les autorités japonaises après l'accident de Fukushima :.....	44

# 1 INTRODUCTION

En situation post-accidentelle, les pouvoirs publics devraient mettre en place des restrictions de commercialisation des denrées alimentaires, mais également examiner celle des matériaux et produits manufacturés susceptibles d'être contaminés, comme recommandé par le CODIRPA [1]. Or, l'accident de Fukushima, survenu en 2011, montre qu'en situation post-accidentelle la question de la reprise des activités économiques se pose très rapidement. Les conditions et les moyens de cette reprise d'activités doivent donc être définis en phase de préparation, afin de s'assurer que les solutions proposées dès la sortie de la phase d'urgence apportent suffisamment de garanties en termes de radioprotection, sans toutefois entraver les activités économiques de façon excessive.

Dans ce contexte, le ministère de l'économie et des finances et l'Autorité de Sûreté Nucléaire ont demandé à l'IRSN, par la saisine CODEP-DIS-2015-001162 du 13 janvier 2015, de procéder à une évaluation dosimétrique de différents scénarios indicatifs de transformation ou d'usage des biens non-alimentaires contaminés suite à un accident nucléaire.

Cinq filières ont été retenues en première approche pour illustrer cette démarche. Il s'agit :

- des matériaux de construction stockés à l'extérieur ou extraits en ZPP/ZST ;
- des voitures stockées à l'extérieur en ZPP/ZST, en attente de commercialisation ;
- de la filière Bois en ZPP/ZST ;
- de la filière textile en ZPP/ZST ;
- de l'usage de plastiques dans un contexte alimentaire.

Le présent document répond à cette demande en présentant des situations d'exposition modélisées à partir de données issues de la littérature ou d'expertises de l'IRSN. Il a volontairement été fait le choix de ne pas présenter l'ensemble des paramètres retenus et des calculs afin de faciliter la lecture du document.

## 2 DEMARCHE D'ETUDE

### 2.1 Objectif de l'étude

Les rejets de radioactivité dans l'environnement consécutifs à un accident radiologique ou nucléaire sur une installation donnée conduiraient à la contamination des ressources présentes dans les territoires affectés. Ainsi, les dépôts de radionucléides entraîneraient une contamination non seulement des productions agricoles, mais également de toute matière première ou tout bien manufacturé présent à l'extérieur au moment des rejets. Si la contamination du milieu agricole a été largement étudiée suite aux accidents de Tchernobyl et de Fukushima, il n'en est pas de même pour l'exploitation des matières premières et leur transformation ainsi que pour les conséquences de l'utilisation de biens manufacturés contaminés.

La présente étude vise à évaluer les enjeux dosimétriques qui pourraient être associés à l'exploitation de ces matières premières ou des biens manufacturés contaminés en situation post-accidentelle afin de définir les besoins de gestion spécifique, notamment en matière de seuils de contamination. L'étude n'aborde cependant pas cette problématique de gestion qui fera l'objet de travaux ultérieurs, pilotés par l'ASN en concertation avec le Ministère de l'Economie.

Pour les cinq filières retenues, cette étude se propose donc d'analyser l'évolution de la contamination des productions depuis le dépôt initial jusqu'au produit fini et de calculer, pour les principaux postes de travail ou les situations d'utilisation d'intérêt, l'impact dosimétrique pour les individus concernés.

L'objectif poursuivi est double :

- d'une part analyser la vulnérabilité des différentes étapes des filières étudiées, vis-à-vis d'une contamination radioactive ;
- d'autre part, apporter des éléments en vue d'une réflexion ultérieure sur les besoins de gestion des biens manufacturés en situation post-accidentelle.

## 2.2 Analyse des filières

La saisine de l'ASN cible cinq cas à prendre en compte :

- Trois filières à considérer dans leur ensemble depuis la production primaire jusqu'à l'usage des produits par le public : la filière bois, la filière textile et celle des matériaux de construction ;
- Les cas particuliers de deux produits manufacturés entreposés à l'extérieur au moment de l'accident :
  - des automobiles entreposées sur une aire extérieure, en attente de commercialisation ;
  - un biberon, représentatif d'une matière plastique à usage alimentaire, exposé à l'air libre aux retombées de l'accident.

Ce dernier cas ne traite pas de la vulnérabilité d'une filière vis-à-vis d'une contamination. Il s'agit davantage d'un exemple de questionnement qui pourrait émerger en situation post-accidentelle lorsque des enfants sont amenés à vivre dans une zone contaminée. Cet exemple traite ainsi de la sensibilité de l'usage du produit et de la cible concernée (en l'occurrence un nourrisson).

### 2.2.1 Enseignements apportés par l'étude des conséquences des accidents de Tchernobyl et de Fukushima

Les éléments du retour d'expérience de la gestion post-accidentelle de l'accident de Fukushima, renforcés par ceux issus de la gestion de l'accident de Tchernobyl, ont été exploités afin de conférer plus de réalisme à l'étude.

La première étape a consisté à mener une étude bibliographie portant sur les conséquences des accidents nucléaires passés afin d'identifier les situations d'intérêt en relation avec les cinq filières étudiées, à savoir :

- les situations où la contamination de biens manufacturés a conduit à une exposition notable du public ou de professionnels ;
- celles qui ont conduit à la mise en œuvre de dispositions de gestion spécifiques ou à l'adoption de seuils de gestion, au Japon, en Europe et dans les pays de l'Est suite aux accidents de Fukushima et de Tchernobyl.

Pour ce faire, tous types de documents ont été exploités, que ce soit des rapports ou des publications scientifiques, des descriptions de la situation des territoires contaminés réalisées par des organisations non gouvernementales, de même que des coupures de presse ou des articles issus de blogs, révélateurs de la perception des craintes de la population.

L'exploitation des études menées successivement après les accidents de Tchernobyl et de Fukushima a également permis d'avoir un recul de 30 ans sur l'évolution de la contamination dans l'environnement. Ces études sont complémentaires dans la mesure où, dans le cas de l'accident de Tchernobyl, elles offrent aujourd'hui une vision de l'évolution de la contamination à moyen/long termes avec cependant des lacunes sur le court terme que viennent compléter les études réalisées après l'accident de Fukushima. Ceci est particulièrement vrai pour l'étude de l'évolution de la contamination dans les écosystèmes forestiers. L'accident de Tchernobyl a conduit à la contamination de vastes étendues forestières, notamment en Europe du Nord où l'économie du bois est très développée.

Dans la mesure du possible, ce retour d'expérience a donc été exploité pour caractériser l'évolution des radionucléides au sein de la filière bois et dans une moindre mesure, la filière textile, que ce soit pour décrire l'évolution de la

contamination des matières premières dans le temps ou au cours des étapes de transformation. Ces informations ont en particulier été utilisées pour étayer les valeurs de ratio de concentration / dilution retenues dans les évaluations au cours des étapes de transformation. Les données recueillies sont cependant parcellaires dans la mesure où elles ne portent que sur un nombre très restreint de radionucléides, principalement le  $^{137}\text{Cs}$ , le  $^{90}\text{Sr}$  et dans une moindre mesure l' $^{131}\text{I}$  et les isotopes du plutonium.

Enfin, en dernier lieu, les ordres de grandeur des expositions individuelles trouvées dans la littérature pour les situations identifiées ont également servi à valider les ordres de grandeur des impacts calculés par l'IRSN dans le cadre de la présente étude, pour certains radionucléides.

### 2.2.2 Description de l'organisation des filières en France

Dans la présente étude, seules les étapes principales de chacune des filières ont été considérées afin d'illustrer les transformations subies par la matière première initiale pour aboutir au bien manufacturé final. Cinq étapes ont ainsi été distinguées :

- la production primaire, c'est-à-dire l'exploitation forestière ou agricole pour le bois et le lin, et celle des carrières pour les matériaux de construction ;
- les différentes transformations de la matière première regroupant :
  - les industries de première transformation ;
  - les industries de seconde transformation qui conduisent à la fabrication de produit ;
- les étapes de transport ;
- l'usage final du bien manufacturé par les personnes du public ;

En complément, dans la mesure où cette étude s'inscrit dans le cadre général de la gestion d'une situation post-accidentelle, d'autres situations ont été prises en compte, pour illustrer l'exposition des opérateurs en charge des contrôles de contamination des biens manufacturés que les pouvoirs publics pourraient mettre en place dans un contexte de surveillance de leur mise sur le marché.

Le cas d'un parc automobile recouvre les étapes allant de la préparation des automobiles jusqu'à l'usage par un conducteur adulte, en passant par les étapes de transport et de contrôle, avant commercialisation.

Pour le cas des plastiques alimentaires, seul l'usage final est étudié. Le cas traité correspond à celui d'un biberon soumis directement à des dépôts et utilisé pour l'alimentation d'un nourrisson, sans lavage. Ce scénario n'a pas de fondement réaliste et n'a donc qu'une valeur illustrative de l'usage d'un objet sensible.

## 2.3 Description des situations d'exposition retenues

La présente étude n'a pas vocation à décrire chacune des filières dans leur ensemble. Excepté pour le cas particulier des plastiques, l'étude s'attache à identifier les situations d'exposition les plus significatives que ce soit pour les travailleurs ou le public. L'importance des situations à retenir est jugée suivant différents critères :

- l'exposition des personnes aux dépôts initiaux dans le cadre de leur métier ;
- la présence de grandes quantités de matériaux susceptibles d'être contaminés ;
- un temps de présence important à proximité de matériaux contaminés ;
- une étape industrielle pouvant induire une concentration / dilution des radionucléides dans les sous-produits de transformation ;
- un usage et un groupe de population sensible.

Les situations retenues sont décrites de façon aussi réaliste que possible. Pour les situations en milieu professionnel, l'étude s'appuie sur des données descriptives des métiers trouvées dans la littérature ou sur les sites internet interprofessionnels. Sont ainsi pris en compte, dans la mesure du possible, les temps de travail et les quantités de matériaux traitées les plus réalistes. De même les configurations de travail prises en compte dans l'étude sont tirées de cas réels trouvés dans la littérature ou observés lors de visites d'installation.

Pour chacune des situations d'exposition retenues, l'ensemble des voies d'exposition pertinentes ont été prises en compte. Selon les cas il peut s'agir de :

- l'exposition externe aux rayonnements émis par les radionucléides présents sur ou dans le matériau contaminé ;
- l'exposition externe à la peau, pour le cas d'un matériau contaminé à proximité immédiate de la peau ;
- l'inhalation de poussières mises en suspension dans l'air et présentant une contamination ;
- l'ingestion de contamination, dans le cas du scénario « biberon » ;
- l'ingestion involontaire de contamination déposée sur les mains et portée à la bouche.

## 2.4 Définition du terme source

Les évaluations d'impact dosimétrique réalisées dans le cadre de l'étude ont été basées sur les scénarios pris en compte par le CODIRPA. Une trentaine de radionucléides ont été sélectionnés (cf. Tableau n° 1) à partir de quatre scénarios d'accident :

- un scénario d'accident par rupture de tube de générateur de vapeur (RTGV) ;
- un scénario de fusion du cœur maîtrisée en cuve (APRP) ;
- un scénario d'accident grave avec fusion complète du cœur (AG) ;
- et un scénario de rejet de plutonium, par exemple suite à l'accident d'un transport.

<sup>58</sup> Co	<sup>103</sup> Ru+	<sup>129</sup> Sb	<sup>132</sup> Te	<sup>238</sup> Pu
<sup>60</sup> Co	<sup>106</sup> Ru+	<sup>131</sup> I	<sup>134</sup> Cs	<sup>239</sup> Pu
<sup>90</sup> Sr	<sup>110m</sup> Ag	<sup>132</sup> I	<sup>136</sup> Cs	<sup>240</sup> Pu
<sup>91</sup> Sr	<sup>122</sup> Sb	<sup>133</sup> I	<sup>137</sup> Cs+	<sup>241</sup> Pu
<sup>94</sup> Nb	<sup>124</sup> Sb	<sup>129m</sup> Te	<sup>140</sup> Ba+	<sup>241</sup> Am
<sup>95</sup> Nb	<sup>125</sup> Sb	<sup>131</sup> Te	<sup>144</sup> Ce+	
<sup>99</sup> Mo	<sup>127</sup> Sb	<sup>131m</sup> Te	<sup>239</sup> Np	

Tableau n° 1 : Radionucléides considérés dans l'étude

Les calculs ont, dans un premier temps, été réalisés pour un dépôt unitaire de 1 Bq.cm<sup>-2</sup> de chaque radionucléide ou une activité massique de 1 Bq.kg<sup>-1</sup> lorsque la relation entre la contamination surfacique et la contamination massique du produit ne pouvait être simplement établie (cas du bois). Dans un second temps, et à titre d'illustration des conséquences d'un rejet d'un cocktail de radionucléides, les valeurs des dépôts de contamination à 1 km ont été considérées pour les scénarios d'accident grave, d'APRP et de rejet de plutonium. Pour le scénario d'accident grave, des calculs complémentaires ont également été réalisés à partir des dépôts à 2 et à 5 km, dans la mesure où il est réaliste de supposer que les territoires situés à 1 km du site accidenté pourraient avoir fait l'objet d'une mesure d'éloignement et donc ne plus accueillir aucune activité professionnelle (cf. Annexe 1).

Afin d'avoir la meilleure vision de la vulnérabilité des filières, les processus de dilution / concentration des radionucléides ont été considérés dans les évaluations. Ceci conduit à la prise en compte de différents termes source entre l'amont et l'aval des filières.

Enfin, il est à noter que la vraisemblance des situations d'accident nucléaire ou radiologique retenues n'a pas été considérée dans l'étude. L'objectif de l'étude est la description des filières dans des situations de contamination données (unitaire ou pour un spectre de radionucléide donné) et l'évaluation de l'impact dosimétrique correspondant.

## 2.5 Outils de calculs

L'impact dosimétrique associé aux situations d'exposition prises en compte dans l'étude a été calculé par modélisation à l'aide de différents outils :

- Microshield pour ce qui concerne l'exposition externe à distance d'un matériau contaminé et d'autre part le logiciel Varskin [2] et le modèle de l'ICRU 56 [3] pour l'exposition externe bêta à la peau ;
- ASTRAL pour les calculs liés à la forêt ;
- et un modèle IRSN pour l'ingestion involontaire.

## 3 LA FILIERE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION

La filière d'exploitation et de traitement des matériaux de construction a été retenue pour illustrer les enjeux de radioprotection qui pourraient découler de l'extraction de matières premières présentes dans l'environnement et utilisées à des fins de construction, qui seraient susceptibles d'être contaminées par les dépôts consécutifs à un rejet atmosphérique de substances radioactives. Cette situation pourrait aussi bien concerner les travailleurs des différentes industries associées à cette filière que des personnes du public.

A partir d'un cas avéré d'exposition de personnes de la population du fait de la contamination de matériaux de construction suite à l'accident de la centrale de Fukushima Dai-ichi, ce chapitre détaille les différents secteurs concernés et les hypothèses pertinentes à retenir dans le cadre de l'évaluation des conséquences dosimétriques de cette filière.

### 3.1 Enseignements apportés par l'accident de Fukushima

#### 3.1.1 Exemple de la contamination d'un immeuble d'habitation à Nihonmatsu City

En décembre 2011, la municipalité de Nihonmatsu située à environ 70 km à l'ouest de la centrale de Fukushima Dai-ichi, informa le ministère de l'Environnement qu'une étudiante avait reçu une dose cumulée de 1,6 mSv, sur la période de septembre à novembre 2011 [4].

Après investigations, il est apparu que cette personne vivait dans un appartement neuf à l'intérieur duquel des débits de dose supérieurs à ceux de l'environnement avaient été mesurés. Les valeurs de débits de dose rapportées par différents médias sont de l'ordre de 0,9 à 1,2  $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$  au niveau le plus contaminé du bâtiment [5].

L'enquête menée par les pouvoirs publics a montré que la construction de cet immeuble (d'avril à juillet 2011) était concomitante avec l'accident de la centrale de Fukushima Daiichi et que le chantier avait été alimenté par des granulats en provenance d'une carrière située à Namie, à 22 km au nord-ouest de la centrale accidentée.

Juste après l'accident, la zone dans laquelle se trouvait la carrière n'a pas été concernée par les décisions d'évacuation de la population ordonnées par les pouvoirs publics. Ce n'est qu'à compter du 22 avril 2011, que la zone a été déclarée zone d'évacuation délibérée. Entre le 14 mars et 22 avril, la carrière a donc continué de fonctionner et a expédié, selon différentes sources d'information, entre 2000 et 5750 tonnes de granulats vers 19 sociétés. Deux d'entre elles ont reconnu avoir alimenté à elles seules 200 sociétés de travaux publics [5]. Au total, les pouvoirs publics japonais ont identifié 940 chantiers de construction, parmi lesquels 118 présentaient des débits de dose importants [4].

Ces granulats ont ainsi été utilisés pour au moins une soixantaine de résidences ou d'immeubles collectifs, des canaux d'irrigation, une piscine municipale, une route menant à une école ou un parcours de golf ([6]; [7]; [8]). Au moins cinq villes japonaises de la préfecture de Fukushima, dont Nihonmatsu city et Fukushima city sont concernées.



Figure n° 1 : Mesures réalisées par les autorités préfectorales dans la carrière de Namie (20 Janvier 2012) [8]

Lors de l'enquête, des mesures faites fin janvier 2012, au niveau de la carrière, ont montré des débits de dose de l'ordre de  $100 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ . Les niveaux de contamination massiques également relevés sont détaillés dans le Tableau n° 2 ci-dessous :

Tableau n° 2 : résultats des mesures faites le 20 janvier 2012 sur le site de la carrière de Namie ( $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) [4]

Points de mesure		$^{134}\text{Cs}$	$^{137}\text{Cs}$
Aire de stockage abritée	Zone sud	2 780	3 760
	Zone nord	2 740	3 630
	Zone centrale	2 670	3 640
Aire de stockage non abritée	Granulats pour béton	29 800	39 500
	Granulats pour couche de fondation routière	63 900	85 700
Carrières		170 000	226 000
Aire de traitement des sols		840 500	114 000 (*)

(\*) étant donné les ratios de contamination  $^{134}\text{Cs} / ^{137}\text{Cs}$ , cette dernière valeur semble erronée. La valeur de  $1\,140\,000 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  serait plus logique.

Bien qu'il soit impossible de connaître le niveau de contamination exact des granulats ayant servi à la construction de l'immeuble de Nihonmatsu, les valeurs du Tableau n° 2 ne permettent pas à elles seules d'expliquer les débits de dose dans l'immeuble. Des évaluations menées par le Japan Concrete Institute [4] aboutissent à la conclusion qu'en plus de la contamination apportée par les granulats, des aérosols atmosphériques radioactifs ont pu être captés lors de la prise du béton pendant le chantier. Des mesures de débit de dose dans l'air faites au moment de l'accident révélaient alors des valeurs de l'ordre de  $10 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ .

### 3.1.2 Les mesures de gestion adoptées par les autorités japonaises

A la suite de cette affaire, le ministère de l'Industrie japonais publia le 22 mars 2012, soit un an après l'accident, des critères pour l'expédition des roches broyées et des granulats en provenance des carrières. La valeur retenue est de  $100 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  de césium total ( $^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$ ) pour une utilisation pour des projets de construction à usage public, avec un débit de dose maximal en surface de  $0,23 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$  [9].

### 3.1.3 Les enseignements apportés par cette affaire

Cet exemple illustre la vulnérabilité d'une filière en cas d'accident et la vigilance qui serait à apporter. Le cas de la carrière de Namie montre ainsi que même des matériaux entreposés sous abri peuvent être contaminés et que des quantités importantes peuvent être concernées sur un même site.

Par ailleurs cela montre qu'en absence de disposition de contrôle spécifique, des matériaux contaminés avec des niveaux de contamination élevés peuvent essaimer sur un grand nombre de sites et causer des expositions à des niveaux notables. Il est donc nécessaire d'anticiper de telles situations en identifiant les installations industrielles vulnérables situées autour des installations nucléaires et en assurant un contrôle de la commercialisation et de la circulation de ces matériaux en cas d'accident.

Dans une approche par anticipation, il serait nécessaire de considérer tous les matériaux de construction susceptibles d'être extraits de l'environnement, et non seulement le béton et ses composants.

## 3.2 Description de la filière « matériaux de construction » en France

### 3.2.1 Les matériaux concernés

Le Tableau n°3 ci-dessous présente les principaux matériaux de construction utilisés en France et dont la fabrication implique des matières premières extraites de l'environnement.

Tableau n°3: Principaux matériaux de construction exploités en France

Catégories de matériaux de construction	Constituants primaires	Matériaux
Granulats	Sables, gravillons, graves	
Ciment	Argiles, roches calcaires Gangue silico-calcaire du minerai de fer et fondant calcaires issus des hauts fourneaux Cendres issues de la combustion des charbons schisteux brûlés en centrales thermiques Cendres issues du recyclage de déchets en cimenteries	Clinker Laitier Cendres volantes
Plâtre	Gypse naturel Gypse naturel	Plâtre en poudre Éléments de préfabrication : Plaques de plâtre, carreaux de plâtre
Matériaux de terre cuite	Argiles	Briques, tuiles, éléments pour plancher, conduits de fumée, bardages, carreaux,...
Béton		Granulats, Ciment, Eau et adjuvants
Pierre	Pierre naturelle	Pierres de gros œuvre, pierres de parement, revêtements muraux, revêtements de sol, revêtements de sol de voirie,...
Bois		Bois d'œuvre et bois panneaux
Matériaux bio-sourcés	Chanvre, paille, lin,...	Fibres végétales, ouate de cellulose et produits connexes du bois

Le cas de la pierre naturelle n'a pas été analysé dans le cadre de cette étude. De par sa nature solide, une éventuelle contamination radioactive ne concernerait en effet que la surface du matériau. Par ailleurs, dans la mesure où les pierres naturelles sont généralement retaillées sur le site de leur extraction, il est apparu que l'export de contamination radiologique serait vraisemblablement faible en comparaison des autres secteurs de production de matériaux de construction. L'utilisation du bois et des matériaux bio sourcés à des fins de construction n'est pas traitée dans ce chapitre. Des scénarios d'exposition impliquant l'usage du bois en tant que matériau de gros œuvre est traité dans le chapitre relatif à la filière bois. De même, le cas de matériaux isolant bio-sourcés est pris en compte dans le chapitre relatif à la filière lin.

### 3.2.2 Les étapes de la filière

#### 3.2.2.1 **L'extraction des matières premières**

##### a. Les différents types d'exploitation

Il existe différents types de carrières classées selon le type d'exploitation ou les formations géologiques exploitées. L'exploitation peut se faire :

- à ciel ouvert
- sous eau, soit à proximité d'un cours d'eau, soit en milieu marin ;
- par des installations souterraines.

Dans la présente étude, seul le cas des installations à ciel ouvert, particulièrement vulnérables à une éventuelle contamination atmosphérique est traité.

*NB : Il est à noter que l'exploitation de matières premières sous eau pourrait également entraîner une contamination des matériaux extraits dans la mesure où la contamination déposée à la surface de l'eau ou rejetée dans l'eau pourrait sédimenter sur le fond et être remobilisée lors du dragage des matériaux. Cependant, étant donné la complexité de ces phénomènes de sédimentation et de la dilution qui pourraient survenir lors de l'extraction des matériaux, la caractérisation d'une éventuelle contamination radioactive serait aléatoire. Par ailleurs les phases ultérieures d'exploitation des matériaux étant similaires à celles d'une installation à ciel ouvert, le cas de l'extraction sous eau n'a pas été détaillé plus avant dans le reste du document.*

Pour ce qui est des installations à ciel ouvert, deux types d'exploitation peuvent être distingués :

- les carrières de roches meubles qui exploitent les gisements de sables et granulats. Ces roches meubles ont été déposées dans les vallées fluviales anciennes, soit dans le lit majeur (zones potentiellement inondables) soit sur d'anciennes terrasses. Il peut s'agir de sables, de granulats, d'argiles,... ;
- les carrières de roches massives qui exploitent des roches « dures » qui rassemblent :
  - d'une part, les roches calcaires qui constituent le Bassin parisien et le Bassin aquitain et qui sont également présentes dans certaines zones montagneuses ;
  - d'autre part, les roches éruptives et métamorphiques présentes dans les massifs montagneux anciens (comme le Massif armoricain, le Massif central ou les Vosges) et dans les massifs récents (comme les Alpes et les Pyrénées).



##### b. Les différentes étapes de l'exploitation

Dans le cas des roches massives, les matériaux doivent être préalablement désolidarisés de la roche hôte par forage ou par tir de mines. Que ce soit pour les roches meubles ou massives, l'extraction est ensuite réalisée à l'aide d'engins de travaux publics tels que des pelles mécaniques ou des bulldozers. Les matériaux extraits sont ensuite transportés vers les aires de traitement à l'aide de camions adaptés au transport de grandes quantités de matériaux en vrac (jusqu'à 50 tonnes). Afin de répondre aux besoins des différents clients, les matériaux peuvent être broyés ou concassés, triés par criblage et éventuellement lavés avant entreposage sur des aires de stockage (Figure n°2). L'entreposage peut se faire

soit à l'air libre, soit sous abri, soit en silos (cf. Figure n°3). La dernière étape consiste à expédier les matériaux vers les différents clients, par transport routier, par voie fluviale ou par chemin de fer.



Figure n° 2 : Principales étapes de l'extraction de matériaux en carrières à ciel ouvert



Figure n°3 : Installations d'entreposage de matériaux extraits des carrières

c. Les principaux métiers concernés

Les métiers concernés par l'exploitation en carrière peuvent être regroupés en trois catégories (source UNICEM [10]) :

- les travailleurs dont l'activité se déroule en majorité sur le terrain : foreur / mineur, carrier et chef de carrière ;
- Les conducteurs d'engins de carrières, en charge des opérations d'extraction, de chargement, de transport : - leur activité se déroule essentiellement au poste de pilotage de leur engins, généralement climatisé.

- les agents d'exploitation en charge de la gestion des stocks ou de la maintenance dont les activités sont mixtes, en partie sur le terrain et en partie dans des bâtiments.

#### d. Vulnérabilité en cas d'accident radiologique ou nucléaire

En cas de contamination de la carrière suite à des retombées atmosphériques, une source d'exposition importante serait l'environnement lui-même contaminé ainsi que les matériaux susceptibles d'avoir subi les dépôts. Outre la contamination de l'environnement, le principal risque en carrière correspond à l'exposition aux poussières. Selon un guide réalisé sous l'égide de l'UNICEM [11] (Union nationale des industries de carrières et matériaux de construction), des études réalisées en 1998 ont permis d'observer des empoussièrtements de l'air allant de 1 à 10 mg.m<sup>-3</sup>. Ce guide propose par ailleurs une classification des sources d'émission de poussières, synthétisée dans le Tableau n°4 ci-dessous.

**Tableau n° 4 : Risques poussières associés aux postes de travail en carrière**

Sources d'émission modérée	Sources d'émission importante	Sources d'émission très importante
Décapage, Transport par convoyeur, Foration, Minage, Lavage	Transport par verse Stockage/ déstockage Evacuation des matériaux	Circulation des engins et tombereaux en carrière Concassage Criblage

**NB :** Pour les besoins de la présente évaluation, une valeur d'empoussièrtement de 1 mg.m<sup>-3</sup>, en moyenne a été retenue pour les personnes travaillant en extérieur et de 0,1 mg.m<sup>-3</sup> pour les personnes travaillant sur des engins climatisés.

Déoulant du risque dû aux poussières, l'ingestion involontaire de particules déposées sur la peau, par exemple par contact main / bouche est également à prendre en compte.

#### 3.2.2.2 Les industries de première transformation

Ce sont les industries qui transforment les matières premières extraites des carrières afin de produire des matériaux plus complexes. Le transport étant une étape coûteuse et pénalisante en termes de temps dans ces filières, les industries de première transformation sont généralement situées dans l'environnement immédiat des carrières d'exploitation. Trois cas principaux peuvent être distingués :

##### a. La fabrication des matériaux de terre cuite

Les matériaux de terre cuite sont largement utilisés dans le bâtiment. Ils sont fabriqués à partir d'argiles naturelles communes généralement associées en mélange. Il s'agit principalement des briques et des tuiles, mais également des produits tels que les bardages, les conduits de cheminées ou les carreaux rustiques. La fabrication de ces matériaux est généralement hautement automatisée, ce qui limite les besoins de personnels, en dehors des opérations de supervision, de gestion des stocks et de transport.

Les principales étapes du procédé de fabrication sont les suivantes [12] :

- la préparation comprend deux opérations principales, le mélange initial des argiles avec d'éventuels additifs et de l'eau et le broyage / malaxage pour homogénéiser le mélange argileux et lui conférer la plasticité nécessaire au moulage ;

<sup>1</sup> La valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP) pour les poussières inhalables est de 10 mg.m<sup>-3</sup>

- les opérations de façonnage et/ou de moulage des matériaux : cette étape consiste à pousser le mélange argileux à travers une filière de géométrie donnée à l'aide d'une vis sans fin. A la sortie, les pièces sont découpées transversalement avec un fil pour les briques. Pour les tuiles et certains carreaux, la forme finale est donnée par une presse avec des moules en plâtre, en caoutchouc ou en acier selon le produit.
- le séchage intermédiaire : ce procédé a pour but d'éliminer la presque totalité de l'eau qui a permis le façonnage. ;
- la cuisson confère au matériau ses principales propriétés de résistance mécanique, de porosité, de résistance au gel, et d'absorption d'eau ;
- le conditionnement et l'emballage en attente d'expédition.

Ces différentes étapes sont représentées sur la Figure n° 4 ci-dessous :

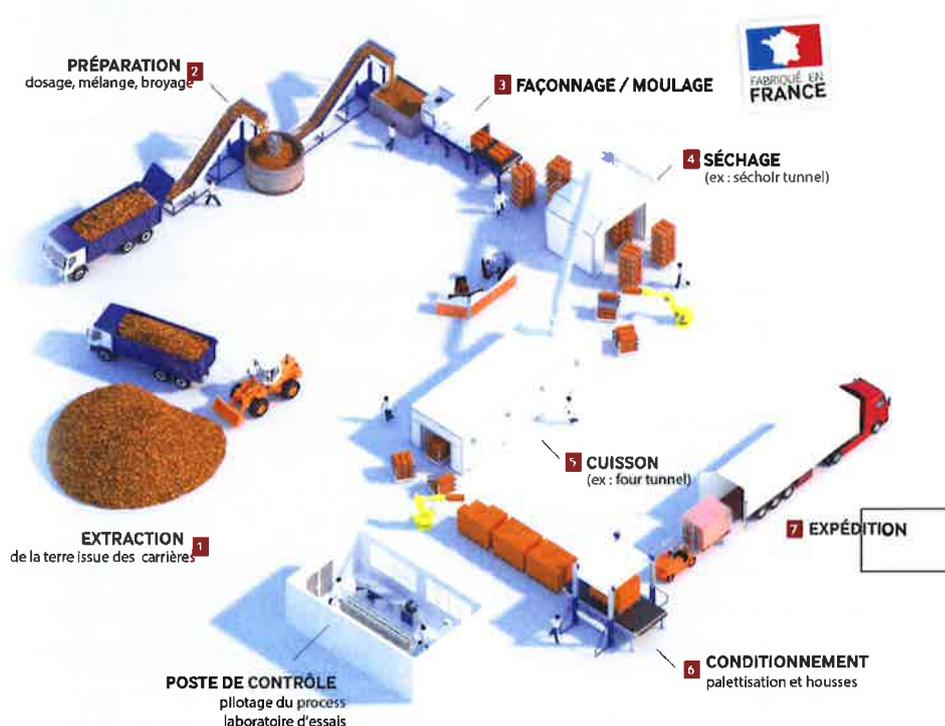


Figure n° 4 : Etapes de fabrication des matériaux de terre cuite (source : site internet monomur.com)

#### b. La fabrication du ciment

Le constituant principal des ciments est le clinker obtenu à partir de la cuisson d'un mélange approprié de calcaire et d'argile, en proportion respectivement moyenne de 80 % et 20 %.

Les grains de calcaire et d'argile sont intimement mélangés par broyage, dans des proportions définies, en un mélange très fin, le « cru ». À ce niveau, des corrections de composition peuvent être effectuées en incorporant, en faible proportion, de la bauxite, de l'oxyde de fer, etc. Le mélange cru est préparé automatiquement en fonction de la technique de fabrication utilisée.

Le mélange est très finement broyé dans des broyeurs / sécheurs qui éliminent l'humidité résiduelle et permettent d'obtenir une poudre présentant la finesse requise.

Ce mélange cru est ensuite introduit dans un four horizontal rotatif de 50 à 90 m de long, de 4 à 5 m de diamètre, légèrement incliné. La matière pénètre à l'amont du four (en partie haute) où s'achève la décarbonatation, et progresse jusqu'à la zone de clinkerisation (chauffée environ à 1 450 °C). Sous l'effet de la chaleur, les constituants de l'argile se combinent à la chaux provenant du calcaire.

À la fin de la cuisson, la matière brusquement refroidie se présente sous forme de granules qui constituent le clinker. Celui-ci, finement broyé avec du gypse (moins de 5 %) pour régulariser la prise, donne le ciment Portland, formulation la plus classique [13].

*NB : la filière cimentière contribue à valoriser des sous-produits industriels qui seraient traités comme déchets en absence de débouchés. C'est le cas des cendres issues de la combustion (exemple des déchets de bois) ou des boues de stations d'épuration. Le retour d'expérience des accidents de Tchernobyl et de Fukushima a montré que l'addition de ces sous-produits au ciment peut entraîner une contamination du ciment lorsque ces produits proviennent de territoires affectés par un accident. Ces sources de contamination n'ont cependant pas été étudiées dans le cadre de la présente évaluation.*

D'autres matériaux tels que le plâtre ou la chaux sont fabriqués à partir de matières premières extraites de l'environnement (cf. Tableau n° 3). Dans la mesure où leur procédé de fabrication est comparable à celui du ciment, dans son principe, ces cas ne seront pas développés dans la présente étude.

### c. Les principaux métiers concernés

Que ce soit pour les matériaux de terre cuite ou pour le ciment, les procédés de fabrication sont mis en œuvre dans des installations largement automatisées. Les postes de travail qui ont donc été retenus dans la présente étude pour caractériser les industries de première transformation correspondent au cas des personnels en charge du contrôle du procédé (technicien d'exploitation), de la manutention des matériaux fabriqués (cariste) ou du transport des produits finis vers les clients (conducteur de poids lourds).

### 3.2.2.3 Les différents usages en chantier de travaux publics

Les matériaux de construction sont utilisés quotidiennement dans la construction des voies de circulation, les ouvrages d'art et de génie civil ou encore les fondations et l'ossature des bâtiments. Ils peuvent être soit utilisés bruts, soit transformés ou associés à d'autres. En complément des matériaux de terre cuite, le béton, mélange de ciment de granulats et d'eau principalement, reste le matériau le plus utilisé [14].

Les granulats, sont des constituants essentiels des routes et autoroutes. Ils sont utilisés pour la réalisation des assises de chaussées mais aussi dans les enrobés de la surface roulée. Ils entrent également, avec les calcaires, dans la composition des bétons des chaussées, terre-pleins centraux, bordures de trottoirs, voiries piétonnes ou pistes cyclables.

Le béton et les briques de terre cuite sont les matériaux les plus classiques pour la construction en bâtiment. Ils interviennent aussi bien dans les fondations, les structures ou la couverture des bâtiments.

La Figure n° 5 ci-dessous illustre les quantités de granulats intervenant dans les principaux types de chantiers (source <http://www.granulats-vcicat.fr>). Ces valeurs ont été utilisées pour dimensionner les calculs d'impact présentés plus loin.

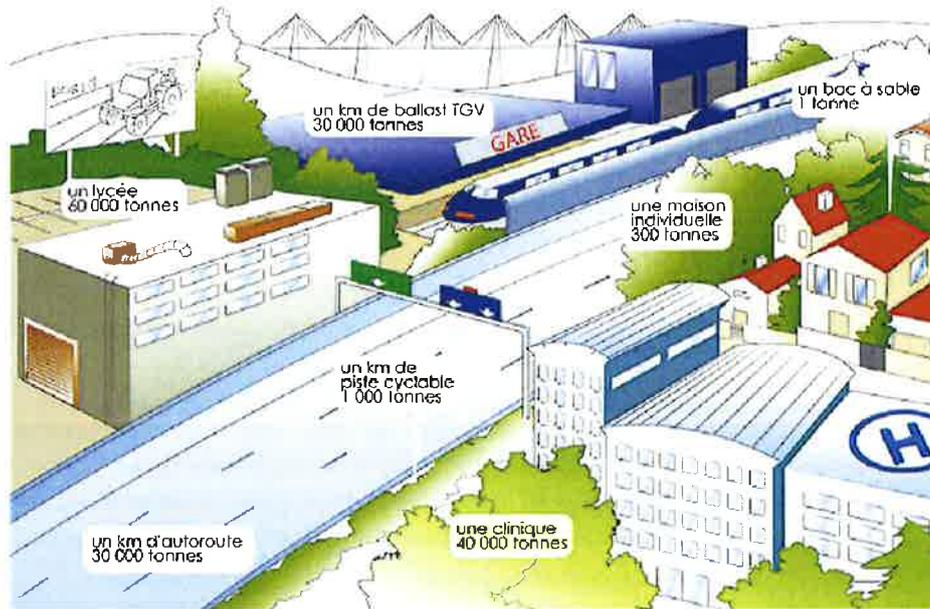


Figure n° 5 : Quantités de granulats utilisées dans les grandes catégories de chantier

a. Autres usages non couverts par la présente étude

Certaines matières minérales extraites de l'environnement sont également exploitées de façon industrielle en tant que constituant de base ou de compléments dans les processus de fabrication de nombreux secteurs industriels tels que la céramique, la verrerie, l'automobile, l'agriculture en passant par le médical et l'informatique.

Mêmes si les quantités exploitées par ces filières sont faibles en regard de celles de l'industrie de la construction, il n'en reste pas moins que ces secteurs pourraient être impactés en cas de contamination radioactive de l'environnement.

### 3.3 Impact dosimétrique associé aux différentes étapes de la filière

#### 3.3.1 Situations d'exposition retenues

Le Tableau n°5 ci-après détaille les situations d'exposition retenues pour la filière des matériaux de construction ainsi que les principales hypothèses correspondantes.

Source d'exposition	Carrière / Mineur	Chargement	Gestion des stocks	Transport	Technicien usine de briques	Gestion des stocks / Cariste	Transport de briques	Transport de ciment	Gestion des stocks de ciment	Chantier de construction Briques	Chantier de construction béton	Habitation en Briques	Habitation en béton	Piste cyclable	Bac à sable	
	Dépôts aux sols	Dépôts aux sols	Dépôts aux sols	Dépôts aux sols	Briques contaminées sur la chaîne de production	Palettes de briques contaminées	Palettes de briques contaminées	Sacs de ciment contaminés	Sacs de ciment contaminés	Murs en briques contaminées	Murs et dalles en béton contaminés	Murs et toit de tuiles contaminés	Murs, plancher et plafond en béton contaminé	Murs, plancher et plafond en béton contaminé	Granulats contaminés sous une couche d'asphalte	Sable contaminé
	Dépôts aux sols contaminés (1 mg.m <sup>-3</sup> à l'extérieur)	Stock de matériaux contaminés Poussières (0,1 mg.m <sup>-3</sup> dans la cabine)	Stock de matériaux contaminés Poussières (1 mg.m <sup>-3</sup> à l'extérieur)	Stock de matériaux contaminés Poussières contaminées	Adulte	Adulte	Adulte	Adulte	Adulte	Adulte	Adulte	Adulte	Adulte	Adulte	Enfant de 1-2 ans	
	Exposition externe	Présence dans une cabine de conduite :	Exposition externe Inhalation de poussières	Exposition externe Inhalation de poussières	Exposition externe	Exposition externe	Exposition externe	Exposition externe	Exposition externe	Exposition externe	Exposition externe	Exposition externe	Exposition externe	Exposition externe	Exposition externe	Exposition externe
	Inhalation de poussières contaminées	Inhalation de poussières contaminées	Inhalation de poussières contaminées	Inhalation de poussières contaminées	Exposition externe	Exposition externe	Exposition externe	Exposition externe	Exposition externe	Exposition externe	Exposition externe	Exposition externe	Exposition externe	Exposition externe	Exposition externe	Exposition externe
	Ingestion involontaire de poussières contaminées par contact main bouche	Ingestion externe involontaire de poussières contaminées par contact main bouche	Ingestion involontaire de poussières contaminées par contact main bouche	Ingestion involontaire de poussières contaminées par contact main bouche	Exposition externe	Exposition externe	Exposition externe	Exposition externe	Exposition externe	Exposition externe	Exposition externe	Exposition externe	Exposition externe	Exposition externe	Exposition externe	Exposition externe
	1 an	1 an	1 an	1 an	1 an	1 an	1 an	1 an	1 an	1 an	1 an	1 an	1 an	1 an	1 an	1 an
	200 jours	200 jours	200 jours	200 jours	200 jours	200 jours	200 jours	200 jours	200 jours	50 jours/an	50 jours/an	365 jours	365 jours	365 jours	100 jours/an	100 jours/an
	4 h/jour à l'extérieur + 4 h/jour dans un bâtiment modulaire	8 h/jour	8 h/jour	4 h / jour	4 h / jour	8 h / jour	6 h / jour	8 h / jour	8 h / jour	8 h / jour	8 h / jour	16 h / jour	16 h / jour	1 h / jour	1 h / jour	1 h / jour

Tableau n° 5 : Situations d'exposition prises en compte pour l'évaluation de l'impact dosimétrique associé à la filière des matériaux de construction

### 3.3.2 Hypothèses sur le comportement des radionucléides de l'amont vers l'aval de la filière

Pour évaluer la propagation de la contamination de l'amont vers l'aval de la filière, les hypothèses suivantes ont été considérées :

- il est supposé que, au niveau de l'extraction, le passage d'une contamination surfacique à une contamination massique se fait par mélange de la contamination déposée sur 1 m<sup>2</sup> de surface, dans un volume de 1 m<sup>3</sup> correspondant au volume d'un godet d'un engin de chantier.
- pour la fabrication des matériaux de terre cuite, il est supposée que la cuisson du mélange initial d'argile entraîne une augmentation de la contamination de 10 % correspondant aux pertes en eaux ;
- la contamination du ciment est calculée en prenant en compte la dilution par le mélange de l'ensemble de ses constituants ;
- la contamination du béton est calculée en considérant la contamination initiale du ciment et des granulats composant le mélange.

### 3.3.3 Résultats des évaluations

Les calculs pour un dépôt unitaire de 1 Bq.cm<sup>-2</sup> par radionucléide sont présentés en Annexe 3. La Figure n°6 présente les résultats des calculs d'impact dosimétrique pour les scénarios APRP, rejet de plutonium et accident grave.

Pour ces trois accidents, il apparaît que l'impact le plus significatif correspond aux postes de travail occupés au niveau de la carrière. Les doses les plus importantes sont observées pour le scénario plutonium du fait du risque poussières important dans cet environnement et de l'ingestion involontaire associée. Le fait que pour les trois scénarios couvrant les activités d'extraction, l'impact dosimétrique soit significativement plus élevé que pour les autres scénarios s'explique par la concomitance de l'exposition à la contamination de l'environnement due aux dépôts initiaux et à la contamination des matériaux extraits du site.

En aval de la carrière, il apparaît que les doses calculées sont au moins un à deux ordres de grandeur plus faibles, à l'exception du cas des scénarios de gestion des stocks et d'habitation. Ces deux scénarios ont la particularité de cumuler des temps d'exposition importants à proximité de fortes quantités de matériaux contaminés pour les individus pris en compte.

*NB : Pour le scénario « habitation en béton » un calcul comparatif a été fait avec les doses mesurées chez un habitant d'un appartement construit avec du béton contaminé à Nihonmatsu. Il apparaît que les résultats de la présente étude sont en concordance avec les doses mesurées à Nihonmatsu, compte tenu de la gamme d'activité des granulats observée dans la carrière de Namie.*

Pour l'ensemble des situations prises en compte en aval de l'extraction, la voie d'exposition principale est l'exposition externe. Il en ressort que les doses correspondantes pour un rejet de plutonium sont négligeables pour ces situations.

Si l'on se réfère au cas de la carrière de Namie et aux exemples traités ici, il apparaît que malgré des quantités significatives de matériaux contaminés concernées, l'impact sur le public resterait modéré, voire faible selon les usages, exception faite du cas d'une habitation construite à partir de matériaux contaminés.

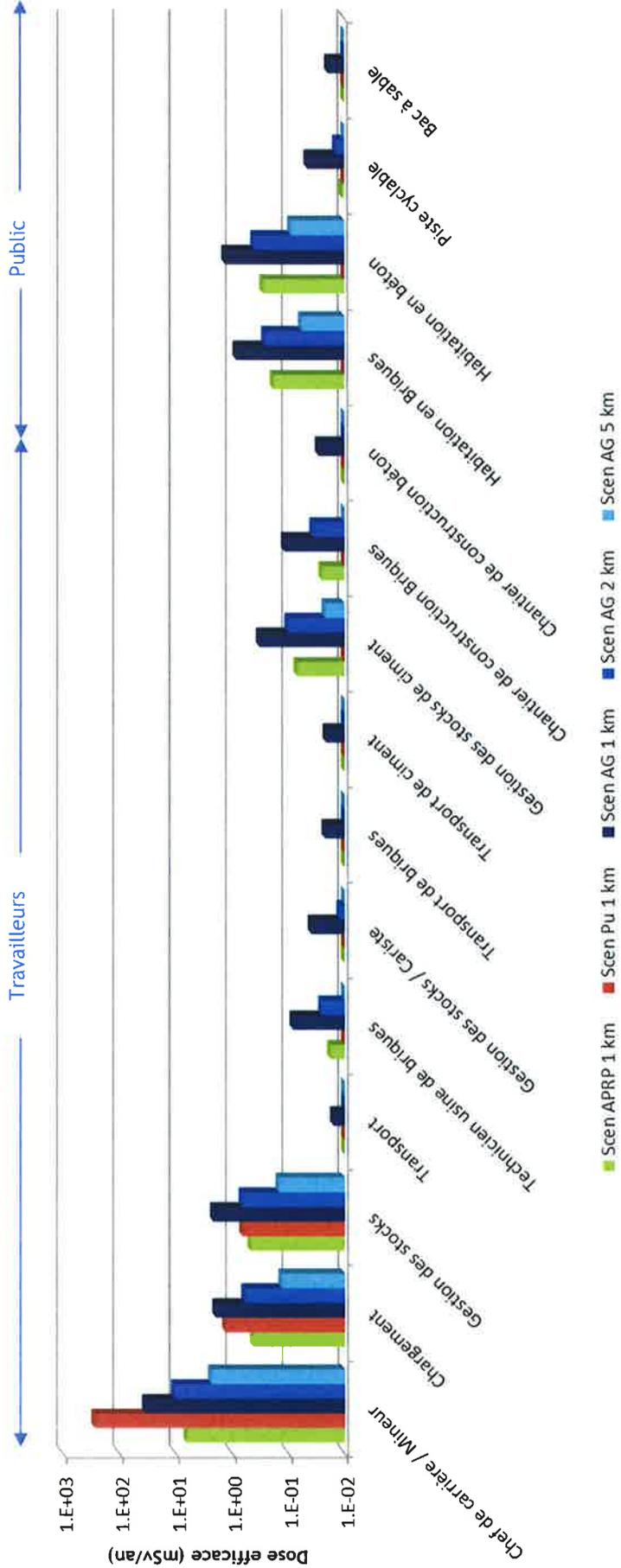


Figure n° 6 : Doses efficaces totales associées aux situations d'exposition de la filière matériaux de construction

## 4 LA FILIERE TEXTILE : EXEMPLE DU LIN

L'exemple de la filière linicole a été retenu dans la mesure où la culture du lin est la seule culture à des fins textiles qui soit fortement développée en France. La France est ainsi le premier producteur européen et mondial de lin en termes de tonnage (source : Industrie Française du Lin <http://www.usrtl-ifl.fr/>). Les cultures de lin sont principalement localisées dans des régions françaises sous le vent d'installations nucléaires :

- dans les hauts de France, principalement dans le Pas-de-Calais ;
- en Normandie, dans les départements de Seine-Maritime, Eure et Calvados ;
- en Picardie, dans la Somme et dans l'Oise ;
- à l'est de l'Île de France, en Seine et Marne.

### 4.1 La filière Lin en France

#### 4.1.1 Description de la plante

Le lin est une plante annuelle à croissance rapide, dont la tige peut aller jusqu'à 1 m de hauteur au bout d'une centaine de jours. C'est la paille, c'est-à-dire la tige une fois séchée, qui donne les fibres textiles. Ces fibres sont situées dans la zone périphérique de la tige. La séparation des fibres de lin du reste de la paille produit des résidus, appelés anas. Le lin est également cultivé pour ses graines. La culture du lin a comme particularité que toutes les parties aériennes de la plante, les fibres, les anas et les graines, sont valorisées. Parmi les fibres, seules les fibres longues sont valorisées dans la filière textile. Les fibres plus courtes sont destinées à d'autres usages. Un hectare de lin produit environ 7 tonnes de paille. Le Tableau n°6 ci-dessous présente les rendements par hectare des différents sous-produits de la paille de lin.

Tableau n°6 : Rendements moyens des sous-produits du lin

Produit et co-produits	Rendement moyen (kg.ha <sup>-1</sup> )	Composition moyenne de la récolte
Lin teillé (fibres longues)	1600	15-25 %
Étoupes (fibres courtes)	650	8-15 %
Anas (résidus de paille)	4 100	45-52 %
Graines	650	5-10 %

Source : <http://www.coopdefrance.coop/fr/41/lin/>

#### 4.1.2 La production agricole

##### 4.1.2.1 *Caractéristiques des exploitations agricoles productrices de lin*

En Normandie, dans le pays de Caux, zone où la production du lin est la plus développée en France, les exploitations agricoles linicoles couvrent une centaine d'hectares (Source Agreste). Le lin n'est pas cultivé plusieurs années de suite sur une même parcelle, mais par rotation sur 5 ou 6 ans.

*Nb : Dans la présente étude, les scénarios correspondant à la production agricole ont été dimensionnés sur cette taille moyenne d'exploitation.*

#### 4.1.2.2 Du semis à la floraison

Semé au Printemps, entre le 15 mars et le 15 avril, le lin met 100 jours à lever. La floraison, stade auquel les fibres ont atteint leur longueur maximale, intervient autour du 15 juin.

#### 4.1.2.3 L'arrachage et le rouissage

La maturité de la récolte se situe environ 5 semaines après la floraison, soit entre mi-juillet et début août. Une fois arrachée, les plantes sont déposées au sol en andains (nappe de lin d'une largeur de 1 m). Première phase naturelle de transformation de la plante en fibre, le rouissage correspond à la dissociation des parties fibreuses de la plante qui facilitera ultérieurement l'extraction des fibres de lin. C'est l'alternance de pluie et de soleil qui permet au lin de rouir. Cette étape peut durer de 2 semaines à 3 mois (de juillet à septembre) en fonction des conditions climatiques et des exigences industrielles

#### 4.1.2.4 La récolte

A la fin du rouissage, lorsque les pailles sont suffisamment sèches, elles vont être enroulées et pressées en balles rondes ou rectangulaires, puis elles seront stockées à l'abri sur le site des exploitations agricoles en attente de leur transformation. Le stockage sur le site de l'exploitation peut durer jusqu'à un an.

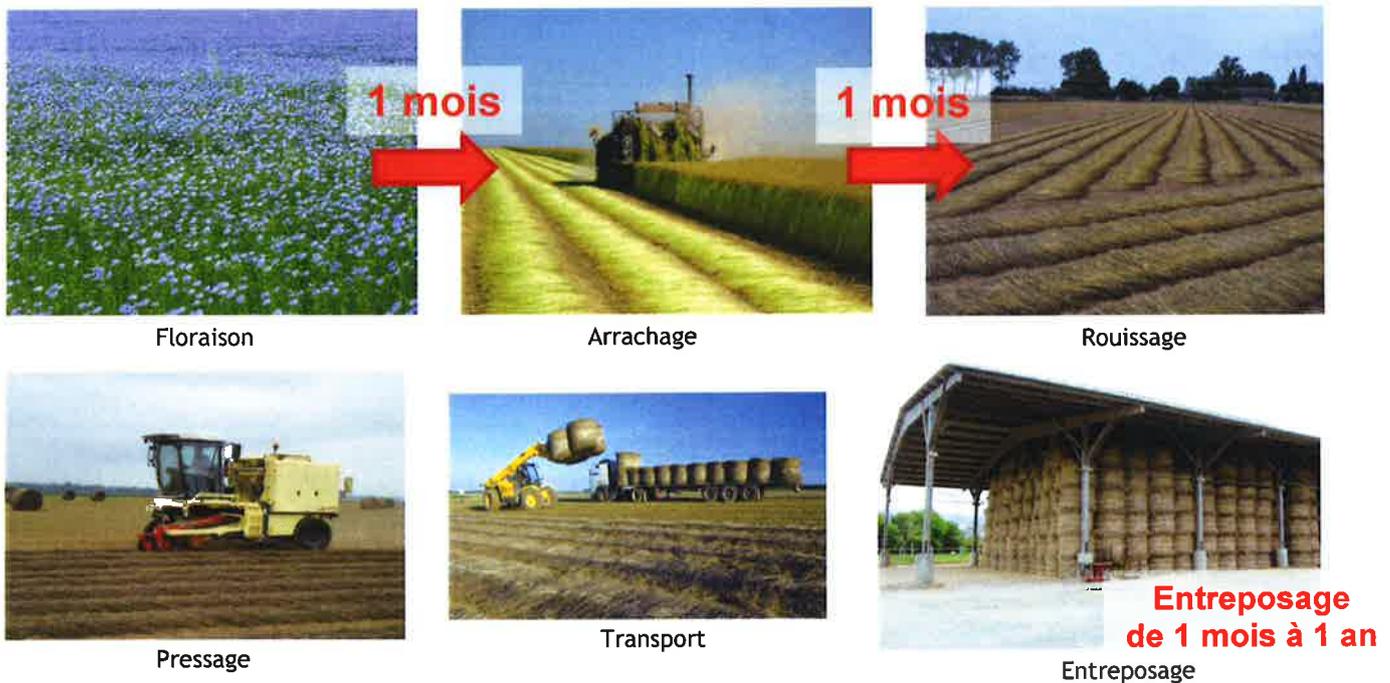


Figure n°7 : Principales étapes de la production agricole du lin

#### 4.1.3 La valorisation du lin et de ses sous-produits

##### 4.1.3.1 L'industrie de première transformation

Après la récolte, les pailles de lin sont travaillées tout au long de l'année dans les usines de teillage. Ces usines sont organisées sous forme coopérative à proximité des exploitations agricoles. Elles prennent en charge les récoltes de

différents producteurs à une échelle locale. Cette première transformation de la paille a pour but d'extraire les fibres des tiges rouies. La Figure n°8 détaille les différentes étapes du procédé de teillage.

Les adhérents livrent leur lin à l'usine sous forme de balles de 260 kg. Chaque parcelle est identifiée et donnera un numéro de lot au teillage. A réception, les balles sont étalées à plat. Les opérateurs contrôlent manuellement l'épaisseur de la nappe afin d'assurer un teillage régulier. Les opérations de teillage elles-mêmes sont mécanisées. Les fibres longues y sont séparées des étoupes, des anas et des graines. Au bout de la chaîne, des opérateurs effectuent un tri des matières pour obtenir des lots de fibres homogènes. Le lin teillé est alors conditionné en balles rondes d'environ 100 kg.

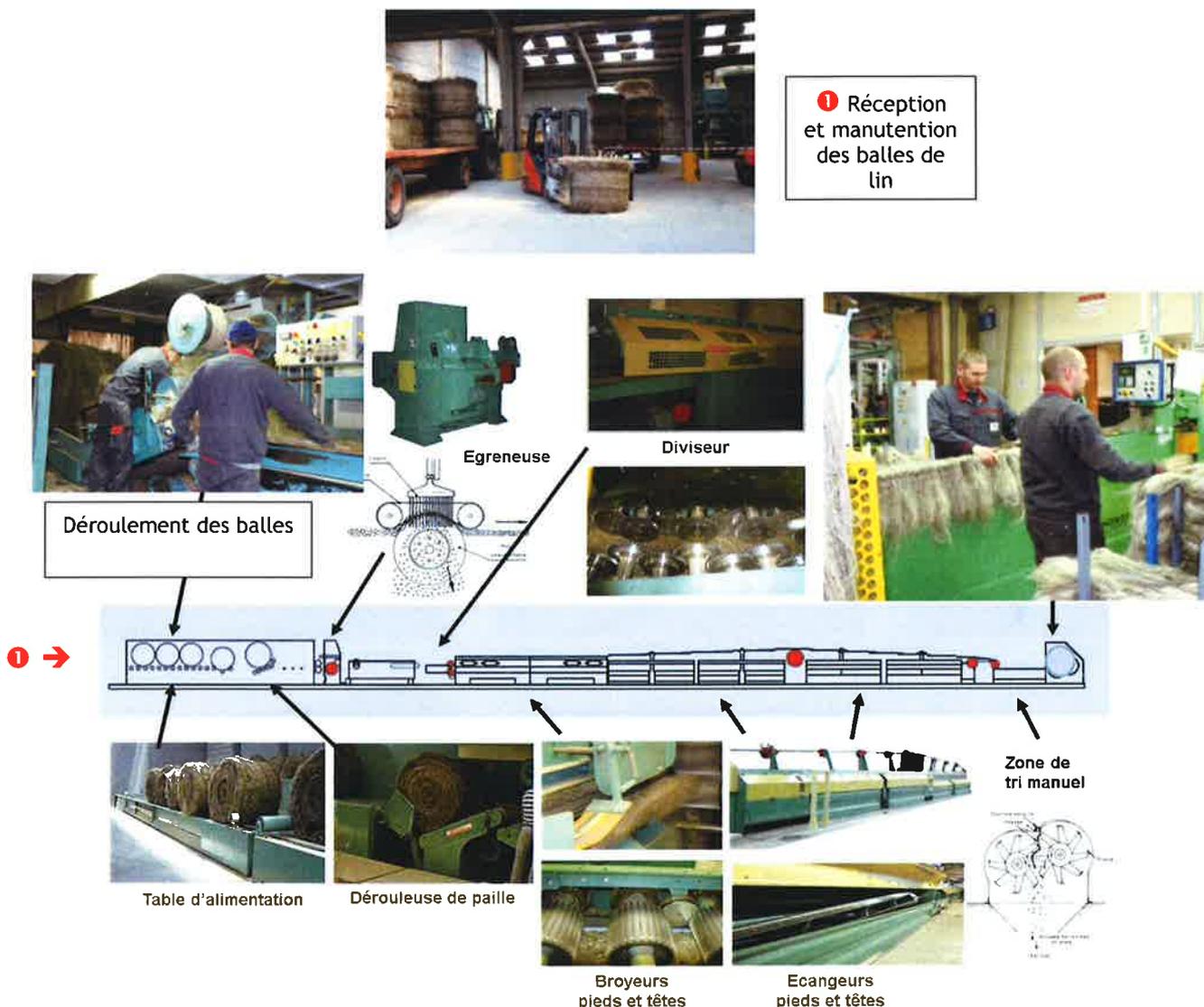


Figure n°8 : Les étapes du teillage du lin - Exemple de la coopérative Terre de Lin de Saint-Pierre Le Viger

#### 4.1.3.2 Les industries de seconde transformation

La filière lin est extrêmement ramifiée comme le montre la Figure n°9 ci-dessous. Pour ce qui concerne la partie textile cependant, la filature et dans une grande partie les étapes de tissage ne sont que très peu représentées en France, voire en

Europe. La majeure partie des fibres de lin teillées sont exportées vers la Chine qui produit la majorité du fil et des vêtements en lin.

Un hectare de lin produit environ 20 000 km de fil, soit l'équivalent de 2 200 chemises (source Agreste).

Dans le cadre de la présente étude, seuls des scénarios d'utilisation de textiles en lin contaminés (port d'une chemise en lin et lit paré de draps en lin) ont été analysés pour illustrer le cas des industries textiles.

Les fibres de lin sont également valorisées au travers de produits technologiques. Ces différents cas n'ont cependant pas été traités dans la présente étude.

Enfin, les résidus de production des fibres de lin sont également valorisés au travers de la filière. Les anas servent à concevoir des matériaux d'isolation pour les habitations et sont aussi valorisés en horticulture ou comme litière pour les animaux.

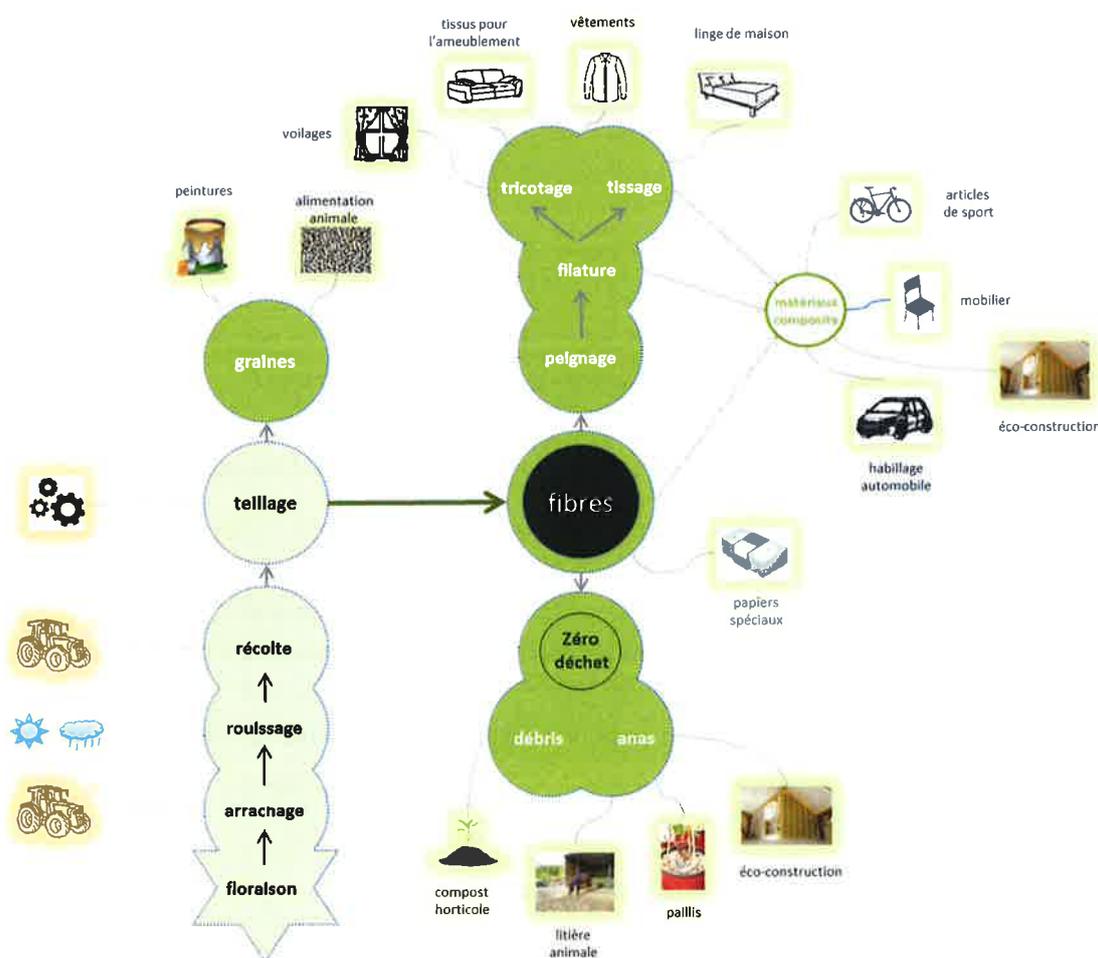


Figure n°9 : La filière lin (d'après le site internet [www.mastersoflinen.com](http://www.mastersoflinen.com) )

## 4.2 Enseignements tirés des accidents nucléaires passés

### 4.2.1 Radioécologie du lin

#### 4.2.1.1 *Comportement du césium dans la plante*

Le lin est une plante faiblement accumulatrice de césium en comparaison des céréales [15], par rapport à la contamination déposée sur le sol ou présente dans le sol. Au sein de la plante, le césium se répartit préférentiellement au niveau des feuilles et de la tige et dans une moindre mesure dans les graines. La répartition du césium entre la paille et les fibres se fait de façon approximativement équivalente, mais à des niveaux sensiblement plus faibles que dans le reste de la tige [16]. A contrario, le  $^{90}\text{Sr}$  a tendance à pénétrer plus facilement dans la plante, en particulier dans la paille [17], par transfert depuis le sol.

Pour ce qui concerne le césium, ces résultats ont conduit à considérer que le lin pouvait être une alternative intéressante aux grandes cultures céréalières en milieu contaminé [18].

Le Tableau n° 7 ci-dessous présente un ordre de grandeur des facteurs de transfert mesurés pour le  $^{137}\text{Cs}$  dans le lin [18].

Parties de la plante	Facteur de transfert dépôt au sol-plante ( $\times 10^{-3} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ )
Tige	2.8
Paille	0.042
Fibre	0.06
Graines	0.53
Feuilles	2.7

Tableau n° 7 : Facteurs de transfert sol-lin pour le césium

#### 4.2.1.2 *Comportement du césium lors des opérations de transformation du lin*

Les travaux de Vandenhove et al [18] ont été poursuivis jusqu'à l'évaluation du comportement du césium lors des opérations de teillage. Il apparaît que 95 % du césium sont éliminés lorsque le teillage est mené sous eau, c'est-à-dire lorsque les fibres sont séparées après macération dans l'eau. En France, les opérations de rouissage sont menées par voie sèche. Il sera donc supposé que le césium persiste intégralement dans la plante, hypothèse vraisemblablement pénalisante. Ces résultats suggèrent également que le césium est facilement éliminé en milieu aqueux. Ceci pourrait suggérer que lors du rouissage, le césium pourrait également être en partie éliminé du fait de la pluie. En absence d'information pour les autres radionucléides et de quantification pour le césium, il sera supposé, ici encore, que le césium et les autres radionucléides persistent dans la plante lors de cette étape.

#### 4.2.1.3 *Extrapolation des résultats à la présente étude*

Aucune autre information sur le transfert des radionucléides autres que le  $^{137}\text{Cs}$  et le  $^{90}\text{Sr}$  n'a été trouvée lors de la présente étude. La compilation de paramètres de transfert réalisée par l'AIEA [19] montre cependant que, pour le césium, les valeurs de facteur de transfert du sol vers la paille de lin sont du même ordre de grandeur que celles pour la paille des céréales. De même, il est observé une différence d'un ordre de grandeur entre le facteur de transfert vers les graines de lin et celles des céréales. Afin d'évaluer la contamination du lin pour les radionucléides de l'étude autres que le césium et le strontium, il a été supposé que leur facteur de transfert dans la paille (fibre) était égal à celui observé pour la paille des céréales ou à défaut à 10 fois le facteur de transfert dans le grain des céréales.

## 4.2.2 Sensibilité de la culture du lin aux rejets d'un accident radiologique ou nucléaire

Dans la mesure où tous les sous-produits du lin sont valorisables, il convient de prendre en compte tous les phénomènes qui pourraient induire leur contamination à savoir :

- pour les fibres et les grains, un transfert du sol vers la plante ;
- pour les anas, par dépôt direct et persistance sur la plante.

Pour que les fibres atteignent leur contamination maximale, il faut que le dépôt de radionucléides ait lieu avant la floraison du lin, stade de développement maximal des fibres. A contrario, c'est lors du rouissage que la vulnérabilité d'autres parties de la plante, tels que les anas, est maximale vis-à-vis d'une contamination atmosphérique.

## 4.3 Impact dosimétrique associé à la filière lin

### 4.3.1 Méthode d'évaluation de l'impact

#### 4.3.1.1 *Principales hypothèses*

Afin de prendre en compte la contamination des différents sous-produits du lin, deux situations accidentelles ont été prises en compte :

- un dépôt au stade de la floraison qui conduit à une contamination des fibres par translocation des radionucléides des feuilles vers les fibres et par transfert sol-plante. Dans ce scénario, la contamination des fibres est maximale ;
- un dépôt au stade du rouissage qui conduit à une contamination externe de la plante et, par suite, des anas produits lors du teillage. Dans ce second cas cependant, les fibres ne sont pas contaminées dans la mesure où la plante étant arrachée, les transferts de la contamination vers l'intérieur de plantes sont alors très faibles ou inexistants.

La prise en compte de ces deux scénarios induit des différences dans les évaluations. Dans le cas du scénario « floraison », les temps de décroissance radioactive entre le dépôt, la récolte, le teillage et l'usage final sont plus importants d'où une moindre contribution des éléments à vie courte. Dans le cas du rouissage, seules les parties externes de la plante sont contaminées en cas de dépôt et non les fibres, protégées au cœur de la tige. Il en résulte que les scénarios d'usages considérés ne seront pas complètement les mêmes d'un stade à l'autre. Au stade du rouissage, les fibres sont considérées comme ayant une contamination très faible, voire nulle en théorie. Le cas d'une chemise ou d'un drap tissés à partir de fibre de lin ne seront donc pas pris en compte.

Les scénarios associés au teillage ont été dimensionnés à partir des capacités de production de la coopération Terre de Lin de Saint-Pierre le Viger (76) à savoir : 9 balles traitées par heure, 16 heures par jour sur 300 jours sur 4 lignes de production. Les capacités de la coopérative correspondent aux plantations de lin dans un rayon de 5 km avec un taux d'occupation du lin de 65 % (Source Agreste). Afin de conférer le plus de réalisme possible aux évaluations, trois niveaux de contamination ont été retenus pour chacun des scénarios du CODIRPA, pour décrire les dépôts dans le rayon de 5 km de référence : à 1 km, à 2 Km et entre 2 et 5 km.

#### 4.3.1.2 *Les scénarios étudiés*

Les situations d'exposition ainsi que les principaux paramètres qui les caractérisent sont présentés dans le Tableau n°8 ci-dessous.

Source d'exposition	Opération de récolte	Transport vers exploitation agricole	Entreposage	Transport vers coopérative	gestion du stock/Cariste	Teillage déroulement des balles	Port d'une chemise contaminée	Draps contaminés	Isolation en étoupe de lin	Isolation avec des anas de lin	Paillis
	Culture de lin en place et paille contaminées Contamination surfactique du sol	Balles de paille contaminées	Stock de balles de paille contaminées	Balles de paille contaminées	Balles de paille contaminées	Balle de paille déroulée et nappe de lin	Tissu contaminé	Tissu contaminé	Matériaux d'isolation contaminés	Matériaux d'isolation contaminés	Anas contaminés utilisés en litière
Cible	Adulte	Adulte	Adulte	Adulte	Adulte	Adulte	Adulte	Adulte	Adulte	Adulte	Adulte
Voies d'exposition	Exposition externe à la culture de lin en place Inhalation de poussières mises en suspension Exposition externe à la contamination du sol de la parcelle	Exposition externe aux balles de paille transportées Exposition externe à la contamination du sol de la parcelle	Exposition externe au stock de balles de paille correspondant à l'ensemble de la récolte	Exposition externe aux balles de paille transportées	Exposition externe au stock de balles de paille à traiter sur l'année	Exposition externe (Bêta et gamma) à proximité d'une balle de lin et à la nappe de lin déroulée Inhalation de poussière	Exposition externe bêta et gamma dues à la contamination du tissu	Exposition externe bêta et gamma dues à la contamination du tissu	Exposition externe due à la présence de matériaux d'isolation contaminés dans un logement	Exposition externe aux matériaux d'isolation présents dans l'ossature d'une maison en bois	Exposition externe lors de la mise en place d'une litière dans un box
Durée de l'exposition	7 jours	7 jours	6 mois	6 mois	1 an	1 an	1 an	1 an	1 an	1 an	1 an
Nombre de jours / occurrences	7 jours	76 transports	76 déchargements et 180 jours d'exposition	76	200 jours	200 jours	7 jours par semaine 1 semaine sur 3	1 jour par semaine 52 semaines	365 jours	365 jours	365 jours
Nbre d'heures par jour ou par occurrence	100 h (à raison de 1h/ha et 100 ha à couvrir)	30 minutes par chargement + 30 minutes par transport	10 minutes par jour	1 h par transport	8 h / jour	8 h / jour	8 h / jour	16 h / jour	16 h / jour	16 h / jour	10 minutes par jours

Tableau n°8 : Situations d'exposition prises en compte pour l'évaluation de l'impact dosimétrique associé à la filière lin

### 4.3.1.3 Modélisation de l'exposition

Pour les scénarios de déroulement d'une balle lors du teillage, de port d'une chemise en lin et du lit paré par des draps en lin, un calcul d'exposition externe à la peau a été réalisé spécifiquement pour les radionucléides émetteurs bêta et intégré à la dose efficace totale. Ce calcul a été réalisé à l'aide des données de l'ICRU 56[3] et du modèle développé dans les travaux de K. Nakazato [20].

### 4.3.2 Résultats des évaluations

Les calculs pour un dépôt unitaire de  $1 \text{ Bq.cm}^{-2}$  par radionucléide sont présentés en Annexe 3. Les Figure n°10 et Figure n°11 présentent les résultats des calculs d'impact dosimétrique pour les scénarios APRP, rejet de plutonium et accident grave pour la filière lin.

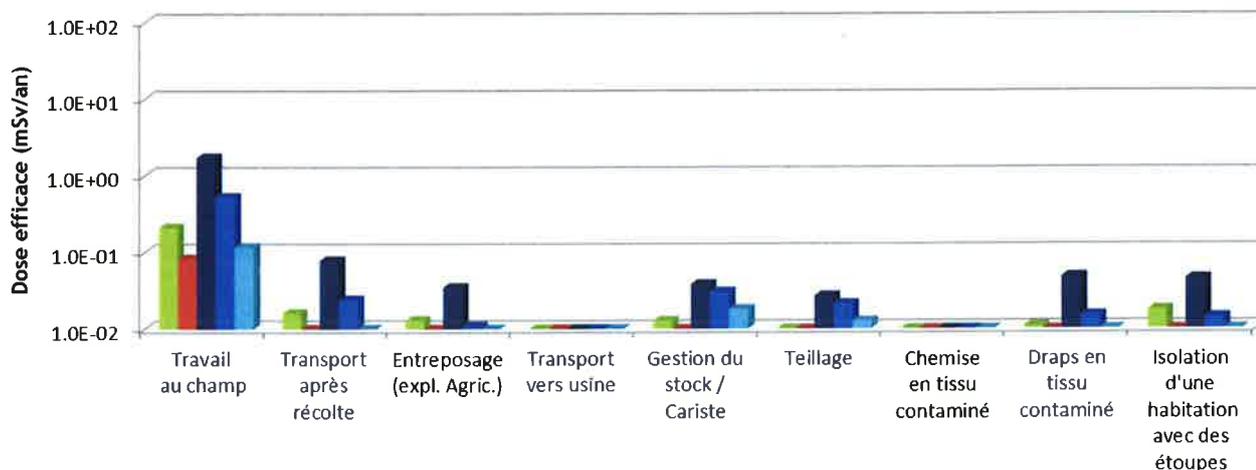


Figure n° 10 : Doses efficaces totales associées aux situations d'exposition de la filière lin - contamination au stade de la floraison

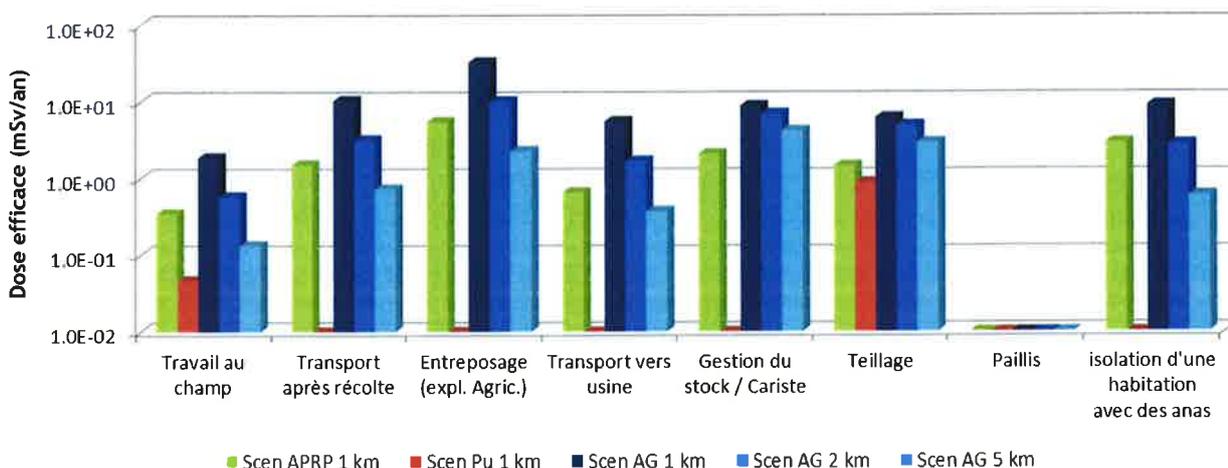


Figure n° 11 : Doses efficaces totales associées aux situations d'exposition de la filière lin - contamination au stade du rouissage

### 4.3.3 Discussion

Les évaluations réalisées pour le stade de la floraison et pour le stade du rouissage conduisent à des résultats très différents.

Pour ce qui concerne la contamination au stade de la floraison, le scénario de travail aux champs apparaît comme le plus pénalisant dans la mesure où les individus concernés sont exposés à la fois à la culture de lin contaminée et aux dépôts présents dans l'environnement. Les autres scénarios, que ce soit pour des opérations professionnelles ou pour des usages domestiques présentent des doses très faibles. La voie d'exposition principale, pour les scénarios APRP et AG, est l'exposition externe alors que pour le scénario de rejet de plutonium, il s'agit de l'inhalation de poussières quand elle existe. Il en découle que pour ce scénario, l'impact n'est significatif que pour le cas des travaux aux champs et du teillage.

Les doses calculées pour une contamination au stade du rouissage sont nettement plus importantes que dans le cas précédent pour toutes les situations d'exposition prises en compte à l'exception du cas des travaux aux champs et du cas d'un paillis réalisé avec des anas. Pour cette dernière situation, l'impact est négligeable, et pour le cas de des travaux aux champs, l'impact est légèrement plus faible, du fait de temps de présence moindres, la contamination ayant lieu plus tard dans le calendrier agricole.

Pour ce qui concerne la contamination au stade du rouissage, contrairement au cas de la floraison, ce sont les activités hors domaine agricole qui occasionnent l'impact le plus important. Ceci s'explique par le fait que les opérateurs concernés manipulent les sous-produits du lin à très faibles distances et pendant des temps de travail supérieurs à ceux nécessaires aux travaux agricoles.

Il est cependant à noter que malgré le réalisme apporté à la description des postes de travail, les doses calculées sont vraisemblablement surestimées du fait de la non prise en compte des pertes en radionucléides lorsque le lin est soumis aux intempéries lors du rouissage.

Même si ces doses s'avéraient surestimées, une vigilance serait cependant à adopter pour le cas du scénario d'un habitat isolé avec des matériaux fabriqués à partir d'anas contaminés.

## 5 LA FILIERE BOIS

### 5.1 Généralités

La canopée constitue la partie supérieure d'un arbre, responsable des échanges avec le milieu atmosphérique au travers du feuillage. A l'opposé, le système racinaire constitue l'interface avec le sol. Entre les deux, le tronc a un rôle structurel et assure la circulation des substances nutritives. Il est constitué de différentes couches concentriques ayant chacune leurs caractéristiques propres (cf. Figure n° 12).

- le bois de cœur représente la partie la plus ancienne de l'arbre, constituée de tissus morts et donc physiologiquement inactive. Il a un rôle structurel pour l'arbre en assurant son support ;
- l'aubier correspond au bois vivant au travers duquel circule la sève brute depuis les racines vers les feuilles. C'est la partie correspondant aux zones d'accroissement les plus récemment formées. La croissance de l'arbre se fait de l'intérieur vers l'extérieur. Le cycle annuel de croissance donne lieu à la production d'anneau de bois jeune ou cerne annuel ;
- le cambium est une mince couche de tissus qui ont pour fonction de produire l'aubier d'un côté et l'écorce de l'autre ;

- l'écorce est constituée de deux parties :
  - l'écorce interne au travers de laquelle circule la sève élaborée depuis les feuilles vers les autres parties en croissance de l'arbre ;
  - l'écorce externe qui a vocation à protéger le bois contre les agressions (froid, maladies, champignons, ...) et dont l'épaisseur varie suivant les espèces.

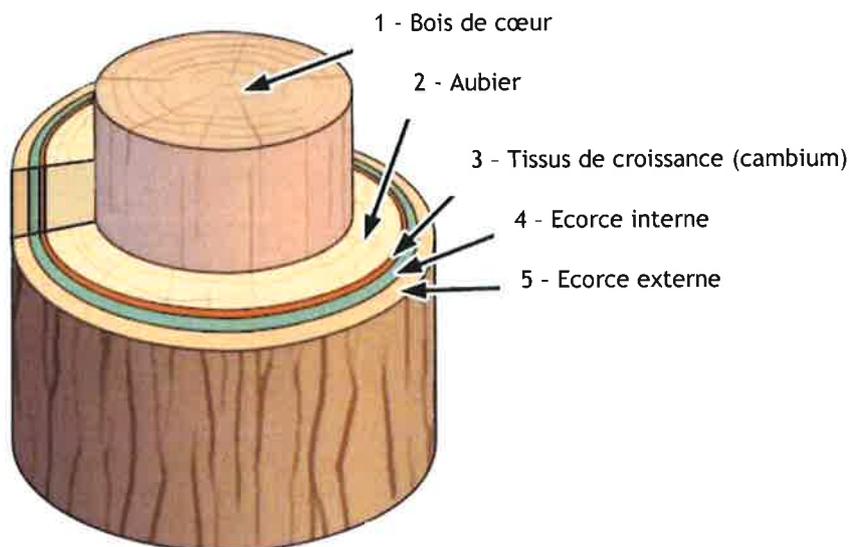


Figure n° 12 : Structure du tronc d'un arbre

Le bois de cœur est le plus prisé pour les travaux de menuiserie, de charpente ou d'ébénisterie. Suivant les espèces et l'âge des arbres abattus, l'aubier peut-être plus ou moins valorisable, pour la fabrication de la pâte à papier ou comme combustible. Enfin, l'écorce est généralement valorisée pour la production d'énergie, ou de façon plus marginale en horticulture.

## 5.2 Description de la filière bois en France

### 5.2.1 Généralités

La Figure n° 13 ci-après présente les principales activités menées au sein de la filière bois, depuis l'exploitation forestière jusqu'aux usages par le public en passant par les industries de première puis de seconde transformation. Les formes sous lesquelles le bois est exploité à chaque étape sont également mentionnées, de même que les sous-produits générés et leur devenir. Seules les activités les plus représentatives ont été prises en compte dans la présente étude.

### 5.2.2 Exploitation forestière

L'exploitation forestière est réalisée par le bûcheron. Le bûcheron prépare le chantier, coupe et façonne les arbres selon leur utilisation (bois d'œuvre, bois d'industrie, bois de feu) et réalise l'abattage des arbres. Une fois l'arbre à terre, il façonne ensuite à l'aide d'une tronçonneuse les produits forestiers. Il pratique enfin des opérations de débusquage et débardage (deux opérations de déplacement) pour amener les arbres abattus sur les lieux de stockage ou d'embarquement. En complément du bois brut lui-même, les sous-produits générés par l'exploitation forestière sont les bûches ou le bois déchiqueté.

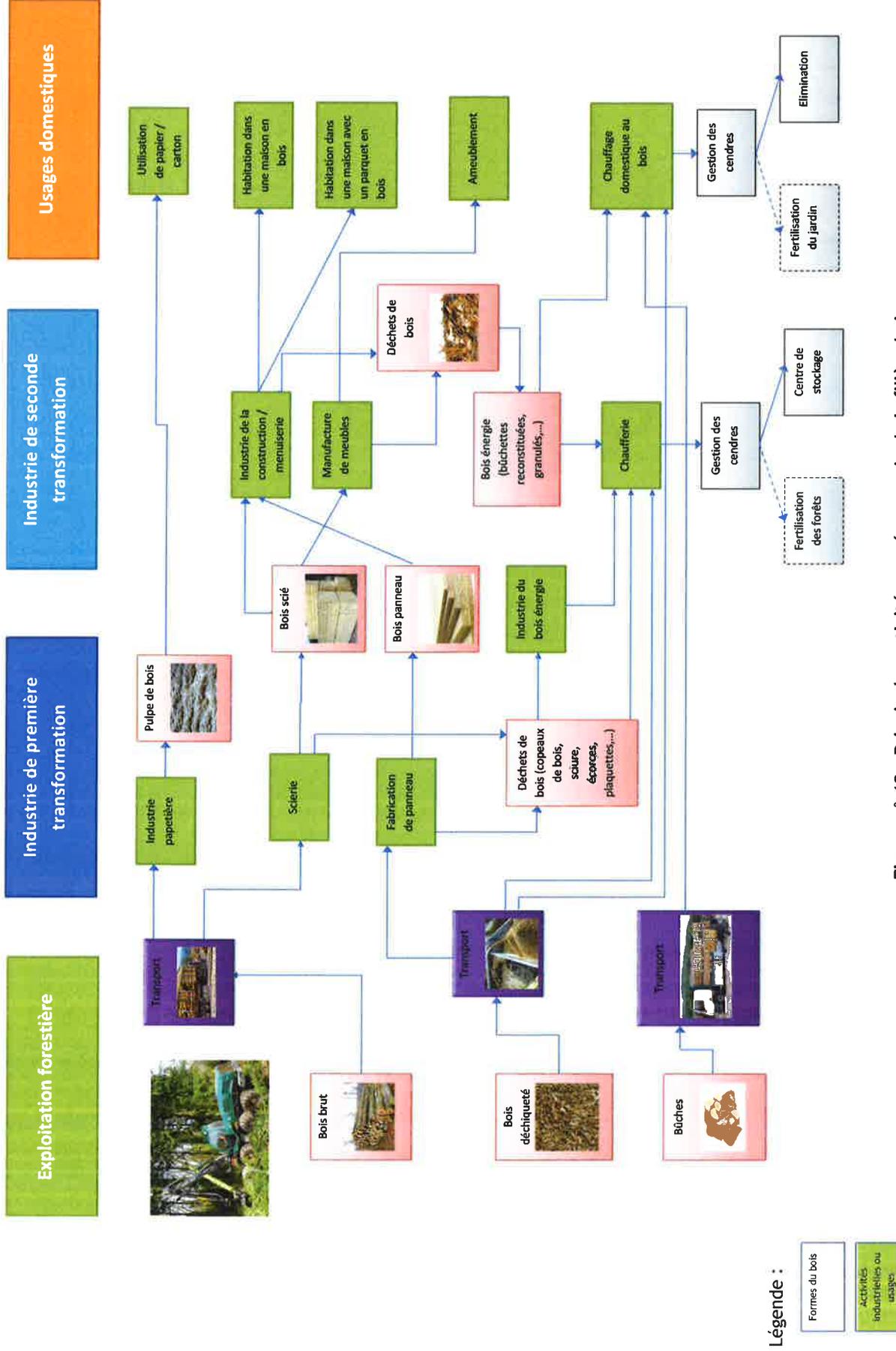


Figure n° 13 : Principales activités menées au sein de la filière bois

### **5.2.2.1 Le bois brut**

Le bois brut, encore appelé grume, correspond à un tronc d'arbre ou une fraction de tronc, débarrassé de ses branchages. Il n'est généralement pas écorcé. Une fois préparé, le bois brut peut être, soit entreposé à proximité de la zone d'abattage, soit transporté vers des sites industriels pour transformation, au moyen de camions spécialisés, les grumiers.

Le bois brut est utilisable soit vert (par exemple en papeterie), soit plus ou moins séché (par exemple pour le bois de charpente). Le séchage est de plus en plus réalisé de façon artificielle, dans des séchoirs à air chaud, par exemple sur le site des scieries.

### **5.2.2.2 Les bûches**

Le bois brut peut être découpé en bûches destinées à une valorisation énergétique. Afin d'avoir un combustible de qualité optimale, il est nécessaire de respecter un temps de séchage de 15 à plus de 24 mois, suivant que le bois est empilé sous abri ou non.

### **5.2.2.3 Le bois déchiqueté**

Le bois déchiqueté, également appelé plaquettes forestières, est un combustible naturel présenté sous la forme de petits morceaux de bois homogènes qui permettent d'alimenter des chaudières de bois de chauffage pour les particuliers, entreprises et collectivités. Le bois déchiqueté est fabriqué grâce au déchiquetage ou au broyage des résidus de l'entretien et de l'exploitation des forêts, des haies et des espaces non forestiers.

Afin de maîtriser le taux d'humidité, le séchage et la production de plaquettes peuvent se faire suivant les deux alternatives suivantes :

- broyage de bois préalablement séchés (nécessite un stockage du bois billons ou grumes d'une année pour un taux d'humidité de 20-25 %);
- broyage de bois vert et séchage de la plaquette par stockage sous abri (trois à cinq mois pour obtenir une humidité de 20-25%).

Les livraisons de plaquettes sont effectuées par camion benne ou semi-remorque suivant des volumes de 30 m<sup>3</sup> (polybenne seul), 60 m<sup>3</sup> (camion remorque poly-bennes ou semi-remorque) ou 90-100 m<sup>3</sup> (semi-remorque à fond mouvant).

## **5.2.3 Industrie de première transformation**

### **5.2.3.1 Industrie de la pâte à papier**

La fabrication de la pâte à papier nécessite de grandes quantités de bois, que ce soit des feuillus ou des résineux ainsi qu'un très gros apport d'eau, généralement puisée dans le milieu naturel. De ce fait, les usines sont généralement implantées dans les zones forestières afin de limiter les opérations de transport du bois.

Le bois utilisé est livré sur le site de l'usine de fabrication de pâte à papier sous forme de grumes. Il est ensuite écorcé et découpé en rondins ou déchiqueté sous forme de copeaux.

Il existe deux grands types de procédés pour la fabrication de pâte à papier :

- les procédés mécaniques qui consistent à broyer le bois sous forme de rondins ou de copeaux afin de séparer mécaniquement les fibres de bois les unes des autres. Afin d'améliorer le rendement du procédé, le mélange

initial est parfois chauffé. On parle alors de pâte thermo-mécanique. La pulpe ainsi obtenue peut ensuite être traitée par des réactifs chimiques à des fins de blanchiment.

Ce procédé est utilisé pour la production de pâtes destinées à la fabrication du papier journal ou de papier pour l'impression.

- et les procédés chimiques qui sont essentiellement basés sur la dissolution des éléments indésirables du bois (lignine, résines,...) et leur extraction afin d'obtenir une pâte à papier constituée exclusivement de cellulose. La dissolution des éléments indésirables et leur extraction sont réalisées à l'aide de réactifs chimiques injectés dans la solution de bois à environ 150 °C. La pulpe résiduelle est ensuite lavée, rincée, épurée des réactifs et, éventuellement, blanchie. Les réactifs séparés de la pulpe subissent un recyclage au cours duquel différentes solutions concentrant les éléments indésirables sont produites et éliminées en tant que déchets. Suivant leur degré de concentration, ces solutions sont qualifiées de liqueurs vertes ou noires.

Ce procédé est utilisé pour fabriquer des papiers présentant une meilleure résistance dans le temps, notamment des papiers d'emballage ou des papiers de haute qualité.

Quel que soit le procédé, la chaleur nécessaire à la production de la pâte à papier est obtenue par incinération des déchets de préparation du bois, notamment les écorces, ou par incinération des résidus de recyclage des réactifs dans le cas de la pâte chimique. L'ensemble des constituants du bois sont donc valorisés dans la filière.

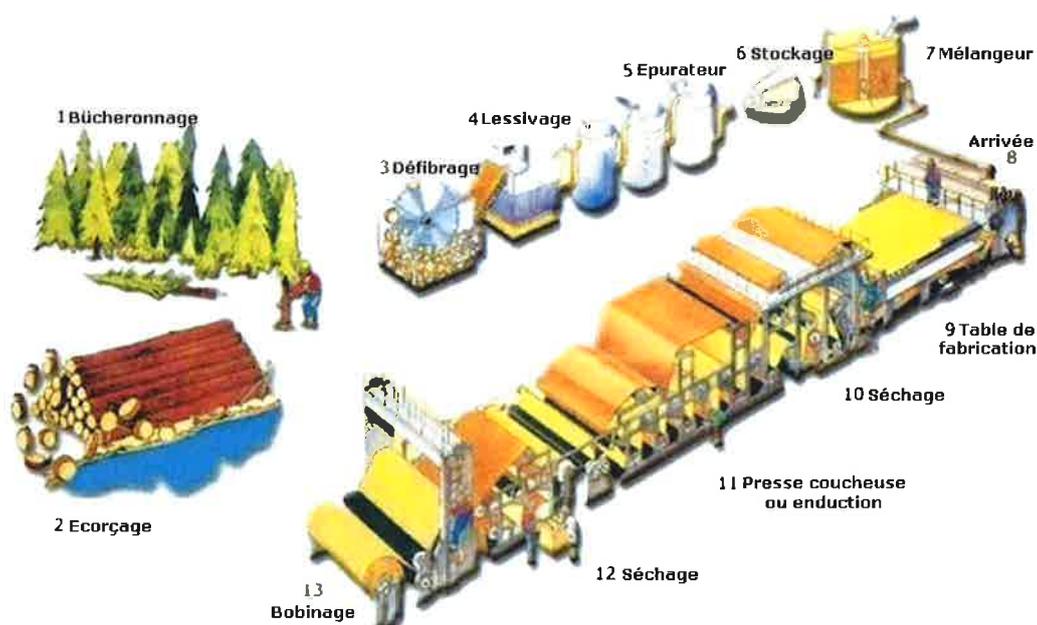


Figure n° 14 : Les étapes de la fabrication de la pâte à papier et du papier

### 5.2.3.2 Sciage

Les grumes sont amenées généralement à la scierie par grumiers et sont stockées à l'extérieur dans ce que l'on nomme le parc à grumes qui forme le stock de l'entreprise.

Les scieries sont des industries de première transformation du bois. Elles fournissent des produits semi-finis, les sciages, qui sont généralement destinés à une industrie de seconde transformation (menuiserie, ébénisterie, construction, etc.) chargée de fabriquer des objets ou des parties d'objets de consommation.

Les grumes peuvent être écorcées ou non avant sciage. Elles sont débitées sur des bancs de sciage de plus en plus automatisés et contrôlés afin d'optimiser les quantités de bois produites. La sciure produite est récupérée par des systèmes d'aspiration et valoriser par exemple en tant que combustible de chauffage. Les écorces sont également collectées et valoriser soit en horticulture, soit en tant que combustible.

Les planches produites sont entreposées sur un parc dédié en attente de séchage ou séchées en séchoir artificiel.

## **5.2.4 Industrie de seconde transformation**

### **5.2.4.1 *Industrie de la construction / Menuiserie***

Les activités de menuiserie et de construction regroupent l'ensemble des métiers de travail du bois, que ce soit pour la fabrication de meubles, d'habitation ou de charpente par exemple. Ces métiers sont caractérisés par la manipulation de pièces de bois et l'exposition potentielle à des poussières de bois.

### **5.2.4.2 *Bois énergie***

En France, la plupart des chaufferies à bois fonctionne selon un procédé assez standard et très automatisé dont le dimensionnement est corrélé à la puissance de l'installation [21]. Il est constitué de :

- un stockage du combustible bois, sous forme de plaquettes, dans un silo enterré ou de plain-pied ;
- un convoyeur de combustible bois qui alimente le foyer de la chaudière de façon automatique et régulée ;
- un générateur de chaleur constitué d'un foyer, d'une chambre de combustion et d'un échangeur de chaleur entre les gaz de combustion et le fluide caloporteur (eau) ;
- un système de traitement des fumées et de récupération des cendres volantes ;
- un système de récupération des cendres sous foyer.

Concernant le traitement des fumées en sortie d'installation, l'ADEME indique qu'il peut s'effectuer selon deux voies [22] :

- une voie sèche, comprenant des systèmes gravitaires, filtrants ou électrostatiques ;
- une voie humide où un lavage des fumées permet de capter les particules solides mais aussi certains autres polluants gazeux.

Les cendres produites sont automatiquement collectées et généralement transférées dans un réceptacle (conteneur, big-bag,...) en attente d'élimination vers un centre de stockage de déchets adapté.

Dans le cas d'une installation domestique, le procédé d'alimentation de la chaudière et de combustion est le même. Il n'y a cependant pas de traitement des fumées et les cendres sous foyer doivent être gérées par l'utilisateur lui-même.

## **5.3 Enseignements tirés des contaminations passées**

A l'heure actuelle, les forêts du monde entier présentent des marquages radioactifs qui ont deux origines différentes :

- les essais nucléaires atmosphériques d'une part, qui ont induit de faibles niveaux de contamination en  $^{137}\text{Cs}$ , et en différents isotopes du plutonium ( $^{239}\text{Pu}$  et  $^{240}\text{Pu}$ ) ;

- les différents accidents nucléaires d'autre part : Kyshtym (1957), Tchernobyl (1986) et Fukushima (2011) qui ont conduit à des contaminations pouvant atteindre plusieurs milliers de Bq par kg de bois dans les pays concernés, principalement en  $^{131}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  et en  $^{90}\text{Sr}$ .

Ces différents événements ont fait l'objet de nombreuses études tant sur le comportement des radionucléides dans les écosystèmes forestiers que sur l'impact de la contamination dans les filières de traitement du bois.

### 5.3.1 Comportement des radionucléides dans l'écosystème forestier

Les écosystèmes forestiers présentent des caractéristiques très particulières qui induisent un comportement différent des radionucléides en comparaison des sols cultivés.

#### 5.3.1.1 *L'interception*

En cas de rejets atmosphériques de radionucléides, la contamination initiale du milieu forestier se produit soit par dépôts directs sur les sols, soit par interception des éléments présents dans l'air par la végétation. S'agissant des arbres, les radionucléides sont ainsi retenus par les feuilles, les branchages et sur l'écorce [23]. Comparativement aux plantes agricoles ou à toute végétation basse, les arbres développent des surfaces foliaires considérables et sont donc capables d'intercepter des aérosols de façon plus importante.

Différentes études menées suite aux accidents de Tchernobyl, puis de Fukushima ont montré que l'intensité des phénomènes d'interception varie en fonction de différents facteurs. Le premier paramètre concerne le mode de dépôt de la contamination, soit par voie sèche, soit par voie humide sous l'action des précipitations. La nature des espèces forestières (entre conifères et arbres à feuilles caduques, ainsi qu'entre espèces d'une même famille) a également une forte influence. Il a ainsi été montré que le pourcentage d'activité restant au niveau de la canopée d'un cyprès juste après les premiers rejets issus de la centrale de Fukushima Dai-ichi était de 25 % de l'iode 131 présent dans les précipitations contre 62 % pour le césium 137. L'écart de contamination de la canopée entre les deux radionucléides était moindre pour les cèdres (51% pour l'iode 131 contre 65 % pour le césium) [24]. Dans une étude ultérieure [25], il est également précisé que la capacité de captation des arbres à feuilles caduques est plus faible que celle des arbres à feuilles persistantes.

#### 5.3.1.2 *Les transferts secondaires*

Seule une fraction des radionucléides captés par les arbres y persiste, le reste étant entraîné vers le sol par différents phénomènes [23][25][26] :

- le lessivage de la contamination déposée sur les feuilles vers le sol par les précipitations initiales ;
- l'écoulement de l'eau le long du tronc
- la chute des feuilles ou des aiguilles ;
- le lessivage de la contamination déposée sur les feuilles, par les précipitations intervenant postérieurement aux dépôts.

A court terme, les transferts de contamination concernent la fraction qui persiste sur les feuilles des arbres caduques ou les aiguilles des conifères et le tronc :

- la contamination présente sur les feuilles est absorbée par les feuilles et peut soit être métabolisée sur place, soit être transférée vers les jeunes pousses (feuilles ou branches) ou le bois jeune.

- En parallèle, une migration horizontale de la contamination déposée sur l'écorce est observée, principalement par diffusion. Cette migration induit progressivement une contamination du bois jeune puis du bois de cœur, même si celui-ci a été formé antérieurement à l'accident [27][28]. Ce phénomène a particulièrement été observé pour le  $^{137}\text{Cs}$  et dans une moindre mesure pour le plutonium [28] alors que certaines études suggèrent que le  $^{90}\text{Sr}$  serait beaucoup moins mobile par diffusion horizontale [29].

A moyen terme, une contamination secondaire du bois jeune et des nouvelles pousses se met en place par transfert de la contamination présente dans le sol, par absorption racinaire et migration verticale par les canaux de circulation de la sève élaborée. Cette voie d'absorption de la contamination devient progressivement le mode de contamination dominant des arbres. Elle varie notamment en fonction du stade de développement des arbres, de l'espèce, et de la distribution et de la disponibilité du Cs dans le sol [27]. Ce transfert secondaire est également couplé à une diffusion horizontale de la contamination vers les couches les plus profondes du bois.

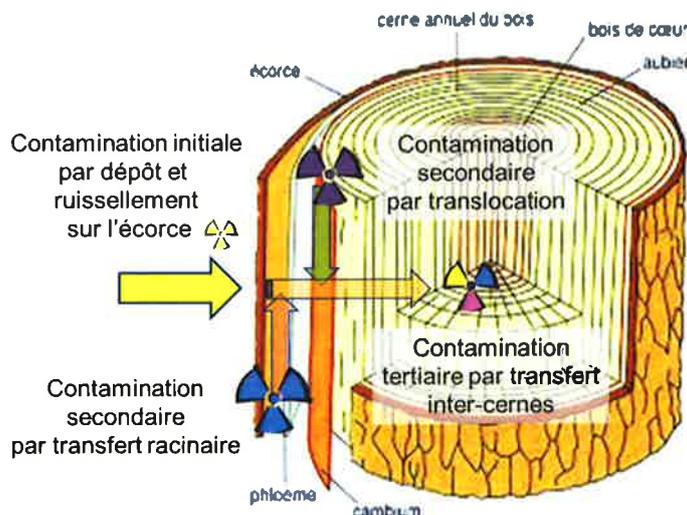


Figure n° 15 : voies de transfert de la contamination au sein du tronc d'un arbre

### 5.3.1.3 *Persistence de la contamination dans l'écosystème forestier*

Au cours du temps, la contamination perdue par les arbres vient renforcer celle des sols forestiers qui provenait des dépôts initiaux. La voie dominante de transfert de la contamination des feuilles vers le sol est constituée par le lessivage de la contamination lors des dépôts initiaux par voie humide. A titre d'exemple, de 52 à 69 % de la contamination présente dans les précipitations initiales captées par des cèdres, des cyprès ou des arbres à feuilles caduques a ainsi été entraîné vers le sol par lessivage après l'accident de Fukushima, alors que les écoulements le long du tronc ne représentaient qu'au plus 10 % de la contamination initiale [25].

Il a également été montré que le lessivage de la contamination par les pluies ultérieures a tendance à diminuer avec le temps mais peut cependant persister sur plusieurs années après les dépôts selon les espèces. Il en résulte un transfert continu sur plusieurs années de la contamination présente dans la canopée vers le sol, ce qui contribue à entretenir la contamination du sol à un niveau important [25].

Mise à part la décroissance radioactive, la réduction de l'activité des radionucléides présents dans l'écosystème forestier est faible, en moyenne de 1% de la contamination totale présente par an, du fait du lessivage ou de l'érosion des sols notamment [23]. Cette faible exportation des radionucléides s'explique en partie par leur faible mobilité dans les sols, avec

des migrations limitées aux premiers centimètres de sol en particulier pour le césium et dans une moindre mesure pour le strontium.

La surveillance réalisée après l'accident de Kyshtym survenu en 1957 en Russie a montré que la réduction des concentrations en  $^{90}\text{Sr}$  dans le milieu forestier est uniquement gouvernée par sa décroissance radioactive, sur une période de l'ordre de 30 ans [30]. De même, des pertes en  $^{137}\text{Cs}$  de l'ordre de 0,02 % sur 8 ans ont été rapportées en Suède, après l'accident de Tchernobyl, ce qui correspond à une demi-vie théorique de l'ordre de 4200 ans [23].

**Il en résulte que les sols forestiers sont des réservoirs importants et durables de contamination sous forme disponible pour la végétation, pour ce qui concerne les radionucléides à vie longue. Les cinétiques d'évolution de la contamination sont cependant à appréhender en fonction des caractéristiques de l'écosystème local considéré et du climat.**

#### **5.3.1.4 Evolution de la contamination dans le bois**

Alors que le bois n'est initialement pas affecté par la contamination, sa concentration en radionucléide augmente progressivement avec le temps. Il s'établit un équilibre entre l'arbre et son environnement du fait des différentes voies de transfert de la contamination. Les études menées suite aux accidents de Tchernobyl et de Fukushima ont mis en évidence une corrélation entre l'importance des dépôts initiaux de radioactivité et la contamination des écorces dans un premier temps et du bois ultérieurement [27][31].

A long terme, le bois constitue un réservoir important de contamination pour l'ensemble des radionucléides de période moyenne ou longue, tels que le  $^{137}\text{Cs}$  [27] ou les  $^{239}\text{Pu}$  et  $^{240}\text{Pu}$  [23]. Suivant les espèces, la contamination peut cependant être hétérogène: par exemple la concentration peut être décroissante de l'écorce vers le cœur, homogène sur l'ensemble du bois ou plus importante vers le cœur [32]. Des travaux de modélisation réalisés à partir de certaines études radioécologiques tendent à montrer que la concentration en césium augmente durant 10 à 20 ans dans le bois avant de décroître sur des périodes équivalentes, avec cependant une certaine variabilité suivant les espèces et le climat [31]. Il n'y a pas d'accord de l'ensemble de la communauté scientifique sur cette cinétique. Pour ce qui concerne le plutonium, le pic de contamination serait davantage attendu après une période d'une centaine d'années [23].

Cependant, les transferts de  $^{137}\text{Cs}$  dans les différentes parties du bois présentent une tendance comparable quelles que soient les espèces. La contamination initiale de l'écorce tend à diminuer, dans un premier temps au profit de l'écorce interne puis du bois jeune et enfin du bois de cœur. Cette tendance est illustrée par les exemples du Tableau n° 9 ci-après.

Il est à noter que les différentes sortes de bois n'ont pas été différenciées faute de données spécifiques. Dans la suite du document, le terme bois désigne indifféremment le bois jeune (aubier) ou le bois de cœur. Il en est de même, dans les évaluations dosimétriques présentées au paragraphe 5.4.

Tableau n° 9 : Evolution de la contamination de l'écorce et du bois au cours du temps

Cas d'un peuplement ancien au moment de l'accident	Temps après l'accident (F=Fukushima - T=Tchernobyl)				
	5 mois (F)	1,5 an (F)	3 ans (T)	4 ans (T)	12 ans (T)
Ecorce	100 %	74 %	51 %	23 %	7 %
Ecorce intérieure		6 %	11 %	13 %	18 %
Bois	LD	20 %	38 %	64 %	75 %
Type d'essence	Cèdre 41 ans	Pin 36 à 54 ans	Pin 50 à 55 ans	Pin 50 à 55 ans	Pin 58 ans
Références	[33]	[32]	[34]	[34]	[27]

Cas d'un peuplement jeune au moment de l'accident	5 mois	1,5 an	3 ans (T)	4 ans (T)	12 ans (T)
Ecorce			54 %	26 %	13 %
Ecorce intérieure			16 %	29 %	32 %
Bois			30 %	38 %	55 %
Type d'essence			Pin 15 à 20 ans	Pin 15 à 20 ans	Pin 17 ans
Références			[34]	[34]	[27]

NB : Les données de [34] ont été extrapolées à l'aide des compositions massiques du bois fournies par [27].

Ces différents résultats montrent que deux périodes temporelles doivent être considérées pour caractériser la vulnérabilité de la filière bois selon les modes de transformation considérés :

- à court terme, la contamination au niveau d'un tronc d'arbre se trouve essentiellement dans les écorces. A ce stade, toutes les utilisations du bois écorcé sont donc exemptes de risque du point de vue radiologique.
- au fur et à mesure du temps, la contamination du bois lui-même augmente jusqu'à un maximum. Le risque radiologique lié à la valorisation du bois seul est alors à considérer.

Cette double temporalité est à prendre en compte dans les études d'impact concernant la filière bois.

### 5.3.2 Comportement des radionucléides lors des étapes de valorisation du bois

Suite à l'accident de Tchernobyl, de nombreuses études ont porté sur les conséquences de la présence de contaminations radioactives dans les filières de valorisation industrielle du bois. Deux cas ont été plus particulièrement explorés :

- la valorisation énergétique du bois contaminé ;
- l'Industrie de la pâte à papier.

Les autres usages industriels du bois ne sont pas abordés dans la littérature scientifique. Des travaux de modélisation des principales situations d'exposition pouvant découler de l'usage de bois contaminé dans l'ensemble des usages du bois ont cependant été menés par l'AIEA afin de développer un outil générique d'évaluation dosimétrique [35].

### 5.3.2.1 *La valorisation énergétique*

L'utilisation du bois comme combustible pour le chauffage et la production d'eau chaude est une pratique qui s'est largement développée dans les pays scandinaves depuis le début des années 80. Il en résulte qu'après l'accident de Tchernobyl de nombreuses études ont été menées dans ces pays du fait de la contamination de leurs forêts [36][37][38].

Lors de la combustion du bois, les radionucléides présents se répartissent entre les gaz de combustion, les cendres volantes en suspension dans ces gaz et les cendres sous foyer. Une étude suédoise [36] a montré qu'en moyenne, la concentration en radioactivité des cendres volantes est supérieure à celles des cendres sous foyer, avec cependant des différences en fonction de la température de fonctionnement des foyers [37][39]. D'autre part, des expérimentations en laboratoire ont montré que les pertes en césium lors de la combustion n'étaient pas dues à un rejet sous forme gazeuse mais au rejet de fine particule de suie sur lesquelles le césium à l'état gazeux se serait condensé [36]. Du fait de la perte de matière organique lors de la combustion, il se produit une concentration de l'activité des radionucléides dans les cendres. Des facteurs de concentration de 10 à 40 ont ainsi été mesurés dans différentes installations des pays Scandinaves [36].

Ces résultats ont conduit les pays concernés à s'interroger sur les niveaux d'exposition des travailleurs en charge de la gestion de ces cendres au sein des installations de combustion du bois [39]. En complément des études menées sur les travailleurs, les autorités des pays scandinaves se sont également préoccupées de l'impact des rejets des installations de combustion du bois sur la population. Les évaluations de dose réalisées montrent des niveaux d'exposition faibles, de l'ordre de  $0,01 \text{ mSv.an}^{-1}$  pour une contamination initiale des forêts de l'ordre de  $1 \text{ kBq.m}^{-2}$  et une contamination moyenne du bois variant entre 1 et  $500 \text{ Bq.kg}^{-1}$ .

### 5.3.2.2 *L'industrie de la pâte à papier*

Les articles scientifiques exploités dans la présente étude rapportent que l'industrie papetière est concernée par la présence de contamination en situation post-accidentelle aussi bien à court qu'à moyen terme. Comme indiqué au paragraphe 4.1.3.2, cette industrie exploite le bois sous forme écorcée pour la préparation de la pulpe de bois, les écorces étant valorisées par combustion. A court terme, cette contamination ne devrait donc concerner que les cendres issues de l'incinération des écorces contaminées. Cependant, des concentrations significatives de césium ou de strontium ont également été mesurées aux différentes étapes de fabrication de la pulpe, contrairement à ce qui aurait été attendu, la contamination du bois étant très faible voire nulle à ce stade. Les apports de contamination à court terme proviennent en fait des prélèvements d'eau dans l'environnement considérables que nécessite la préparation de la pulpe de bois [39]. Après environ un an, l'apport principal de radionucléides se fait, cette fois, par le bois lui-même [37].

#### Les situations d'intérêt

Le césium et le strontium sont susceptibles d'être piégés dans les dispositifs de recyclage et de purification des réactifs utilisés pour laver et rincer la pulpe de bois pour en éliminer les éléments indésirables tels que la lignine. Des facteurs de concentration d'environ 30 ont ainsi été mesurés en Suède entre l'activité en  $^{137}\text{Cs}$  dans les copeaux de bois utilisés et celle dans la liqueur noire [20]. D'autres études rapportent des facteurs de concentration de 10 à 20 [20][41][42].

Dans la mesure où les écorces de bois et les liqueurs sont incinérées pour produire la chaleur nécessaire à la fabrication de la pulpe, un autre phénomène de concentration est également observé dans les cendres de combustion. L'étude menée en Suède a montré que les cendres issues de la combustion des écorces pouvaient être jusqu'à 70 fois plus concentrées en  $^{137}\text{Cs}$  que les écorces d'origine et que ce facteur pouvait atteindre 200 pour les cendres d'incinération des déchets de recyclage des réactifs chimiques.

Des mesures de débit de dose au sein des installations concernées ont conduit à identifier deux postes de travail sensibles :

- la présence d'un opérateur à proximité d'une cuve de stockage des différentes liqueurs issues du recyclage des réactifs utilisés dans le procédé de fabrication chimique de la pulpe de bois ;
- l'opérateur en charge de la surveillance des cendres d'incinération stockées sur le site.

A l'opposé, des activités en césium et en strontium ont été mesurées dans la pulpe blanchie à des niveaux plus faibles que ceux des copeaux de bois initiaux. Des rapports de 1 à 3 % sont ainsi reportés dans la littérature [39].

#### La contamination du papier

Des études menées au Japon [44] et en Egypte [45] ont chacune mis en évidence la présence de <sup>137</sup>Cs, à des activités variables selon la nature du papier analysé. Le césium présent était supposé provenir des retombées des anciens essais nucléaires atmosphériques et des dépôts consécutifs à l'accident de Tchernobyl. Il est apparu que le papier présentant la contamination la plus significative était celui fabriqué à partir de pâte à papier issue d'un procédé purement mécanique, c'est-à-dire par simple broyage du bois initial. A l'opposé, les papiers provenant de pâtes élaborées par traitement chimiques des fibres de bois ne présentait que des traces de césium, voire des niveaux indétectables. De même, le papier recyclé ayant subi un procédé de désencrage chimique ne présentait que de très faibles niveaux de césium.

L'étude japonaise [44] a par ailleurs montré que l'activité en césium dans le papier issu de pulpe mécanique était très proche de la valeur moyenne mesurée dans les bois utilisés par l'industrie de la pâte à papier au Japon.

**Dans la suite de la présente étude, pour les calculs d'impact par manipulation de papier, il sera donc supposé que l'activité massique du papier est égale à celle du bois, dans le cas d'une pulpe préparée de façon mécanique et 0,02 fois plus faible dans le cas d'une pulpe préparée avec un traitement chimique du bois. Un facteur de concentration de 70 a été retenu pour évaluer la concentration des cendres issues de l'incinération des écorces et de 26 dans le cas de la liqueur noire.**

### **5.3.3 Vulnérabilité de la filière bois à court, moyen et long termes**

Les écorces présentent une contamination maximale à court terme du fait de la présence des radionucléides à vie courte aussi bien que ceux à période moyenne ou longue. A moyen / long terme, c'est-à-dire au bout d'au moins un an, seuls les radionucléides à vie moyenne ou longue persistent. S'agissant du bois, il apparaît que seuls les radionucléides à vie moyenne ou longue sont susceptibles d'y présenter des niveaux d'activité significatifs, du fait des cinétiques de transfert de la contamination depuis le sol, la canopée ou les écorces.

Dans la mesure où le réservoir de césium dans les forêts est très largement supérieur aux prélèvements de contamination que peuvent entraîner l'exploitation du bois, l'évolution de la vulnérabilité de chacune des industries n'est gouvernée que par la décroissance biologique et radiologique du césium et sa biodisponibilité dans les écosystèmes forestiers [37]. Il en va vraisemblablement de même pour les isotopes à vie longue du strontium et du plutonium. Le Tableau n° 10 ci-dessous présente une représentation qualitative de l'évolution de cette vulnérabilité en fonction du temps, pour les différents sous-produits du bois.

**Tableau n° 10 : Vulnérabilité des activités de la filière bois en fonction du temps**

	Court terme	Moyen terme	Long terme
Exploitation forestière	+++	++	++
Sous-produits contenant des écorces	+++	++	+
Ecorces	+++	++	+
Bois écorcé et sous-produits hors pâte à papier		+	++
Industrie papetière	++ (*)	++	++

(\*) A court terme la vulnérabilité de la filière papetière est liée à la contamination des eaux superficielles pompées dans l'environnement des installations.

## 5.3.4 Les dispositifs de gestion mis en place après les accidents de Tchernobyl et Fukushima

### 5.3.4.1 Cas de l'accident de Tchernobyl

Que ce soit après l'accident de Tchernobyl ou bien celui de Fukushima, des seuils de gestion ont été mis en place pour contrôler le devenir de la contamination dans la filière bois. Le Tableau n° 11 présente les valeurs arrêtées en Russie après l'accident de Tchernobyl. En complément, les valeurs adoptées en Ukraine après Tchernobyl sont présentées en Annexe 4. A titre de comparaison, le Tableau n° 12 expose les valeurs de gestion mises en place par les autorités japonaises. Il apparaît que, comme pour les productions alimentaires, les seuils mis en place au Japon sont significativement plus bas que ceux mis en place dans les pays de l'Est après Tchernobyl.

**Tableau n° 11 : Seuils de gestion adoptés pour le bois en Russie après l'accident de Tchernobyl  
(Règles sanitaires SR 2.6.1.759-99, Ministère de la Santé)**

	Niveaux maximaux admissibles (Bq.kg <sup>-1</sup> )	
	<sup>137</sup> Cs	<sup>90</sup> Sr
<b>Peuplement à usage industriel</b>		
Bois avec écorce	11 100	5 200
Bois écorcé	3 100	2 300
<b>Peuplement à usage domestique</b>		
Produits pour usage à l'intérieur et usage personnel (meuble, parquet, instrument de musique,...)	2 200	500
Bois de chauffage	1 400	400
Construction civile	400	5 200
Ressources forestières secondaires	2 200 à 3 100	500 à 2 300
Aiguilles fraîches pour la fabrication de fourrage vert	600	100

**Tableau n° 12 : Valeurs maximales de la concentration en césium dans le bois adoptées par les autorités japonaises après l'accident de Fukushima :**

	Valeur maximale admissible en césium pour la distribution des produits
Bois de chauffage :	40 Bq.kg <sup>-1</sup> (poids sec) [49]
Charbon de bois :	280 Bq.kg <sup>-1</sup> (poids sec) [49]
Bois pour la culture de champignons :	50 Bq.kg <sup>-1</sup> [50]
Copeaux pour la culture de champignons :	200 Bq.kg <sup>-1</sup> [50]
Granulés de bois :	40 Bq.kg <sup>-1</sup>
Granulés de bois avec écorces :	300 Bq.kg <sup>-1</sup>

## 5.4 Impact dosimétrique associé à la filière bois

### 5.4.1 Prise en compte de l'évolution au cours du temps

Afin de traduire l'évolution de la contamination du bois dans le temps, deux situations ont été prises en compte :

- une contamination à court terme, uniquement fixée sur les écorces avec un bois exempt de contamination. Les scénarios correspondants portent sur les activités mettant en jeu des bois sous écorce ou la gestion des écorces elles-mêmes ;
- une contamination à moyen terme (au minimum 6 mois après le dépôt). Elle concerne à la fois les radionucléides fixés dans le bois de même que la contamination résiduelle des écorces. Les scénarios correspondants prennent en compte à la fois les activités mettant en jeu des bois sous écorces ou des bois écorcés.

Pour le calcul de l'impact dosimétrique, cependant, une méthode différente de prise en compte de la contamination dans la filière bois a été retenue en comparaison des quatre autres filières. En effet, en absence de données dans la littérature sur la répartition des radionucléides entre les différents compartiments du milieu forestier, il n'a pas été possible de définir un coefficient de conversion entre la contamination initialement déposée au sol (en  $\text{Bq.cm}^{-2}$ ), qui serait la donnée d'entrée du calcul en situation accidentelle, et l'activité massique des composants du bois (bois jeune, bois de cœur, canopée et écorces). Pour cette raison, les calculs d'impact dosimétrique ont été directement réalisés pour une activité unitaire de  $1 \text{ Bq.kg}^{-1}$  de chaque radionucléide dans le bois brut ou dans les écorces et non pour un dépôt initial de  $1 \text{ Bq.m}^{-2}$  au sol. Il résulte de ces considérations que l'impact associé aux accidents types étudiés par le CODIRPA n'a donc pas pu être évalué dans le cas de la filière bois, les données d'entrée disponibles pour ces accidents ne portant que sur le dépôt au sol par radionucléide et non la contamination du bois ou des écorces. Par ailleurs, dans la mesure où les outils de modélisation de l'écosystème forestier ne permettent pas non plus, à l'heure actuelle, d'évaluer de façon satisfaisante l'évolution en fonction du temps de la contamination des compartiments du bois entre eux, les impacts associés aux activités considérées aux stades court terme d'une part et moyen / long terme d'autre part ont donc été évalués de façon décorrélée, en considérant à chaque fois la valeur unitaire de  $1 \text{ Bq.kg}^{-1}$ . Seule la décroissance radioactive a été considérée sur une période de 6 mois entre les deux stades pour traduire la disparition des éléments à vie courte entre le court et le moyen terme.

Les calculs présentés ci-après traduisent donc la vulnérabilité de la filière bois à un stade donné, en comparant, radionucléide par radionucléide, l'impact dosimétrique associé aux activités de l'amont vers l'aval de la filière bois. La seule évolution de la contamination considérée d'un scénario à un autre correspond à la prise en compte des phénomènes de concentration dans les sous-produits de transformation (écorces, cendres, liqueur noire) tels que décrits au paragraphe 5.3.2.

#### **5.4.2 Scénarios étudiés pour chacun des deux stades de contamination**

Le Tableau n°13 ci-après présente les principales hypothèses retenues relatives aux situations d'exposition prises en compte pour décrire les activités de la filière bois. Dans ce tableau, les colonnes dont l'en-tête est de couleur verte représentent les activités prises en compte sur le court terme, celles qui sont de couleur bleue les activités prises en compte sur le moyen / long terme et en orange, celles qui sont prises en compte lors des deux stades. Dans ce dernier cas, la seule différence appliquée entre les deux stades réside dans la prise en compte d'un décalage temporel de 6 mois sur lequel est calculée une décroissance radioactive.

Pour les scénarios d'exposition du public, une approche différente a été adoptée. Dans la mesure où ces scénarios concernent pour certains l'usage du bois à des fins de chauffage et que les données relatives au comportement des radionucléides lors du processus de combustion ne sont pleinement disponibles que pour le césium, il a été décidé de procéder par comparaison entre les usages évalués dans la présente étude et d'autres scénarios extraits de la littérature (cf. Figure n° 18). Les situations prises en compte sont les suivantes :

- habitation dans une fuste<sup>2</sup> construite en bois contaminé (résultats issus de la présente étude) ;
- exposition aux rejets atmosphériques d'une chaufferie collective alimentée avec des granulés de bois contaminé (résultats issus de [21]) ;
- chauffage domestique avec du bois contaminé (résultats issus de [35])
- lecture d'un journal imprimé sur du papier fabriqué à partir de pulpe de bois contaminé (résultats issus de la présente étude) ;

<sup>2</sup> Fuste : maison construite en rondins de bois brut

	Bûcheronnage	Transport de grumes	Gestion de parc à grumes	Stockage de liqueur noire	Gestion du stockage des cendres	Gestion des bobines de papier journal	Gestion des bobines de papier blanchi	Lecture d'un journal	Gestion des écorces	Sciage	Menuiserie	Chantier fuste	Habitation fuste	Contrôle emballage bois
Source d'exposition	Forêt contaminée Troncs contaminés poussières contaminées	Troncs contaminés à cœur ou en surface	Troncs contaminés à cœur ou en surface	Tank de liqueur noire issue de la fabrication de la pâte à papier	Stockage de cendres issues de la combustion de liqueur noire et autres résidus	Bobine de papier journal contaminée	Bobine de papier blanchi contaminée	Feuilles de papiers contaminées	Ecorces contaminées	Troncs contaminés + poussières issues du sciage	Planches contaminées + poussières de ponçage	Troncs contaminés	Murs et toit de panneaux contaminés	Caisse faite de
Cible	Adulte	Adulte	Adulte	Adulte	Adulte	Adulte	Adulte	Adulte	Adulte	Adulte	Adulte	Adulte	Adulte	Adulte
Voies d'exposition	exposition externe à la contamination de l'environnement et des troncs inhalation de poussières contaminées	exposition externe au chargement de bois	exposition externe face aux piles de grumes	exposition externe au-dessus du tank	exposition externe lors du transport de la bobine	exposition externe lors du transport de la bobine	exposition externe face au journal	exposition externe face au tas d'écorce	exposition externe et inhalation de poussières ingestion involontaire de poussières	exposition externe (bêta et gamma) et inhalation de poussières	exposition externe et inhalation de poussières	exposition externe	exposition externe	exposition externe
Durée de l'exposition	1 an	1 an	1 an	1 an	1 an	1 an	1 an	1 an	1 an	1 an	1 an	1 an	1 an	1 an
Nombre de jours / occurrences	200 jours	200 jours	200 jours	200 jours	200 jours	200 jours	200 jours	365 jours	200 jours	200 jours	200 jours	200 jours dont 30 jours de chantier	365 jours	200 jours
Nbre d'heures par jour ou par occurrence	8h/jour	6h/jour	8h/jour	1h/jour	1h/jour	1h/jour	1h/jour	1h/jour	1h/jour	8h/jour	8h/jour	8h/jour	16h/jour	5 min par caisse 10 fois par jour

Tableau n° 13: Principales hypothèses retenues pour décrire les situations d'exposition dans la filière bois

### 5.4.3 Résultats des évaluations d'impact radiologique

Les résultats détaillés des calculs pour une contamination unitaire de  $1 \text{ Bq.kg}^{-1}$  dans le bois par radionucléide sont présentés en Annexe 3. Les Figure n° 16 et Figure n° 17 présentent ces mêmes résultats pour les principaux radionucléides au stade court terme, puis au stade moyen / long terme.

En complément, la Figure n° 18 présente les résultats de différents scénarios d'usage du bois transformé, par le public.

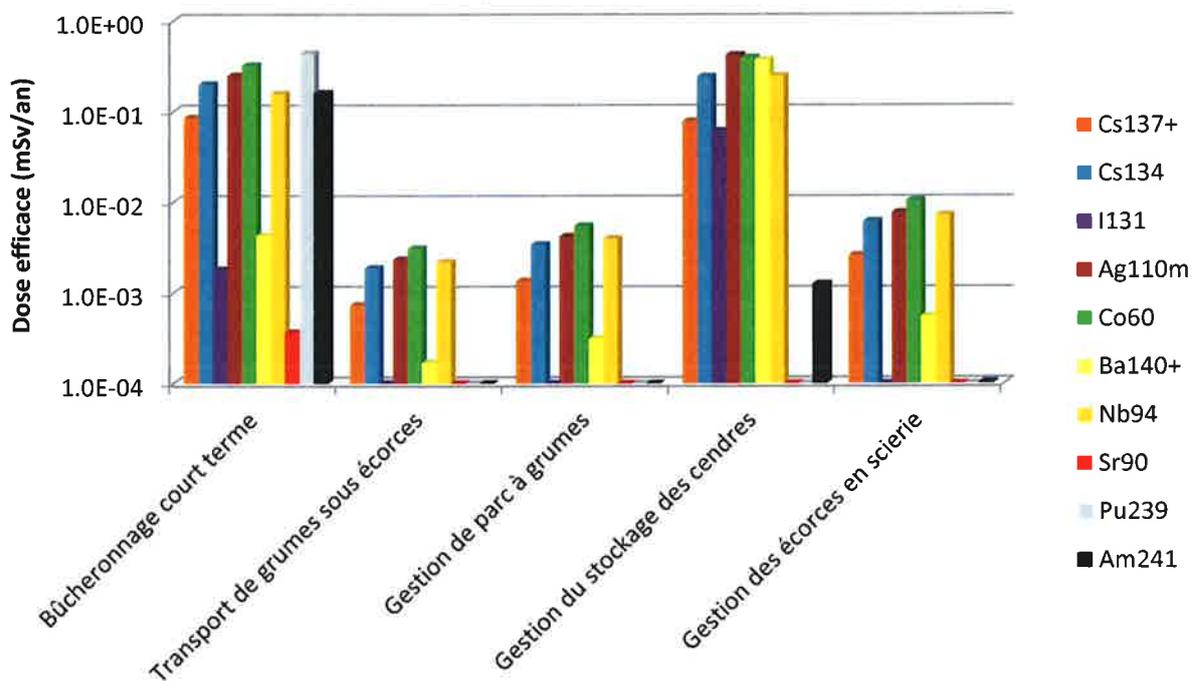


Figure n° 16 : Résultats des évaluations dosimétriques associées à une contamination unitaire de  $1 \text{ Bq.kg}^{-1}$  pour les situations d'exposition associées à la filière bois - Stade du court terme

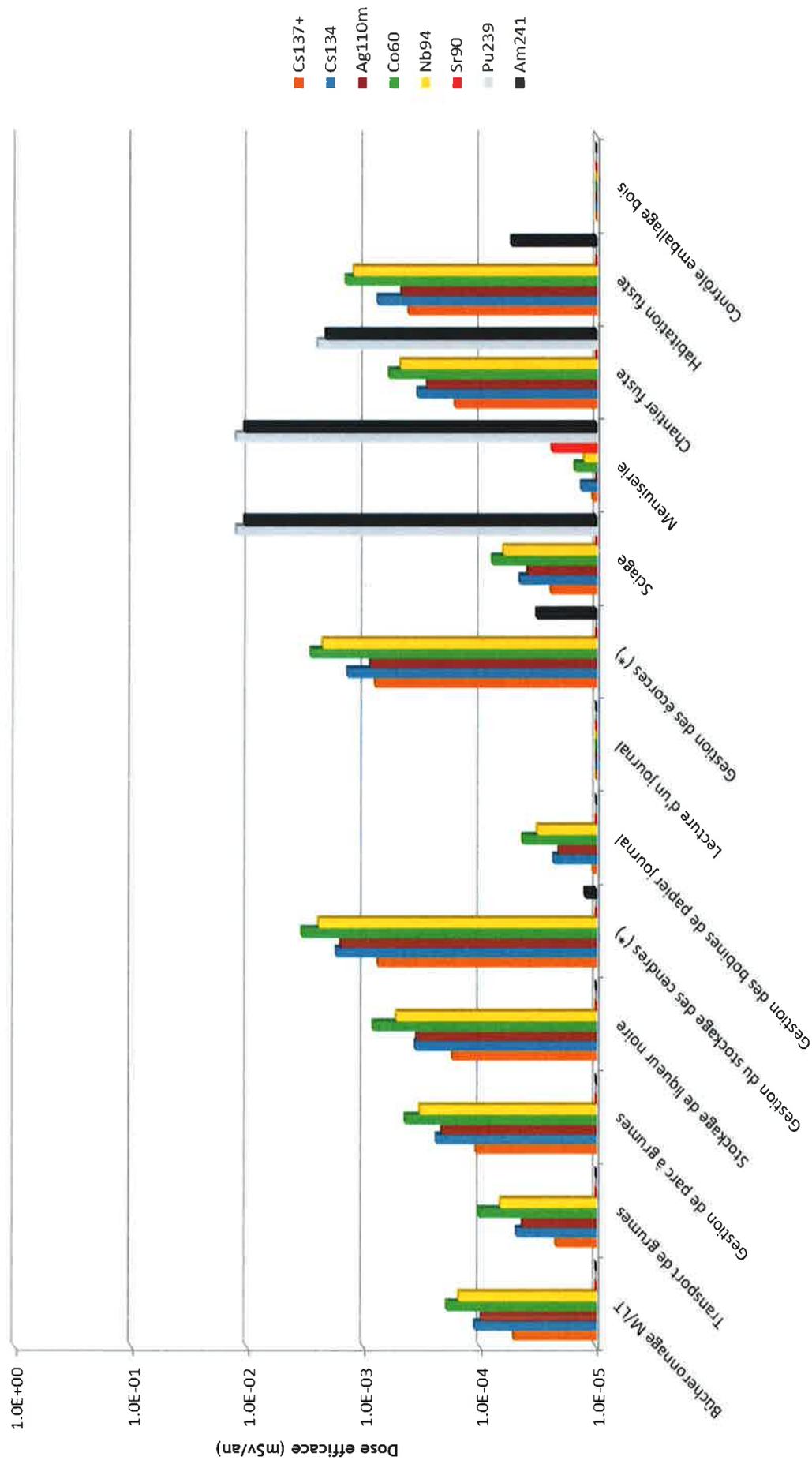


Figure n° 17 : Résultats des évaluations dosimétriques associées à une contamination unitaire de 1 Bq.kg<sup>-1</sup> dans le bois, pour les situations d'exposition associées à la filière bois - Stade du moyen / long terme

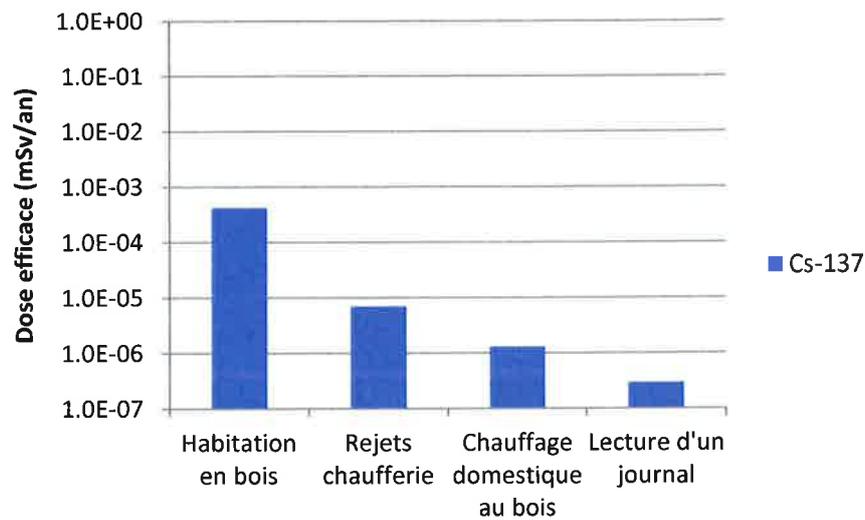


Figure n° 18 : Etudes comparatives de l'impact de différents scénarios d'usage du bois sur le public pour une contamination unitaire de  $1 \text{ Bq.kg}^{-1}$  de  $^{137}\text{Cs}$  dans le bois.

#### 5.4.4 Discussion

Les résultats de la Figure n° 16 montrent que, pour un radionucléide donné, à court terme, les scénarios conduisant à l'impact le plus important sont ceux du bûcheronnage et de la gestion des cendres sur le site d'une installation de brûlage des écorces. En comparaison, les autres scénarios ont des impacts environ un à deux ordre de grandeur plus faibles. Dans le cas du bûcheronnage ceci s'explique par la concomitance de la contamination de l'environnement et de celle des arbres ainsi que par la proximité des ouvriers avec les sources de contamination. Dans le cas de la gestion des cendres, la plus forte concentration de la radioactivité induit des doses proportionnellement plus importantes. L'impact des radionucléides émetteurs alpha n'est notable que pour le scénario de bûcheronnage qui prend en compte l'inhalation de poussières de bois.

Pour les scénarios à moyen /long terme (Figure n° 17), les ordres de grandeur calculés sont plus faibles que ceux du court terme. Pour un radionucléide donné, en dehors de la décroissance radioactive, cette différence peut également s'expliquer par le fait que la source de contamination évolue. La radioactivité n'est plus fixée sur la surface des troncs mais diluée dans la masse au cœur du bois. Ce phénomène est notamment visible sur le scénario bûcheronnage. Enfin, il est à noter également le fait que les scénarios liés à l'habitation (chantier et vie dans une maison en bois) présentent un impact du même ordre de grandeur que les autres situations d'exposition considérées.

**Il est important de noter que ces résultats ne peuvent être que qualitatifs dans la mesure où l'évolution de la contamination par transfert entre les différents compartiments du bois et les différences de comportement des radionucléides dans le bois ne sont pas prises en compte.**

Pour ce qui est de l'impact sur le public (Figure n° 18), il apparaît que le scénario d'habitation dans une maison en bois présente l'impact le plus important et que les autres situations prises en compte conduisent à des impacts significativement plus faibles en comparaison, en considérant une contamination unitaire de  $1 \text{ Bq.kg}^{-1}$  de  $^{137}\text{Cs}$  dans le bois.

## 6 LE CAS D'UN PARC AUTOMOBILE

Le quatrième cas traité dans la présente étude correspond à celui d'un parc automobile de véhicules neufs qui subirait les retombées d'un accident nucléaire. Les situations d'exposition correspondantes seraient celles liées à la gestion du parc après la contamination, le transport des véhicules vers leur lieu de vente, leur contrôle radiologique et enfin leur conduite par des personnes du public.

Le détail de ces situations ainsi que le retour d'expérience issu de l'accident de Fukushima sont présentés ci-dessous.

### 6.1 Enseignements tirés de l'accident de Fukushima

#### 6.1.1 Éléments sur la contamination des véhicules au Japon et sur les dispositions mises en place pour leur mise sur le marché

L'industrie automobile japonaise a accusé un recul des ventes de voitures de près de 60 % au mois de mars 2011. Toutefois, ces pertes exceptionnelles n'ont pas été causées par l'accident de Fukushima mais par les répercussions du tremblement de terre sur la fourniture de courant électrique et l'approvisionnement en pièces détachées.

Concernant la contamination radioactive des véhicules neufs du fait des retombées atmosphériques de l'accident de Fukushima, les constructeurs japonais ont très vite mis en place des contrôles aussi bien sur les voitures neuves que dans les ports afin de rassurer les importateurs [54]. Il en résulte que la question de la contamination des véhicules neufs ne semble pas avoir soulevé beaucoup d'interrogations au Japon et dans le monde après l'accident de Fukushima.

La question se pose différemment pour ce qui concerne les véhicules d'occasion.

Des études scientifiques et des résultats de contrôles réalisés lors de transactions commerciales confirment qu'un véhicule circulant dans une zone contaminée est susceptible de présenter des points de concentration de poussières chargées en radionucléides. Des mesures réalisées par autoradiographie aux rayons X sur des filtres à air ont ainsi montré des concentrations en poussières contaminées d'autant plus importantes que les zones de circulation étaient proches de la centrale de Fukushima Dai-ichi [55]. Il apparaît par ailleurs que les systèmes de filtration de l'air ne sont pas les seuls points de concentration de particules contaminées. Les pneus et les passages de roue, les essuie-glaces ainsi que les moquettes et les tissus intérieurs sont susceptibles de présenter également des zones de concentration. Certains véhicules peuvent également présenter une contamination plus diffuse, sans qu'il soit possible d'en identifier l'origine par manque de précision sur les mesures réalisées. Le journal Asahi, cité par le Telegraph rapporte ainsi le cas d'un minivan en provenance d'Iwaki contrôlé avec un débit de dose de 110  $\mu\text{Sv/h}$  [56]. Après décontamination, changement des filtres, des essuie-glaces et des pneus, le débit de dose mesuré persistait à 30  $\mu\text{Sv/h}$ .

Le commerce des voitures d'occasion japonaises présente également une situation plus contrastée que celui des voitures neuves.

Pour ce qui concerne les véhicules destinés à l'exportation, selon l'association des professionnels du domaine (the Japan Used Motor Vehicle Exporters' Association), des contrôles sont systématiquement mis en œuvre afin de vérifier la conformité des voitures avec un seuil de 0,3  $\mu\text{Sv/h}$ . Malgré ces contrôles, des cas de contamination ont été repérés à réception de lots de voiture d'occasion exportés notamment vers la Russie ou certains pays d'Afrique (Kenya, Tanzanie, Ouganda,..). A titre d'exemple, en 2012, la Russie, premier acheteur de véhicules d'occasion du Japon, a importé 132 000 voitures d'occasion du Japon. Sur l'ensemble, seuls 300 véhicules ont été déclarés contaminés, le seuil de contrôle étant à

0,2  $\mu\text{Sv/h}$ , inférieur à celui mis en place au Japon. Les autorités russes déclaraient en août 2013 que le nombre de véhicules contrôlés contaminés était en diminution régulière depuis 2011 [57]. En 2014, des contrôles positifs persistaient cependant, avec par exemple des véhicules présentant des débits de dose de l'ordre de 5  $\mu\text{Sv/h}$ , mis en quarantaine à la douane de Vladivostok [58].

Pour ce qui concerne les transactions sur le marché japonais, divers médias rapportent le cas de véhicules plus contaminés dont la trace a été perdue suite à des ventes aux enchères. Le cas du minivan acheté à Iwaki en est un exemple. Contrôlé puis décontaminé par son acheteur initial, il a tout de même été revendu sur le marché japonais avec un débit de dose persistant de 30  $\mu\text{Sv/h}$ .

### 6.1.2 Evolution de la contamination des véhicules

Lors de cette étude, aucune donnée relative à l'évolution de la contamination des véhicules circulant dans une zone contaminée n'a été trouvée. Il n'est donc pas possible de dire si la contamination d'une voiture peut augmenter avec le temps, se stabiliser par équilibre entre les apports et les pertes (par exemple par temps de pluie) ou bien diminuer par décontamination « naturelle ».

Pour ce qui concerne les apports par les poussières, des études scientifiques [58] et les programmes de surveillance de la qualité de l'air menés par les autorités japonaises [58] montrent une tendance nette à la diminution de la radioactivité des poussières en suspension dans l'air. Des mesures réalisées à Minamisoma city montrent ainsi une baisse de la radioactivité des poussières de l'air de 0,9  $\text{Bq.m}^{-3}$  en août 2011 à 0,08  $\text{Bq.m}^{-3}$  en août 2012.

Compte tenu de ces données, il est probable que la contamination des véhicules nouvellement mis en circulation baisse au fur et à mesure du temps.

## 6.2 Les situations prises en compte en France

Etant données les informations apportées par l'étude de la situation au Japon, il a été décidé de considérer également le cas des voitures d'occasion en complément de celui des voitures neuves afin de comparer les impacts dosimétriques associés pour une personne du public.

Au total, cinq scénarios d'exposition ont été considérés :

- le cas d'un gestionnaire de parc automobile, en charge de la préparation des véhicules neufs avant commercialisation. Les véhicules sont supposés avoir une contamination uniforme sur l'ensemble de la carrosserie, cette contamination étant labile par contact des mains avec la voiture ;
- le cas d'un inspecteur en charge du contrôle de la contamination des véhicules ;
- le cas d'un transporteur de véhicules neufs uniformément contaminés ;
- le cas d'un conducteur d'un véhicule neuf utilisant quotidiennement son véhicule chaque jour de l'année. Il est accompagné d'un enfant assis à l'arrière du véhicule ;
- le même scénario que le précédent mais pour un véhicule d'occasion. En absence de données précises et du fait de la limitation des possibilités de modélisation, il a été considéré que le véhicule d'occasion cumulait une contamination supplémentaire au niveau des pneus, contamination 30 fois plus importante que celle du reste de la carrosserie.

## 6.3 Evaluations d'impact dosimétrique

### 6.3.1 Hypothèses de calcul

#### 6.3.1.1 *Hypothèse relative à la prise en compte du dépôt de radionucléides*

Sans information sur les capacités d'adsorption des radionucléides sur la carrosserie ou, à l'opposé, sur le caractère labile du dépôt, une hypothèse prudente de persistance de la contamination au cours du temps a été retenue. Cette hypothèse apparaît comme un compromis entre les pertes de contamination par lessivage du fait des intempéries et les possibles re-contaminations par les poussières provenant de l'environnement.

Pour le cas du véhicule d'occasion, il n'a pas été tenu compte de la contamination potentielle à l'intérieur du véhicule dans la mesure où aucune information n'est disponible sur les niveaux d'imprégnation de l'habillement, des tissus et des moquettes intérieurs. Cette hypothèse est potentiellement un facteur de sous-estimation de l'impact.

#### 6.3.1.2 *Paramètres descriptifs des situations d'exposition*

Le Tableau n° 14 ci-dessous présente les principales hypothèses retenues pour décrire les situations d'exposition liées aux opérations de gestion d'un parc automobile suite à un dépôt, et aux activités suivantes jusqu'à l'usage par une personne du public.

	Gestionnaire de parc automobile	Contrôle radiologique	Transport de véhicules neufs	Conduite de véhicule neuf	Conduite de véhicule d'occasion
Source d'exposition	Contamination uniforme de la carrosserie	Contamination uniforme de la carrosserie	Contamination uniforme de la carrosserie / 4 véhicules transportés	Contamination uniforme de la carrosserie	Contamination uniforme de la carrosserie et contamination des pneus et passage de roue 30 fois supérieure à celle de la carrosserie
Cible	Adulte	Adulte	Adulte	Adulte + enfant de 2-7 ans	Adulte + enfant de 2-7 ans
Voies d'exposition	exposition externe à l'intérieur et à l'extérieur du véhicule Ingestion involontaire par contact des mains avec la carrosserie et mise à la bouche	exposition externe à l'extérieur du véhicule Ingestion involontaire par contact des mains avec la carrosserie et mise à la bouche	Exposition externe lors de la conduite du camion	exposition externe à l'intérieur et à l'extérieur du véhicule Ingestion involontaire par contact des mains avec la carrosserie et mise à la bouche	exposition externe à l'intérieur et à l'extérieur du véhicule Ingestion involontaire par contact des mains avec la carrosserie et mise à la bouche
Durée de l'exposition	1 an	1 an	1 mois	1 an	1 an
Nbre d'heures par jour	8 h	10 minutes par véhicule, 10 fois par jour	6 h	1 h	1 h
Nombre de jours	200 jours	200 jours	20 jours	365	365
					

Tableau n° 14: Principales hypothèses retenues pour décrire les situations d'exposition dans la filière automobile

### 6.3.2 Résultats des évaluations

Les calculs pour un dépôt unitaire de  $1 \text{ Bq.cm}^{-2}$  par radionucléides sont présentés en Annexe 3. La Figure n° 19 présente les résultats des calculs d'impact dosimétrique pour les scénarios APRP, rejet de plutonium et accident grave pour le cas du parc automobile.

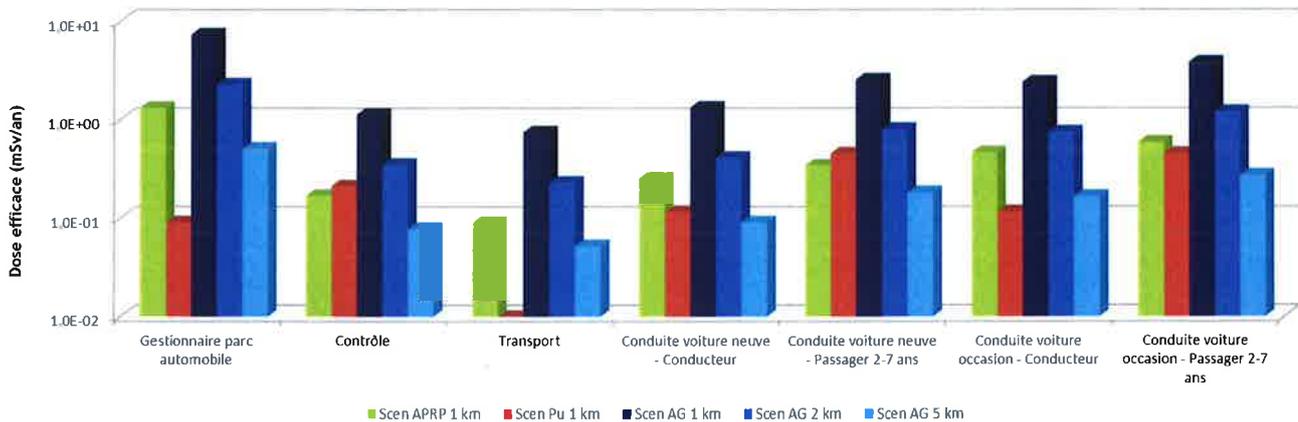


Figure n° 19 : Résultats des évaluations dosimétriques pour les situations d'exposition associées au cas du parc automobile

### 6.3.3 Discussion

La situation pour laquelle l'impact est le plus important correspond au cas du gestionnaire de parc qui est soumis à la fois à la contamination déposée sur les véhicules et à celle présente au sol, dans son environnement.

Pour les autres scénarios d'exposition professionnelle, que ce soit le transport ou les opérations de contrôle, les doses calculées sont environ un ordre de grandeur plus faible. Les scénarios de conduite d'un véhicule tout au long de l'année montrent que cet usage peut être sensible. Compte tenu des hypothèses retenues dans les calculs, les évaluations confirment que l'utilisation d'une voiture d'occasion induit une exposition supérieure à celle découlant de la conduite d'une voiture neuve. Pour ces scénarios, les voies d'exposition considérées sont l'exposition externe et l'ingestion involontaire de contamination déposée sur les mains et portée ensuite à la bouche. De ce fait, l'impact serait légèrement plus important pour le passager s'il s'agit d'un enfant de 2-7 ans, que pour le conducteur du fait de la plus grande sensibilité de l'enfant vis-à-vis de l'ingestion. Cette différence de sensibilité s'exprime de façon encore plus marquée dans le cas d'une contamination par du plutonium.

En situation post-accidentelle, une vigilance serait donc à adopter sur la contamination des véhicules personnels, voire des véhicules professionnels si leur temps d'utilisation sont importants. Ce pourrait être typiquement le cas d'un chauffeur de taxi dont l'exposition pourraient être environ 5 fois plus importante que celle d'un particulier si l'on considère qu'il conduit 8 heures par jours, 200 jours par an.

## 7 LE CAS DES PLASTIQUES ALIMENTAIRES

Cette situation a été retenue pour illustrer le cas de l'exposition d'un groupe de population sensible, ici un nourrisson, au travers de l'utilisation d'un objet en plastique contaminé suite à un accident radiologique ou nucléaire et en contact avec des produits alimentaires. L'exemple traité porte sur le cas d'un biberon en plastique qui se contaminerait suite au passage d'un panache radioactif et qui serait ensuite utilisé, sans lavage, pour la préparation du repas d'un nourrisson.

Ce cas n'a pas vocation à refléter une réalité de la vie courante, en situation d'accident, mais davantage à traiter de la sensibilité d'un usage. Il ne s'appuie par ailleurs sur aucun retour d'expérience d'un accident passé.

### 7.1 Détail du scénario retenu

Il est fait l'hypothèse qu'un biberon en plastique d'une contenance de 330 ml est laissé soumis à un dépôt de radioactivité généré par une situation accidentelle. Les surfaces extérieures et intérieures sont supposées uniformément contaminées suite à un dépôt de radionucléides. Il n'est considéré qu'une seule prise de biberon et donc une exposition unique et ponctuelle. Ce biberon est utilisé sans lavage pour la préparation du repas d'un nourrisson, typiquement entre 1 et 2 ans. Le dépôt à l'intérieur du biberon est supposé se diluer complètement dans le lait contenu dans le biberon et être ensuite ingéré par l'enfant. Par ailleurs, la contamination des mains de l'enfant après la prise du biberon est supposée donner lieu à une exposition interne, par contact mains/ bouche et ingestion involontaire.

### 7.2 Résultats des évaluations d'impact dosimétrique

Les calculs pour un dépôt unitaire de  $1 \text{ Bq.cm}^{-2}$  par radionucléides sont présentés en Annexe 3. La Figure n° 20 ci-après présente les résultats des calculs d'impact dosimétrique pour les scénarios APRP, rejet de plutonium et accident grave pour le scénario « biberon ».

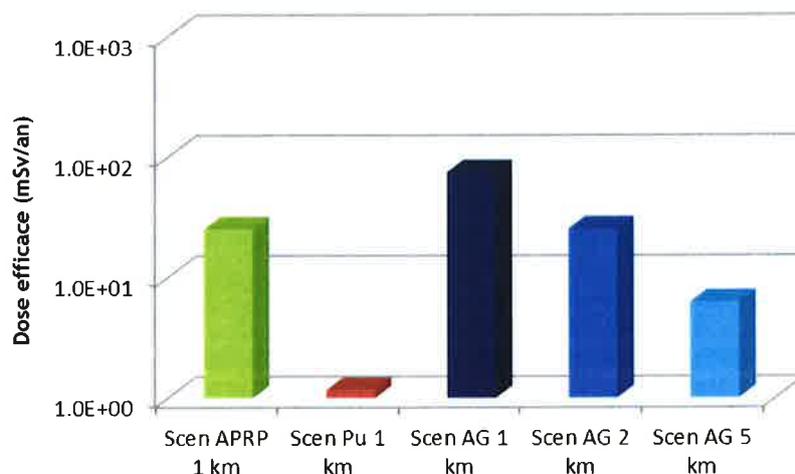


Figure n° 20 : Résultats des évaluations dosimétriques pour le scénario biberon

## 7.3 Discussion

Etant données les hypothèses prises en compte, ce scénario conduit à des doses efficaces importantes, comprises entre quelques mSv à une centaine de mSv suivant l'accident considéré. Dans la mesure où ce scénario ne recouvre aucune situation réaliste, les résultats présentés ici n'ont vocation qu'à fournir un ordre de grandeur de l'exposition associée à un usage extrême d'un objet contaminé et éventuellement à souligner la nécessité de mettre en œuvre des bonnes pratiques d'hygiène lors du retour ou du séjour dans une zone ayant reçu les retombées d'un accident nucléaire ou radiologique, y compris à l'intérieur de l'habitat.

*NB : Il semble peu probable qu'une situation d'accident radiologique ou nucléaire puisse conduire à la contamination des matières premières pétrochimiques utilisées pour la fabrication des plastiques alimentaires courants. Ce cas n'a donc pas été exploré. Il existe cependant aujourd'hui des plastiques élaborés à partir de matières végétales, utilisés notamment pour la fabrication d'objets à usage alimentaire. La contamination des cultures végétales utilisées comme matière première pourrait donc donner lieu à une contamination de ces plastiques. Toutefois, en l'état actuel des connaissances, il est impossible de caractériser le transfert de contamination de la plante vers la matière plastique et donc d'élaborer des scénarios d'exposition réalistes pour ce qui concerne les plastiques alimentaires.*

## 8 CONCLUSION GENERALE

L'objectif de l'étude était d'apporter des éléments de radioprotection basés, d'une part sur le retour d'expérience des accidents de Tchernobyl et de Fukushima, d'autre part sur des évaluations d'impact dosimétrique, pour apprécier les enjeux associés à la gestion des biens manufacturés en situation post-accidentelle. A cette fin, l'étude a porté sur cinq cas différents à savoir les filières de production et de transformation du lin, du bois et des matériaux de construction, et les exemples de la gestion d'un parc automobile ou des plastiques alimentaires.

Les études menées suite aux accidents de Tchernobyl et de Fukushima montrent que, à l'exception de la filière bois, il n'y a pas réellement de retour d'expérience structuré et que les actions de gestion mises en œuvre l'ont principalement été en réaction à la découverte de cas ponctuels de contamination. Que ce soit dans le cas des matériaux de construction ou pour les véhicules d'occasion affectés par les retombées de l'accident de Fukushima, les incidents mis en évidence ont pu conduire à des expositions significatives de personnes du public et nécessiter des contrôles de grande ampleur.

Dans le cas de la filière bois, en particulier après l'accident de Tchernobyl, des réglementations ont été adoptées pour encadrer les différents usages du bois et des biens manufacturés en découlant. Cette réglementation a perduré au cours du temps et est encore en vigueur dans les pays de l'Est concernés. Au Japon, une réglementation équivalente se met en place avec l'émergence progressive de la problématique de la contamination du bois, quelques années après l'accident de Fukushima.

Même si elles ne permettent pas de bâtir un plan de contrôle et de gestion des biens manufacturés, ces études sont cependant riches en informations et en données sur le comportement des radionucléides, les phénomènes de transfert et/ou de transformation en jeu dans les filières de production des biens manufacturés.

Pour ce qui concerne les évaluations réalisées par l'IRSN, différents commentaires peuvent être émis. Même si l'étude s'est attachée à apporter le plus de réalisme possible dans la description des cinq exemples à traiter, il n'en demeure pas moins

qu'elle conserve un caractère pénalisant du fait des incertitudes sur la contamination initiale des milieux et son exportation en aval des filières concernées. Si certains phénomènes de dilution ou de concentration ont bien été identifiés (concentration par combustion, dilution par mélange de constituants dans le béton,...), d'autres ont dû être écartés (perte de contamination du lin lors du rouissage) faute de connaissances étayées.

Les résultats obtenus fournissent cependant une bonne image de la vulnérabilité des filières au regard d'une contamination radioactive, en comparant les impacts dosimétriques associés aux différentes activités industrielles, de contrôle ou d'usage les unes par rapport aux autres.

Il ressort ainsi que quatre cas peuvent être distingués :

- l'exposition des professionnels au stade de l'extraction des matières premières. La concomitance de la contamination de l'environnement de travail et des matières manipulées entraîne généralement un impact plus important que pour les activités aval ;
- parmi les activités professionnelles de transformation des matières premières et des sous-produits, certains scénarios montrent des impacts dosimétriques significatifs lorsque les individus concernés sont exposés à de grandes quantités de produits (ex. de la gestion des stocks), à des matières dont la radioactivité est concentrée (ex. gestion des cendres) et/ou cumul des temps d'exposition importants ;
- dans le cas particulier des contrôles de contamination que pourraient mener les pouvoirs publics, il apparaît que les professionnels concernés ne seraient que faiblement exposés comparativement aux professionnels des activités industrielles ;
- enfin, s'agissant des personnes du public, seuls les scénarios décrivant l'exposition dans une habitation (cas du béton, des matériaux de terre cuite, du bois ou des matériaux d'isolation tirés du lin) sont susceptibles de conduire à des impacts significatifs. Il apparaît donc que, exception faite du cas des plastiques alimentaires, les usages finaux par le public de biens manufacturés contaminés ne sont pas les situations les plus limitantes dans la gestion des filières, du point de vue de la radioprotection.

Pour les scénarios d'accident considérés dans la présente étude, seuls quelques postes de travail présenteraient des impacts dosimétriques de quelques millisievert, seulement deux étant supérieurs à une dizaine de millisievert (scénario d'exposition en carrière, exposition du fait des entreposages en milieu agricole). Dans la mesure où seuls les dépôts au plus près de l'installation accidentée ont été considérés sans toutefois prendre en compte les actions de protection qui seraient associées, il peut être considéré qu'au-delà des tous premiers kilomètres autour de l'installation, la production de biens manufacturés à partir de matériaux extraits de l'environnement n'entraînerait pas de problème de radioprotection majeurs, pour les accidents et les filières considérées ici.

Du point de vue de la méthodologie d'étude d'une filière, ces résultats montrent également, qu'il est indispensable de s'attacher à la décrire dans son ensemble, en considérant tous les secteurs d'activité et non en se focalisant sur l'usage final du bien manufacturé par le public. En effet, considérer l'usage final ne garantit pas d'être conservatif par rapport à l'ensemble des expositions potentielles. En second lieu, il est indispensable d'étudier la cinétique d'évolution de la contamination de l'amont vers l'aval d'une filière en prenant en compte également les flux de matière. Ne prendre en compte que le césium à l'échéance de 1 an, par exemple, ne garantit pas que d'autres radionucléides à vie plus courte n'aient pas un impact significatif à plus court terme.

Au-delà des enjeux en matière de radioprotection, la gestion d'une contamination des biens non-alimentaires à la suite d'une situation accidentelle s'accompagnera d'enjeux aussi bien économiques, que sociétaux et médiatiques, non couverts par la présente étude. Pour les accidents étudiés ici, la gestion des matières premières et des produits contaminés dans les premiers kilomètres autour du point de rejets reposeraient principalement sur la réduction des risques d'exposition aux rayonnements ionisants. La présence mesurable de contamination des biens non-alimentaires bien au-delà de ce périmètre ferait que les considérations économiques, sociétales et médiatiques prévaudraient sur le risque radiologique.

Enfin, la prise en compte de l'ensemble de ces enjeux ne peut trouver de réponse par la seule fixation de seuils de gestion basés sur un niveau de contamination radioactive. A titre d'exemple, les biens non-alimentaires respectant les seuils de ce type utilisés au Japon après l'accident de la centrale de Fukushima ont pu poser des difficultés en termes d'acceptation par la population.

## Liste des références

- [1] ASN, 2012 - Eléments de doctrine pour la gestion post-accidentelle d'un accident nucléaire, Comité directeur pour la gestion de la phase post-accidentelle d'un accident nucléaire, Autorité de Sûreté Nucléaire.
- [2] DURHAM J.S.- 1992 - VARSKIN Mod 2 and SADDE Mod 2 - Computer Codes for Assessing Skin Dose from Skin Contamination, Rapport NUREG/CR-5873 PNL-7913 DP, Pacific Northwest Laboratory, USA, 1992
- [3] ICRU report 56, 1997. Dosimetry of External Beta Rays for Radiation Protection, International Commission on Radiation Units and Measurements, 7910 Woodmont Avenue, Bethesda, Maryland, USA, ISBN 0-913394-55-6
- [4] Japan Concrete Institute, 2014 - Technical Committee on the Containment of Radioactive Contaminants and Safe Use of Concrete Materials, Committee Report : JCI- TC 124A
- [5] Japan Property Central, janvier 2012, <http://japanpropertycentral.com/2012/01/high-radiation-levels-from-concrete-in-new-apartment-building/>
- [6] The Telegraph, Ryall J. - Article du 19 janvier 2012 - Fears over radioactive gravel from Fukushima <http://www.telegraph.co.uk/news/worldnews/asia/japan/9024962/Fears-over-radioactive-gravel-from-Fukushima.html>
- [7] NHK World, Article du 21 janvier 2012 - Contaminated crushed stone found in more houses - [https://web.archive.org/web/20120124020834/http://www3.nhk.or.jp/daily/english/20120121\\_17.html](https://web.archive.org/web/20120124020834/http://www3.nhk.or.jp/daily/english/20120121_17.html)
- [8] The Mainichi Daily News, Article du 16 février 2012, Massive levels of radioactive cesium detected at quarry near Fukushima plant -<https://web.archive.org/web/20120219210147/http://mdn.mainichi.jp/mdnnews/news/20120216p2a00m0na006000c.html>
- [9] Japan Health Physics Society, 2014 - Issues and Recommendations Associated with Radiation Protection after Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Disaster. JHPS 28 November 2014
- [10] UNICEM, Union nationale des industries des carriers et des matériaux de construction <http://www.unicem.fr/wp-content/uploads/r4-les-metiers-de-a-ac-z.pdf>
- [11] UNICEM, 2011 - Carrières, poussières et environnement. Les études de l'UNICEM, Impacts industriels. ENCEM, février 2011, NRI-B3-11-G
- [12] Kornmann M., Matériaux de terre cuite -Matières de base et fabrication. Techniques de l'Ingénieur, C 905 V2, 10 mai 2009
- [13] Abdo J., Ciments. Techniques de l'Ingénieur, C 920 V1, 10 mai 2008
- [14] CIMbéton, Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre - Collection technique CIMbéton, Centre d'information sur le ciment et ses application, Fiches techniques G11 - Tome 2. Réédition janvier 2013
- [15] - Canadian Journal of Plant Science. Vol 48, pp 183-188, 1968
- [16] Evans E.J., Dekker, A.J., 1968 - Comparative Cs-137 content of agricultural crops grown in a contaminated soil.
- [17] Evans E.J., Dekker, A.J., 1961 - Comparative Sr90 content of agricultural crops grown in a contaminated soil. Canadian Journal of Plant Science. Vol 42, pp252-258, 1961

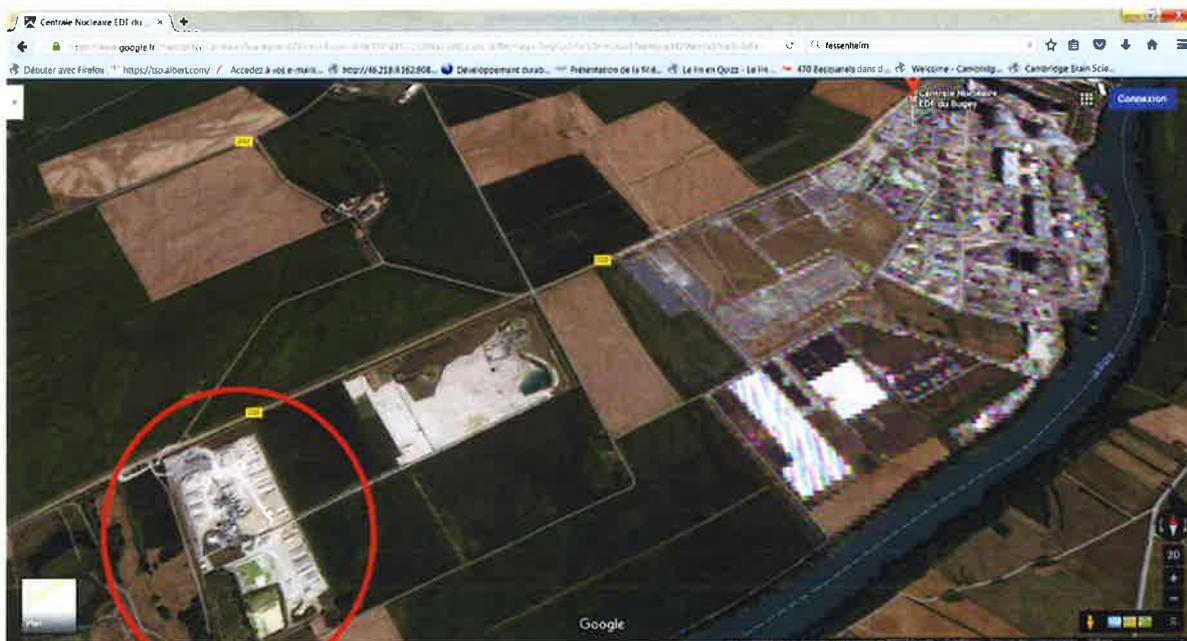
- [18] Vandenhove H., Van Hees M. - 2005 - Fibre crops as alternative land use for radioactively contaminated arable land. *Journal of Environmental Radioactivity*, n° 81, pp 131-141, 2005
- [19] IAEA, Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments, Technical Reports Series n° 472, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, VIENNA, 2010
- [20] Nakazato K. - Report regarding decontamination of radioisotopes by wash from polluted clothes derived from the Fukushima nuclear accident and estimation of wash on radiation safety of the general public. *Radiation Safety Management*, Vol. 12, n)2, pp 61-80
- [21] IRSN - 2013 - Evaluation de l'impact dosimétrique lié à l'usage de bois contaminé par du césium 137 comme combustible dans des chaufferies collectives ou industrielles et comme matériau dans la construction de maisons en bois. Rapport IRSN PRR-HOM/SER n° 2013-00008
- [22] . ADEME - 2007 - Mise en place d'une chaufferie au bois, Etude et installation d'une unité à alimentation automatique - EDP Sciences
- [23] Shaw G., 2007 - Radionuclides in forest ecosystems. *Radioactivity in the Environment*. Elsevier, Vol. 10, ISSN 1569-4860
- [24] Kato H., Onda Y., Gomi T.- 2012- Interception of the Fukushima reactor accident-derived <sup>137</sup>Cs, <sup>134</sup>Cs and <sup>131</sup>I by coniferous forest canopies. *Geophysical research Letters*, Vol.39L20403, 2012
- [25] Kato H., Onda Y., Hisadom K., Loffredo N., Kawamori A. - 2015 - Temporal changes in radiocesium deposition in various forest stands following the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. *Journal of Environmental Radioactivity* - <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.04.016>
- [26] Pröhl G.- 2008 - Interception of dry and wet deposited radionuclides by vegetation. *Journal of Environmental Radioactivity*, n° 100, pp 675-682, 2009
- [27] Thiry Y., Goor F., Riesen T., 2002 - The true distribution and accumulation of radiocesium in stem of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Journal of Environmental radioactivity*, n° 58, pp 243-259, 2002.
- [28] Garrec J.P., Suzuki T., Mahara.Y., Santry D.C, Miyahara S., Sugahara M., Zheng J; Kudo A.- Plutonium in Tree Rings from France and Japan. *Applied Radiation and Isotopes Journal*, Vol. 46, n° 11, pp 1271-178, 1995
- [29] Bondietti E. A., Momoshima N., Shortle W. C. and Smith K. T. (1990) A historical perspective on divalent cation trends in red spruce stemwood and the hypothetical relationship to acidic deposition. *Can. J. Forest Res.* 20, 1850.
- [30] Sokolov V.E., Krivolutski D.A., Voronov A.G., Shilova S.A., 1993 - Ecological After-Effects of the Radioactive Contamination in The Southern Urals. Nauka, Moscow (En Russe)
- [31] Kuroda K., Kagawa A., Tonosaki M. - 2013 - Radiocesium concentrations in bark, sapwood and heartwood of three species collected at Fukushima forests half a year after the Fukushima Dai-ichi nuclear accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, n° 122, pp 37-42, 2013
- [32] Ohashi S., Okada N., Tanaka A., Nakai W., Takano S. - 2014 - Radial and vertical distributions of radiocesium in tree stems of *Pinus densiflora* and *Quercus serrata* 1.5 y after the Fukushima nuclear disaster. *Journal of Environmental Radioactivity*, n° 134, pp 54-60. 2014

- [33] Agence Japonaise pour la forêt, 2011 - Rapport provisoire sur la distribution et l'analyse des matières radioactives dans la forêt - Agence Japonaise pour la forêt, Ministère de l'agriculture, des forêts et de la pêche. (En japonais) - <http://www.rinya.maff.go.jp/j/press/hozen/110930.html>
- [34] Mamikhin S.V., Tkhomirov F.A., Shcheglov A.I. - 1997 - Dynamics of  $^{137}\text{Cs}$  in the forests of the 30-km zone around the Chernobyl nuclear power plant. *The Science of the Total Environment*, n° 193, pp 169-177, 1997
- [35] IAEA, 2003 - Assessing radiation doses to the public from radionuclides in timber and wood products. International Atomic Energy Agency, Tecdoc 1376, October 2003.
- [36] Ravila A., Holm E. - 1992 - Flux and Concentration Processes of Radioactive Elements in the Forest Industry : Dosimetry, Biofuelled Heating Plants, the alkaline and the acidic pulp mill processes - Technical Physics Department, Lund University, Sweden - Report n° SSI P 663.92
- [37] Erlandsson B., Hedvall R., Mattsson S. - 1995 - Radionuclide concentration in fuels and ash products from biofuel heating plants. Department of Nuclear Physics, Lund University, Sweden - Report n° 02/95
- [38] Hedvall R. 1997 - Activity Concentrations of Radionuclides in Energy Production from Peat, Wood Chips and Straw - Radiation Physics Department, Lund University - Doctoral dissertation.
- [39] Ravila A., Holm E., 1994 - radionuclide elements in the forest industry. *The Science of the Total Environment*. n° 157, pp 339-356, 1994
- [40] Ravila A., Holm E., 1998 - A survey of present levels of radiocesium in Swedish pulp mill liquors and implications for wood radiocesium transfer factors. *The Science of the Total Environment*. N° 222, pp 185-192, 1998
- [41] Vaca F., Manjon G., Garcia-Leon M. - 2001 - Radioactive Discharges from an alkaline pulp mill located in the South of Spain. *Journal of Environmental Radioactivity*, n° 52, pp 91-97 - 2001
- [42] Manjon G., Vaca F., Garcia-Leon M. - 1996 - Artificial Long-lived Radionuclides ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ) in an alkaline Pulp Mill Located in the South of Spain. *Applied Radiation and Isotopes Journal*, Vol. 47, n° 9/10, pp 1097-1102, 1996
- [43] Vaca F., Manjon G., Garcia-Leon M. - 1999 -  $^{90}\text{Sr}$  in an alkaline pulp mill located in the South of Spain - *Journal of Environmental Radioactivity* n° 46 (1999), 327-344
- [44] Kobashi A. - 2009 - Radioactivity of  $^{137}\text{Cs}$  in Papers and Migration of the Nuclide in the Environment. *Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences*, Vol. 10, N°2, pp 1-5, 2009
- [45] Mahmoud K.R. - 2003 - Radioactivity in Egyptian newspapers, 4<sup>th</sup> Conference on Nuclear and Particle Physics, 11-15th October, 2003 - Fayoum, Egypt
- [46] IPSN, 1996 - Circonstances et conséquences de la pollution radioactive dans l'ancienne Union Soviétique. ISBN 2-11-089 375-3
- [47] Kato H., Onda Y. - 2014 - Temporal changes in the transfer of accidentally released  $^{137}\text{Cs}$  from tree crowns to the forest floor after the Fukushima Daiichi nuclear Power Plant Accident. *Progress in Nuclear Science and Technology*. Vol 4, pp 18-22, 2014
- [48] Fogh C.L., Byrne M.A., Andersson K.G., Bell K.F., Roed J., Goddard A.J.H., Vollmair D.V., Hotchkiss S.A.M. - 1999 - Quantitative Measurement of Aerosol Deposition on Skin, Hair and Clothing for Dosimetric Assessment. Risø National Laboratory, Denmark, report Risø-R-1075(EN), 1999

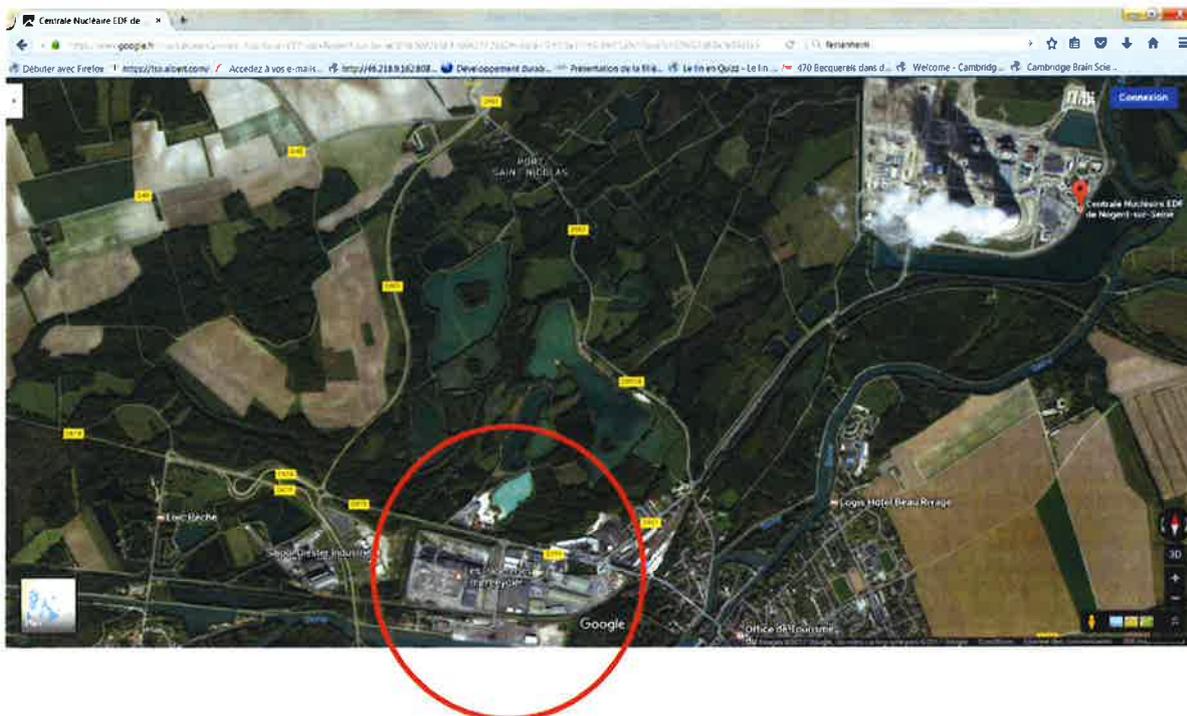
- [49] Japan Forest Agency - 2011 - Communiqué de presse du sur les valeurs de gestion du bois de chauffage et du charbon de bois - <http://www.rinya.maff.go.jp/j/press/tokuyou/111102.html> (en japonais)
- [50] Japan Forestry Agency - 2012 - Communiqué de presse du sur les valeurs de gestion du bois et des copeaux de bois à destination des cultures de champignons - - [http://www.rinya.maff.go.jp/j/press/tokuyou/120328\\_2.html](http://www.rinya.maff.go.jp/j/press/tokuyou/120328_2.html) (en japonais)
- [51] Yoshihara T., Matsumura H., Hashida S.N., Nagaoka T. - 2013 - Radiocesium contamination of 20 wood species and the corresponding gamma-ray dose rates around the canopies at 5 months after the Fukushima nuclear power plant accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, n° 115, pp 60-68. 2013
- [52] Akama A., Kiyono Y., Kanazashi T., Shichi K., 2013 - Survey of radioactive contamination of sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) shoots and male flowers in Fukushima prefecture. *Japan Journal For Environment*, Vol 55, n° 2, pp 105-111, 2013.
- [53] Tagami K., Uchida S., Ishii N., Kagiya S., 2012 - Translocation of radiocesium from stems and leaves of plants and the effect on radiocesium concentrations in newly emerged plant tissues. *Journal of Environmental Radioactivity*, n° 111, pp 65-69, 2012
- [54] L'Usine Nouvelle, 2011 - Article du 18 avril 2011 sur le site internet du journal : - <http://www.usinenouvelle.com/article/toyota-se-veut-rassurant-sur-la-radioactivite-des-voitures.N150261>
- [55] Kaltofen M., Measuring radioactive dust in northern Japan - Fukushima Daiichi isotopes in home and auto air filters and in children's shoes. Worcester Polytechnic Institute - Civil and Environmental Engineering
- [56] Ryall J., 2011 - Article du 26 Octobre 2011 -Japanese dealers selling 'radioactive cars'. *The Telegraph* <http://www.telegraph.co.uk/news/worldnews/asia/japan/8849664/Japanese-dealers-selling-radioactive-cars.html>
- [57] Wall Street Journal, 2013] - Article du 5 août 2013 sur le site internet du journal : <https://blogs.wsj.com/japanrealtime/2013/08/05/fukushima-watch-russia-claims-continued-used-car-contamination/>
- [58] Fukushima diary, 2014] - Article du 21 septembre 2014 sur le site internet du journal : <http://fukushima-diary.com/2014/09/26-times-much-radiation-level-detected-japanese-used-car-mitsubishi-pajero-russian-customs/>
- [59] Igarashi Y., Kajino M., Zaizen Y., Adachi K., Mikami M. - 2015 - Atmospheric radioactivity over Tsukuba, Japan: a summary of three years of observations after the FDNPP accident. *Progress in Earth and Planetary Science* (2015) 2:44 DOI 10.1186/s40645-015-0066-1
- [60] JAEA 2015 - Readings of Dust Sampling in 20km Zone of TEPCO Fukushima Dai-ichi NPP From April 2011 to January 2014 - The Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, and the Secretariat of the Nuclear Regulation Authority - <http://emdb.jaea.go.jp/emdb/en/portals/20730202/>

# ANNEXE 1 EXEMPLE D'ACTIVITES INDUSTRIELLES APPARTENANT AUX FILIERES TRAITES, INSTALLEE DANS L'ENVIRONNEMENT D'UNE INSTALLATION NUCLEAIRE

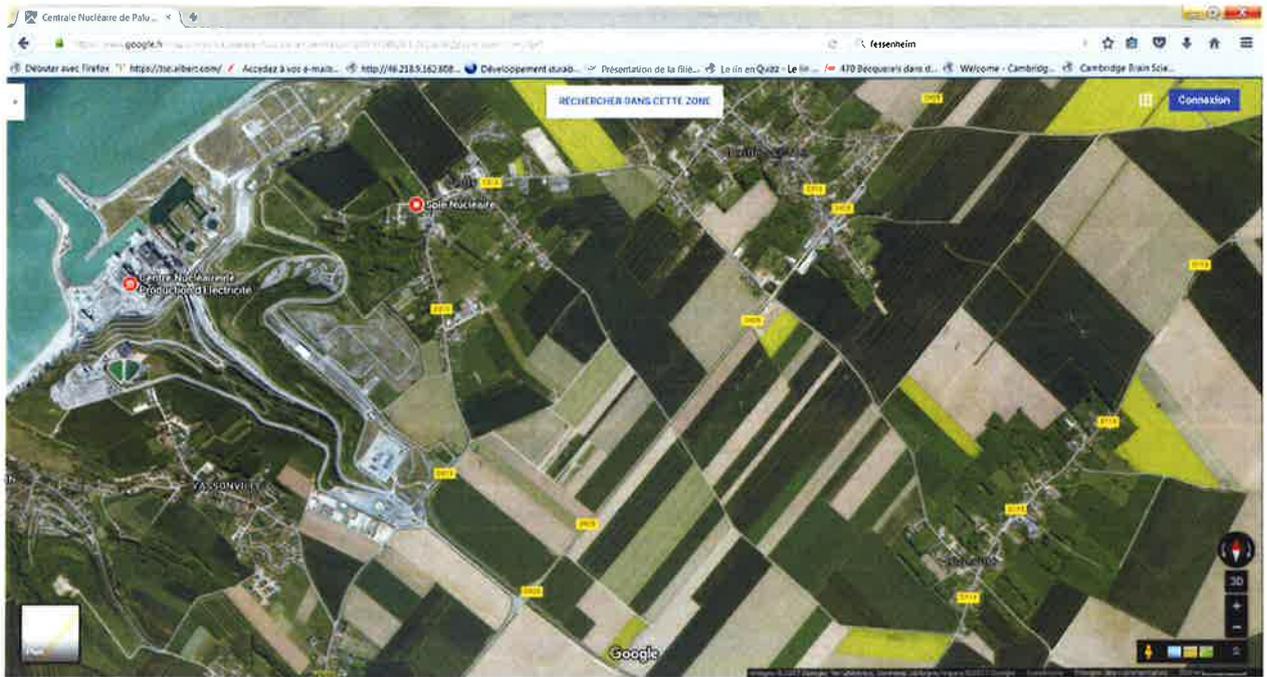
## Carrière



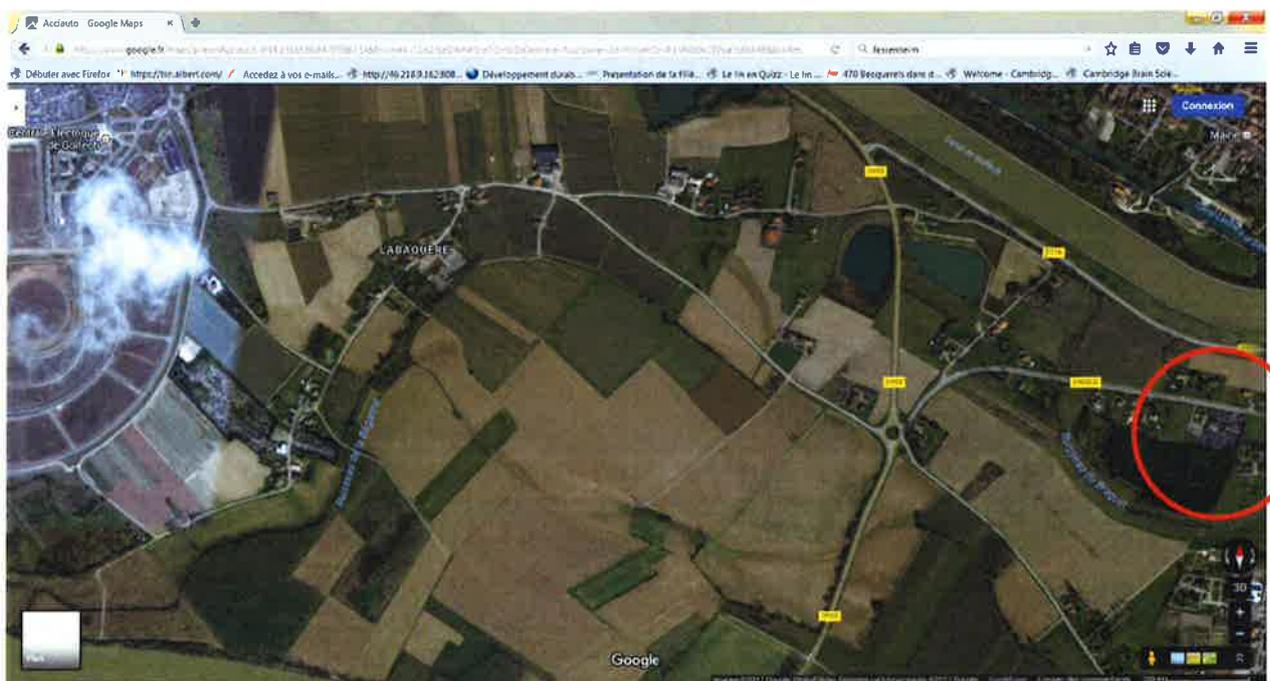
## Papeterie



## Production de lin



Parc automobile



## ANNEXE 2 VALEURS DE DEPOTS PRISES EN COMPTE POUR CHACUN DES SCENARIOS CODIRPA CONSIDERES

Dépôt de plutonium en fonction de la distance (Bq.cm<sup>-2</sup>)

	0.5 km	1 km	2 km	5 km	10 km
<sup>238</sup> Pu	1.1E+01	3.2E+00	8.7E-01	1.4E-01	3.1E-02
<sup>239</sup> Pu	7.8E-01	2.2E-01	6.1E-02	1.0E-03	2.2E-04
<sup>240</sup> Pu	1.4E+00	4.0E-01	1.1E-01	1.7E-02	3.8E-04
<sup>241</sup> Pu	2.0E+02	5.7E+01	1.5E+01	2.5E+00	5.6E-01
<sup>241</sup> Am	4.0E+00	1.2E+00	3.2E-01	5.1E-02	1.1E-03

Dépôt de radionucléides en fonction de la distance (Bq.cm<sup>-2</sup>) pour le scénario APRP

	1 km	2 km	5 km	10 km
<sup>137</sup> Cs+	1.1E+01	3.0E+00	5.1E-01	1.2E-01
<sup>134</sup> Cs	1.3E+01	3.6E+00	6.1E-01	1.5E-01
<sup>136</sup> Cs	6.5E+00	1.8E+00	3.1E-01	7.5E-02
<sup>131</sup> I	2.0E+02	5.5E+01	9.4E+00	2.3E+00
<sup>132</sup> I	1.6E+02	4.6E+01	7.7E+00	1.9E+00
<sup>133</sup> I	2.1E+02	5.8E+01	9.9E+00	2.3E+00
<sup>129m</sup> Te	7.8E+00	2.2E+00	3.8E-01	9.1E-02
<sup>131</sup> Te	1.7E+02	4.7E+01	7.9E+00	1.9E+00
<sup>131m</sup> Te	1.3E+01	3.5E+00	6.0E-01	1.4E-01
<sup>132</sup> Te	1.5E+02	4.1E+01	7.0E+00	1.7E+00
<sup>125</sup> Sb	6.0E-01	1.7E-01	2.9E-02	6.9E-03
<sup>127</sup> Sb	8.7E+00	2.5E+00	4.2E-01	1.0E-01
<sup>129</sup> Sb	9.1E+00	2.6E+00	4.3E-01	9.4E-02

Dépôt de radionucléides en fonction de la distance (Bq.cm<sup>-2</sup>) pour le scénario Accident Grave

	1 km	2 km	5 km	6 km
<sup>137</sup> Cs+	2.4E+01	7.7E+00	1.6E+00	1.2E+00
<sup>134</sup> Cs	3.2E+01	1.0E+01	2.1E+00	1.5E+00
<sup>136</sup> Cs	5.1E+00	1.6E+00	3.4E-01	2.4E-01
<sup>131</sup> I	7.5E+02	2.6E+02	6.4E+01	4.9E+01
<sup>132</sup> I	3.4E+00	1.1E+00	2.2E-01	1.6E-01
<sup>133</sup> I	4.7E+00	1.6E-04	4.0E-05	3.1E-05
<sup>129m</sup> Te	9.9E+00	3.1E+00	6.5E-01	4.7E-01
<sup>131</sup> Te	5.6E-05	1.8E-05	3.7E-06	2.7E-06
<sup>131m</sup> Te	2.5E-04	7.9E-05	1.7E-05	1.2E-05
<sup>132</sup> Te	3.3E+00	1.0E+00	2.2E-01	1.6E-01
<sup>140</sup> Ba+	2.8E+02	8.3E+01	1.9E+01	1.4E+01
<sup>103</sup> Ru+	1.6E+02	4.8E+01	1.1E+01	7.9E+00
<sup>106</sup> Ru+	7.7E+01	2.3E+01	5.1E+00	3.8E+00
<sup>95</sup> Nb	4.2E+01	1.3E+01	2.8E+00	2.0E+00
<sup>99</sup> Mo	2.1E+00	6.6E-01	1.4E-01	9.9E-02
<sup>90</sup> Sr	1.8E+01	5.3E+00	1.2E+00	8.7E-01
<sup>91</sup> Sr	7.3E+00	2.2E+00	4.8E-01	3.6E-01
<sup>144</sup> Ce+	2.0E+01	6.1E+00	1.4E+00	1.0E+00
<sup>239</sup> Np	8.5E-01	2.6E-01	5.7E-02	4.2E-02
<sup>238</sup> Pu	1.5E-02	4.4E-03	9.9E-04	7.3E-04
<sup>239</sup> Pu	1.5E-03	4.6E-04	1.0E-04	7.5E-05
<sup>240</sup> Pu	2.3E-03	6.9E-04	1.5E-04	1.1E-04
<sup>241</sup> Am	5.8E-05	1.7E-05	3.8E-06	2.8E-06

# ANNEXE 3

# RESULTATS DES CALCULS UNITAIRES POUR LES DIFFERENTES FILIERES ET CAS D'ETUDES PRIS EN COMPTE

Dose efficace (mSv/an) pour un dépôt de 1 Bq.cm <sup>2</sup> pour les scénarios de la filière des matériaux de construction														
Chef de carrière / Mineur	Chargement	Gestion des stocks	Transport	Techniciens usines de briques	Gestion des stocks / Cariste	Transport de briques	Transport de ciment	Gestion des stocks de ciment	Chantier de construction Briques	Chantier de construction béton	Habitation en Briques	Habitation en béton	Piste cyclable	Bac à sable
<sup>137</sup> Cs+	8.19E-03	9.11E-03	6.81E-05	3.67E-04	1.74E-04	9.41E-05	9.14E-05	1.35E-03	5.27E-04	1.28E-04	3.83E-03	5.93E-03	2.34E-04	7.82E-05
<sup>134</sup> Cs	2.02E-02	2.26E-02	1.64E-04	8.65E-04	4.10E-04	2.30E-04	2.20E-04	3.47E-03	1.24E-03	3.03E-04	8.98E-03	1.41E-02	5.58E-04	2.33E-04
<sup>136</sup> Cs	1.59E-03	1.78E-03	1.41E-05	7.17E-05	3.42E-05	2.07E-05	1.90E-05	2.68E-04	1.03E-04	2.55E-05	7.35E-04	1.18E-03	3.42E-05	1.54E-05
<sup>131</sup> I	2.38E-04	2.62E-04	1.27E-06	7.97E-06	3.74E-06	1.47E-06	1.71E-06	3.44E-05	1.15E-05	2.65E-06	8.81E-05	1.24E-04	3.75E-06	1.85E-06
<sup>132</sup> I	1.26E-05	1.41E-05	1.08E-07	5.52E-07	2.63E-07	1.56E-07	1.45E-07	2.20E-06	7.91E-07	1.96E-07	5.68E-06	8.47E-06	2.63E-07	1.18E-07
<sup>133</sup> I	3.26E-05	3.63E-05	2.35E-07	1.31E-06	6.18E-07	3.12E-07	3.15E-07	5.26E-06	1.88E-06	4.50E-07	1.50E-05	2.10E-05	6.60E-07	2.81E-07
<sup>129m</sup> Te	9.10E-05	9.61E-05	5.16E-07	2.79E-06	1.32E-06	7.23E-07	6.92E-07	1.03E-05	4.01E-06	9.72E-07	3.23E-05	4.51E-05	1.41E-06	7.06E-07
<sup>133a</sup> Te	1.26E-05	1.38E-05	7.25E-08	1.83E-08	8.64E-09	3.89E-09	9.74E-08	1.69E-06	2.64E-08	6.20E-09	2.10E-07	2.90E-07	9.16E-09	3.82E-09
<sup>133m</sup> Te	1.01E-04	1.13E-04	8.49E-07	4.36E-06	2.07E-06	1.24E-06	1.14E-06	1.72E-05	6.25E-06	1.55E-06	5.08E-05	7.16E-05	2.21E-06	9.37E-07
<sup>769</sup> Te	6.06E-05	6.43E-05	2.10E-07	1.71E-06	7.98E-07	1.63E-07	2.82E-07	5.29E-06	2.50E-06	9.72E-07	2.01E-05	2.55E-05	7.92E-07	3.55E-07
<sup>170</sup> Eu	2.40E-02	2.70E-02	2.18E-04	1.08E-03	5.16E-04	3.22E-04	2.92E-04	4.29E-03	1.01E-04	3.88E-04	1.10E-02	1.79E-02	5.18E-04	2.34E-04
<sup>67</sup> Sb	7.91E-05	8.84E-05	5.64E-07	3.13E-06	1.48E-06	7.55E-07	7.58E-07	1.33E-05	1.88E-07	1.08E-06	3.31E-05	5.03E-05	1.49E-06	6.66E-07
<sup>392</sup> Sb	5.64E-03	6.35E-03	5.52E-05	2.62E-04	1.26E-04	8.45E-05	7.42E-05	1.04E-03	1.59E-05	9.57E-05	2.63E-03	4.40E-03	1.26E-04	5.72E-05
<sup>125</sup> Sb	6.57E-03	7.23E-03	4.22E-05	2.45E-04	1.16E-04	5.39E-05	5.66E-05	9.65E-04	1.83E-07	8.34E-05	2.64E-03	3.90E-03	1.16E-04	5.16E-05
<sup>127</sup> Sb	1.59E-04	1.77E-04	1.15E-06	6.40E-06	3.02E-06	1.54E-06	1.54E-06	2.57E-05	9.22E-06	2.21E-06	7.37E-05	1.03E-04	3.23E-06	1.36E-06
<sup>58</sup> Co	1.42E-05	1.60E-05	1.30E-07	6.43E-07	3.07E-07	1.93E-07	1.75E-07	2.54E-06	9.20E-07	2.31E-07	6.54E-06	1.07E-05	3.08E-07	1.39E-07
<sup>270</sup> Co	3.93E-03	4.40E-03	3.33E-05	1.73E-04	8.21E-05	4.77E-05	4.48E-05	6.77E-04	2.48E-04	6.10E-05	1.78E-03	2.83E-03	8.23E-05	3.70E-05
<sup>29</sup> Co	2.94E-02	3.33E-02	3.23E-04	1.46E-03	7.04E-04	5.12E-04	4.34E-04	5.66E-03	2.08E-03	5.43E-04	1.44E-02	2.49E-02	7.03E-04	3.22E-04
<sup>140</sup> Ba+	1.63E-03	1.83E-03	1.61E-05	7.54E-05	3.62E-05	2.50E-05	2.17E-05	2.96E-04	1.08E-04	2.77E-05	7.53E-04	1.27E-03	3.62E-05	1.65E-05
<sup>103</sup> Ru+	1.30E-03	1.44E-03	8.62E-06	5.00E-05	2.35E-05	1.10E-05	1.16E-05	2.03E-04	7.21E-05	1.70E-05	5.36E-04	7.93E-04	2.37E-05	1.05E-05
<sup>106</sup> Ru+	2.45E-03	2.67E-03	1.81E-05	9.88E-05	4.67E-05	2.46E-05	2.43E-05	3.86E-04	1.42E-04	3.42E-05	1.04E-03	1.59E-03	4.69E-05	2.22E-05
<sup>94</sup> Nb	2.35E-02	2.63E-02	2.00E-04	1.02E-03	4.87E-04	2.89E-04	2.68E-04	4.13E-03	1.47E-03	3.63E-04	1.05E-02	1.68E-02	4.89E-04	2.20E-04
<sup>95</sup> Nb	1.62E-03	1.82E-03	1.34E-05	6.91E-05	3.28E-05	1.92E-05	1.79E-05	2.85E-04	9.91E-05	2.44E-05	7.12E-04	1.13E-03	3.30E-05	1.48E-05
<sup>99</sup> Mo	2.85E-05	3.16E-05	1.97E-07	1.08E-06	5.14E-07	2.69E-07	2.64E-07	4.54E-06	1.56E-06	3.76E-07	1.14E-05	1.75E-05	5.15E-07	2.31E-07
<sup>90</sup> Sr	1.77E-04	8.87E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.58E-06
<sup>91</sup> Sr	1.53E-05	1.72E-05	1.39E-07	6.92E-07	3.30E-07	2.06E-07	1.87E-07	2.74E-06	9.90E-07	2.48E-07	7.03E-06	1.15E-05	3.31E-07	1.49E-07
<sup>144</sup> Ce+	7.19E-04	7.09E-04	3.21E-06	1.84E-05	8.83E-06	4.70E-06	4.31E-06	6.82E-05	2.66E-05	6.44E-06	1.97E-04	2.99E-04	8.70E-06	4.82E-06
<sup>239</sup> Np	3.76E-05	3.96E-05	8.13E-08	8.67E-07	4.07E-07	6.36E-08	1.11E-07	2.85E-06	1.28E-06	2.66E-07	1.06E-05	1.28E-05	3.99E-07	1.73E-07
<sup>239</sup> Pu	2.20E-01	2.20E-01	2.59E-15	1.17E-08	6.69E-09	4.42E-24	3.48E-15	3.37E-08	2.04E-08	3.36E-09	1.63E-07	1.59E-07	5.36E-09	1.42E-05
<sup>47E+01</sup>	4.98E+01	1.20E-01	1.05E-09	2.95E-08	1.43E-08	8.22E-11	1.40E-09	6.82E-08	4.51E-08	8.13E-09	3.87E-07	4.17E-07	1.34E-08	1.50E-05
<sup>240</sup> Pu	2.40E-01	1.20E-01	1.34E-15	1.18E-08	6.69E-09	7.70E-26	1.80E-15	2.59E-08	2.04E-08	3.37E-09	1.64E-07	1.60E-07	5.37E-09	1.50E-05
<sup>241</sup> Pu	4.22E-03	2.11E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.99E-07
<sup>242</sup> Am	2.02E-01	1.01E-01	4.30E-11	5.64E-06	2.78E-06	2.89E-16	5.78E-11	1.40E-05	8.37E-06	1.55E-06	7.84E-05	7.59E-05	2.44E-06	1.17E-04

Dose efficace (mSv/an) pour un dépôt de 1 Bq.cm <sup>-2</sup> pour les scénarios de la filière textile (Lin) – Stade de la floraison										
Travail au champ	Transport après récolte	Entreposage (exploitation agric.)	Transport vers usine	Stockage	Gestion du stock / Cariste	Teillage	Chemise en tissu contaminé	Draps en tissu contaminé	Isolation d'une habitation avec des étoupes	
<sup>137</sup> Cs+	3.65E-04	5.29E-04	7.51E-05	1.86E-03	2.74E-03	1.91E-03	5.13E-05	5.10E-04	4.91E-04	
<sup>134</sup> Cs	9.05E-04	1.39E-03	1.93E-04	4.06E-03	5.95E-03	4.16E-03	9.32E-05	9.96E-04	9.74E-04	
<sup>136</sup> Cs	4.62E-05	3.02E-04	2.11E-06	3.19E-06	4.64E-06	3.25E-06	6.49E-10	7.03E-09	6.97E-09	
<sup>131</sup> I	9.06E-07	1.72E-06	1.12E-09	1.41E-09	2.10E-09	1.39E-09	1.73E-14	1.62E-13	1.64E-13	
<sup>132</sup> I	8.43E-194	3.94E-08	9.18E-290	4.25E-290	6.19E-290	4.45E-290	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
<sup>133</sup> I	8.68E-26	9.44E-08	5.66E-38	2.84E-38	4.19E-38	2.89E-38	4.72E-71	4.31E-70	4.12E-70	
<sup>129m</sup> Te	5.44E-06	2.02E-05	9.07E-07	3.52E-06	5.31E-06	3.64E-06	1.52E-08	2.04E-07	1.99E-07	
<sup>133</sup> Te	1.12E-48	6.70E-07	7.55E-71	3.93E-71	5.85E-71	3.87E-71	1.04E-137	1.06E-136	1.13E-136	
<sup>131m</sup> Te	8.13E-19	6.08E-06	1.46E-26	7.06E-27	1.03E-26	7.19E-27	3.57E-50	3.89E-49	3.85E-49	
<sup>132</sup> Te	1.93E-10	3.15E-06	7.06E-14	7.81E-14	1.20E-13	7.34E-14	1.05E-23	1.05E-22	1.19E-22	
<sup>110m</sup> Ag	1.49E-03	3.16E-03	4.24E-04	6.34E-03	9.20E-03	6.50E-03	1.17E-04	1.28E-03	1.25E-03	
<sup>122</sup> Sb	2.33E-11	1.10E-07	9.20E-17	5.47E-17	8.08E-17	5.62E-17	1.70E-28	1.45E-27	1.34E-27	
<sup>124</sup> Sb	4.73E-04	3.54E-05	3.17E-06	1.76E-05	2.54E-05	1.81E-05	1.54E-07	1.60E-06	1.54E-06	
<sup>125</sup> Sb	2.22E-04	1.46E-05	1.83E-06	4.49E-05	6.69E-05	4.52E-05	1.10E-06	1.18E-05	1.19E-05	
<sup>127</sup> Sb	4.42E-09	2.61E-07	1.60E-13	1.12E-13	1.65E-13	1.13E-13	2.51E-22	2.73E-21	2.73E-21	
<sup>128</sup> Sb	1.32E-105	2.21E-08	8.22E-158	3.70E-158	5.37E-158	3.79E-158	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
<sup>58</sup> Co	2.93E-04	9.36E-05	8.63E-06	5.89E-05	8.61E-05	6.04E-05	5.90E-07	6.45E-06	6.30E-06	
<sup>60</sup> Co	1.34E-03	3.55E-04	5.74E-05	1.17E-03	1.68E-03	1.21E-03	2.58E-05	2.83E-04	2.73E-04	
<sup>140</sup> Ba+	4.25E-05	4.59E-06	3.13E-08	4.31E-08	6.19E-08	4.40E-08	8.29E-12	8.23E-11	7.86E-11	
<sup>103</sup> Ru+	8.72E-05	5.22E-05	2.81E-06	1.25E-05	1.85E-05	1.25E-05	6.36E-08	6.85E-07	6.85E-07	
<sup>106</sup> Ru+	1.08E-04	4.21E-05	5.43E-06	1.01E-04	1.49E-04	1.07E-04	4.39E-06	2.75E-05	2.24E-05	
<sup>94</sup> Nb	8.66E-04	3.00E-05	4.46E-06	1.07E-04	1.56E-04	1.10E-04	2.56E-06	2.82E-05	2.76E-05	
<sup>95</sup> Nb	1.20E-04	6.39E-06	3.41E-07	1.22E-06	1.78E-06	1.25E-06	4.95E-09	5.47E-08	5.34E-08	
<sup>99</sup> Mo	2.51E-11	1.26E-05	1.53E-14	9.50E-15	1.40E-14	9.86E-15	6.04E-26	4.10E-25	3.51E-25	
<sup>90</sup> Sr	2.59E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.02E-05	3.59E-05	7.76E-05	0.00E+00	
<sup>91</sup> Sr	8.82E-51	1.04E-06	4.56E-74	2.05E-74	2.97E-74	2.13E-74	2.22E-144	2.02E-143	1.86E-143	
<sup>144</sup> Ce+	7.57E-06	2.54E-06	2.27E-07	5.46E-06	8.16E-06	6.24E-06	5.77E-07	2.10E-06	1.28E-06	
<sup>238</sup> Np	7.65E-13	5.06E-08	5.24E-19	8.62E-19	1.33E-18	7.97E-19	7.13E-32	6.54E-31	7.99E-31	
<sup>238</sup> Pu	2.29E-08	4.92E-12	8.03E-26	1.75E-11	3.45E-11	5.33E-07	7.40E-13	1.39E-10	1.61E-11	
<sup>239</sup> Pu	3.47E-08	5.65E-12	3.20E-14	2.02E-11	3.38E-11	5.83E-07	6.18E-13	5.61E-11	9.67E-12	
<sup>240</sup> Pu	2.25E-08	4.94E-12	1.62E-26	1.77E-11	3.46E-11	5.83E-07	7.46E-13	1.34E-10	1.60E-11	
<sup>244</sup> Pu	7.31E-10	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.01E-08	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
<sup>244</sup> Am	6.58E-06	3.26E-09	2.09E-18	1.16E-08	1.98E-08	8.89E-07	3.98E-10	4.07E-09	5.69E-09	

**Dose efficace (mSv/an) pour un dépôt de 1 Bq.cm<sup>-2</sup> pour les scénarios de la filière textile (Lin) – Stade du rouissage**

	Travail au champ	Transport après récolte	Entreposage (exploitation agric.)	Transport vers usine	Stockage	Gestion du stock / Cariste	Teillage	Paillis	Isolation d'une habitation avec des anas
<sup>137</sup> Cs+	1.03E-03	5.90E-03	8.07E-02	1.15E-02	2.85E-01	4.19E-01	2.92E-01	3.11E-05	7.53E-02
<sup>134</sup> Cs	2.95E-03	1.64E-02	2.15E-01	3.11E-02	6.54E-01	9.58E-01	6.69E-01	7.03E-05	1.61E-01
<sup>136</sup> Cs	3.21E-03	1.93E-02	1.84E-01	7.68E-03	1.16E-02	1.69E-02	1.19E-02	1.22E-06	1.24E-04
<sup>131</sup> I	7.00E-04	2.71E-03	3.07E-02	3.93E-04	4.94E-04	7.39E-04	4.89E-04	5.34E-08	7.64E-07
<sup>132</sup> I	8.17E-05	4.77E-04	4.34E-03	5.41E-98	2.50E-98	3.65E-98	2.62E-98	2.65E-102	2.17E-287
<sup>133</sup> I	2.11E-04	1.06E-03	1.04E-02	7.81E-14	3.92E-14	5.78E-14	3.99E-14	4.22E-18	1.49E-35
<sup>129m</sup> Te	7.70E-05	3.12E-04	3.52E-03	3.24E-04	1.26E-03	1.90E-03	1.30E-03	1.90E-07	1.32E-04
<sup>131</sup> Te	8.20E-05	3.78E-04	3.84E-03	1.61E-25	8.38E-26	1.25E-25	8.24E-26	8.76E-30	1.09E-69
<sup>130m</sup> Te	6.46E-04	3.68E-03	3.41E-02	4.27E-10	2.06E-10	3.00E-10	2.10E-10	2.18E-14	1.88E-25
<sup>132</sup> Te	3.05E-04	8.01E-04	1.31E-02	2.55E-06	2.83E-06	4.34E-06	2.66E-06	3.32E-10	2.56E-12
<sup>110m</sup> Ag	4.71E-03	2.89E-02	3.47E-01	5.19E-02	7.75E-01	1.13E+00	7.95E-01	8.15E-05	1.66E-01
<sup>122</sup> Sb	4.29E-04	2.13E-03	2.07E-02	1.87E-06	1.11E-06	1.64E-06	1.14E-06	1.21E-10	6.03E-14
<sup>124</sup> Sb	2.88E-03	1.89E-02	1.94E-01	2.62E-02	1.46E-01	2.10E-01	1.49E-01	1.49E-05	1.80E-02
<sup>125</sup> Sb	9.21E-04	4.17E-03	6.14E-02	7.89E-03	1.94E-01	2.89E-01	1.95E-01	2.21E-05	5.25E-02
<sup>127</sup> Sb	7.40E-04	3.73E-03	3.68E-02	3.26E-05	2.28E-05	3.36E-05	2.30E-05	2.47E-09	1.23E-10
<sup>129</sup> Sb	9.24E-05	5.71E-04	5.06E-03	7.51E-54	3.38E-54	4.90E-54	3.46E-54	3.54E-58	3.86E-155
<sup>58</sup> Co	1.74E-03	1.01E-02	1.11E-01	1.46E-02	9.98E-02	1.46E-01	1.02E-01	1.07E-05	1.43E-02
<sup>60</sup> Co	3.90E-03	2.85E-02	3.37E-01	5.52E-02	1.13E+00	1.61E+00	1.17E+00	1.14E-04	2.66E-01
<sup>140</sup> Ba+	3.35E-03	2.22E-02	1.98E-01	8.48E-03	1.17E-02	1.68E-02	1.19E-02	1.18E-06	1.09E-04
<sup>103</sup> Ru+	9.82E-04	4.59E-03	5.23E-02	5.23E-03	2.33E-02	3.45E-02	2.34E-02	2.54E-06	2.17E-03
<sup>106</sup> Ru+	4.07E-04	2.14E-03	2.84E-02	3.94E-03	7.31E-02	1.08E-01	7.75E-02	7.88E-06	1.72E-02
<sup>94</sup> Nb	2.92E-03	1.70E-02	2.22E-01	3.30E-02	7.92E-01	1.16E+00	8.14E-01	8.48E-05	2.04E-01
<sup>95</sup> Nb	1.36E-03	7.66E-03	7.78E-02	8.24E-03	2.95E-02	4.32E-02	3.03E-02	3.17E-06	2.33E-03
<sup>99</sup> Mo	1.53E-04	7.27E-04	7.34E-03	7.32E-07	4.55E-07	6.71E-07	4.72E-07	4.86E-11	3.23E-14
<sup>90</sup> Sr	6.19E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.69E-03	0.00E+00	0.00E+00
<sup>91</sup> Sr	9.93E-05	6.12E-04	5.41E-03	1.83E-26	8.22E-27	1.19E-26	8.54E-27	8.67E-31	4.88E-73
<sup>144</sup> Ce+	1.19E-04	3.92E-04	7.12E-03	6.97E-04	1.68E-02	2.51E-02	1.92E-02	1.77E-06	4.22E-03
<sup>239</sup> Np	2.14E-04	3.31E-04	8.68E-03	8.75E-08	1.44E-07	2.22E-07	1.33E-07	1.44E-11	9.11E-16
<sup>238</sup> Pu	7.62E-03	3.68E-07	1.16E-05	1.89E-19	4.13E-05	8.13E-05	1.26E+00	5.30E-08	3.80E-05
<sup>239</sup> Pu	8.28E-03	1.98E-07	1.33E-05	7.52E-08	4.75E-05	7.97E-05	1.37E+00	5.72E-09	2.28E-05
<sup>240</sup> Pu	8.28E-03	3.49E-07	1.16E-05	3.80E-20	4.16E-05	8.15E-05	1.37E+00	5.10E-08	3.77E-05
<sup>241</sup> Pu	1.49E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.40E-02	0.00E+00	0.00E+00
<sup>244</sup> Am	7.04E-03	1.36E-05	4.27E-03	2.74E-12	1.52E-02	2.59E-02	1.17E+00	2.12E-06	7.47E-03

Dose efficace (mSv/an) pour une contamination de 1 Bq.kg <sup>-1</sup> dans le bois, pour les scénarios de la filière bois					
Stade du court terme					
	Bûcheronnage court terme	Transport de grumes sous écorces	Gestion de parc à grumes	Gestion du stockage des cendres	Gestion des écorces en scierie
<sup>137</sup> Cs+	8.53E-02	7.35E-04	1.35E-03	7.72E-02	2.60E-03
<sup>134</sup> Cs	1.99E-01	1.87E-03	3.39E-03	2.05E-01	6.13E-03
<sup>136</sup> Cs	1.54E-02	1.46E-04	2.65E-04	1.60E-02	5.18E-04
<sup>131</sup> I	1.80E-03	1.99E-05	3.66E-05	1.94E-03	6.15E-05
<sup>132</sup> I	9.84E-03	1.17E-06	2.12E-06	1.31E-04	3.93E-06
<sup>133</sup> I	2.65E-03	2.89E-06	5.26E-06	3.06E-04	9.48E-06
<sup>129m</sup> Te	6.84E-04	1.39E-05	3.75E-05	5.80E-04	1.95E-05
<sup>131</sup> Te	1.74E-04	1.09E-06	2.01E-06	1.01E-04	3.58E-06
<sup>131m</sup> Te	6.67E-04	9.86E-06	1.81E-05	1.33E-03	3.16E-05
<sup>132</sup> Te	4.68E-04	5.55E-06	1.22E-05	3.11E-04	1.55E-05
<sup>110m</sup> Ag	2.49E-01	2.33E-03	4.20E-03	2.64E-01	7.69E-03
<sup>122</sup> Sb	5.73E-04	7.19E-06	1.31E-05	7.67E-04	2.25E-05
<sup>124</sup> Sb	8.47E-02	5.59E-04	9.99E-04	6.45E-02	1.89E-03
<sup>125</sup> Sb	3.91E-02	6.10E-04	1.21E-03	5.54E-02	1.81E-03
<sup>127</sup> Sb	9.20E-04	1.48E-05	2.71E-05	1.55E-03	4.64E-05
<sup>123</sup> Sb	1.63E-03	1.38E-06	2.49E-06	1.58E-04	4.58E-06
<sup>58</sup> Co	3.80E-02	3.75E-04	6.94E-04	4.04E-02	1.22E-03
<sup>60</sup> Co	3.22E-01	3.07E-03	5.45E-03	3.67E-01	1.04E-02
<sup>140</sup> Ba+	4.29E-03	1.69E-04	3.13E-04	1.87E-02	5.50E-04
<sup>103</sup> Ru+	1.08E-02	1.22E-04	2.34E-04	1.18E-02	3.64E-04
<sup>106</sup> Ru+	2.22E-02	2.07E-04	3.77E-04	2.21E-02	7.10E-04
<sup>94</sup> Nb	1.57E-01	2.19E-03	3.97E-03	2.46E-01	7.20E-03
<sup>95</sup> Nb	9.20E-03	1.53E-04	2.78E-04	1.72E-02	4.86E-04
<sup>99</sup> Mo	1.44E-04	3.81E-06	8.79E-06	2.60E-04	8.07E-06
<sup>90</sup> Sr	3.66E-04	7.07E-10	2.21E-09	2.34E-08	1.20E-10
<sup>91</sup> Sr	6.69E-03	1.52E-06	2.74E-06	1.73E-04	4.88E-06
<sup>144</sup> Ce+	2.79E-03	5.40E-05	1.10E-04	4.10E-03	1.68E-04
<sup>239</sup> Np	1.41E-04	4.49E-06	1.05E-05	1.85E-04	1.01E-05
<sup>238</sup> Pu	4.00E-01	1.03E-06	3.27E-06	4.10E-05	7.24E-08
<sup>239</sup> Pu	4.37E-01	5.42E-07	1.61E-06	4.64E-05	3.64E-07
<sup>240</sup> Pu	4.37E-01	9.79E-07	3.11E-06	3.92E-05	1.06E-07
<sup>241</sup> Pu	7.66E-03	7.40E-09	1.97E-08	1.51E-07	1.13E-08
<sup>241</sup> Am	1.60E-01	3.24E-05	9.38E-05	1.25E-03	1.03E-04

Dose efficace (mSv/an) pour une contamination de 1 Bq.kg<sup>-3</sup> dans le bois, pour les scénarios de la filière bois – Stade du moyen / long terme

	Bûcheronnage M/LT	Transport de grumes	Gestion de parc à grumes	Stockage de liqueur noire	Gestion du stockage des cendres (*)	Gestion des bobines de papier journal	Gestion des bobines de papier blanchi	Lecture d'un journal	Gestion des écorces (*)	Sciage	Menuiserie	Chantier fuste	Habitation fuste	Contrôle emballage bois
<sup>137</sup> Cs+	5.22E-05	2.25E-05	1.10E-04	1.77E-04	7.72E-04	1.08E-05	1.84E-07	2.95E-07	8.19E-04	2.51E-05	1.09E-05	1.70E-04	4.29E-04	3.84E-07
<sup>134</sup> Cs	1.32E-04	5.77E-05	2.84E-04	4.29E-04	2.05E-03	2.77E-05	4.72E-07	6.86E-07	1.65E-03	5.47E-05	7.64E-05	4.17E-04	9.23E-04	8.61E-07
<sup>136</sup> Cs	1.02E-05	4.49E-06	2.22E-05	3.77E-05	1.60E-04	2.17E-06	3.69E-08	5.65E-08	1.20E-08	4.43E-06	1.67E-07	6.78E-06	0.00E+00	6.50E-08
<sup>131</sup> I	1.47E-06	6.22E-07	3.04E-06	2.95E-06	1.94E-05	2.97E-07	5.05E-09	6.64E-08	3.57E-12	5.78E-07	3.61E-07	3.60E-07	0.00E+00	1.06E-08
<sup>132</sup> I	8.23E-08	3.62E-08	1.79E-07	2.86E-07	1.31E-06	1.75E-08	2.97E-10	4.33E-10	0.00E+00	3.33E-08	5.85E-09	1.56E-10	0.00E+00	5.84E-10
<sup>133</sup> I	2.08E-07	9.00E-08	4.41E-07	5.93E-07	3.06E-06	4.31E-08	7.33E-10	1.05E-09	9.08E-09	8.35E-08	2.33E-08	2.59E-17	0.00E+00	1.82E-09
<sup>129m</sup> Te	8.98E-07	2.21E-07	8.83E-07	1.35E-06	5.80E-06	1.05E-07	1.78E-09	3.34E-09	1.51E-07	4.21E-07	5.11E-07	1.06E-06	1.14E-07	2.25E-08
<sup>131</sup> Te	3.34E-09	3.40E-08	1.67E-07	1.81E-07	1.01E-06	1.64E-08	2.78E-10	3.70E-10	1.31E-136	3.22E-08	3.85E-10	1.03E-30	0.00E+00	9.74E-10
<sup>132</sup> Te	6.87E-07	3.02E-07	1.49E-06	2.27E-06	1.33E-05	1.46E-07	2.48E-09	3.46E-09	4.51E-49	2.70E-07	4.76E-08	1.54E-16	0.00E+00	4.64E-09
<sup>110m</sup> Ag	3.83E-07	1.52E-07	7.18E-07	3.95E-07	3.11E-06	7.30E-08	1.24E-09	1.79E-09	1.16E-22	1.65E-07	4.69E-08	4.12E-12	0.00E+00	3.39E-09
<sup>125</sup> Ag	1.62E-04	7.19E-05	3.56E-04	5.85E-04	2.64E-03	3.48E-05	5.92E-07	8.41E-07	1.49E-03	6.55E-05	1.18E-05	4.84E-04	8.05E-04	1.02E-06
<sup>122</sup> Sb	5.13E-07	2.22E-07	1.09E-06	1.44E-06	7.67E-06	1.06E-07	1.81E-09	2.52E-09	6.12E-26	2.00E-07	6.27E-08	1.08E-11	0.00E+00	5.67E-09
<sup>124</sup> Sb	3.85E-05	1.73E-05	8.62E-05	1.51E-04	6.45E-04	8.42E-06	1.43E-07	2.00E-07	7.57E-05	1.58E-05	3.16E-06	8.87E-05	3.94E-05	2.72E-07
<sup>125</sup> Sb	4.15E-05	1.76E-05	8.44E-05	1.04E-04	5.54E-04	8.40E-06	1.43E-07	2.13E-07	5.09E-04	1.75E-05	4.54E-06	1.33E-04	3.08E-04	3.28E-07
<sup>127</sup> Sb	1.06E-06	4.58E-07	2.24E-06	2.92E-06	1.55E-05	2.19E-07	3.73E-09	5.17E-09	1.24E-19	4.14E-07	9.32E-08	7.92E-11	0.00E+00	8.29E-09
<sup>128</sup> Sb	9.59E-08	4.27E-08	2.12E-07	3.50E-07	1.58E-06	2.07E-08	3.52E-10	4.99E-10	1.36E-307	3.82E-08	7.07E-09	7.14E-60	0.00E+00	7.06E-10
<sup>58</sup> Co	2.58E-05	1.13E-05	5.53E-05	8.81E-05	4.04E-04	5.42E-06	9.22E-08	1.36E-07	6.66E-05	1.05E-05	1.80E-06	6.23E-05	3.64E-05	1.72E-07
<sup>60</sup> Co	2.08E-04	1.10E-04	4.74E-04	8.97E-04	3.67E-03	4.63E-05	7.88E-07	1.10E-06	3.10E-03	8.51E-05	1.65E-05	6.66E-04	1.56E-03	1.30E-06
<sup>146</sup> Ba+	1.12E-05	5.04E-06	2.51E-05	4.42E-05	1.87E-04	2.46E-06	4.19E-08	5.75E-08	9.77E-09	4.52E-06	8.50E-07	3.25E-08	0.00E+00	7.70E-08
<sup>103</sup> Ru+	8.37E-06	3.58E-06	1.73E-05	2.13E-05	1.18E-04	1.71E-06	2.90E-08	4.09E-08	4.83E-06	3.33E-06	6.18E-07	1.60E-05	2.91E-06	5.84E-08
<sup>106</sup> Ru+	1.49E-05	6.44E-06	3.16E-05	4.63E-05	2.21E-04	3.09E-06	5.26E-08	7.89E-08	1.61E-04	1.14E-05	8.32E-06	5.07E-05	8.80E-05	1.35E-07
<sup>94</sup> Nb	1.53E-04	6.74E-05	3.32E-04	5.31E-04	2.46E-03	3.25E-05	5.52E-07	8.06E-07	2.29E-03	6.40E-05	1.29E-05	4.98E-04	1.26E-03	1.00E-06
<sup>95</sup> Nb	1.07E-05	4.72E-06	2.32E-05	3.54E-05	1.72E-04	2.27E-06	3.86E-08	5.45E-08	4.42E-06	4.20E-06	7.76E-07	1.92E-05	2.52E-06	6.72E-08
<sup>99</sup> Mo	1.78E-07	7.72E-08	3.79E-07	5.07E-07	2.60E-06	3.72E-08	6.32E-10	8.83E-10	5.08E-26	7.31E-08	3.09E-08	8.32E-12	0.00E+00	2.75E-09
<sup>90</sup> Sr	1.48E-10	5.03E-11	7.82E-12	1.17E-11	2.34E-10	2.01E-11	3.41E-13	1.91E-11	3.77E-11	9.46E-06	2.46E-05	6.28E-06	1.17E-09	4.63E-07
<sup>91</sup> Sr	1.05E-07	4.68E-08	2.31E-07	3.75E-07	1.73E-06	2.26E-08	3.85E-10	5.38E-10	2.00E-143	4.38E-08	1.38E-08	7.14E-32	0.00E+00	1.09E-09
<sup>144</sup> Ce+	3.90E-06	1.61E-06	7.92E-06	8.62E-06	4.10E-05	7.88E-07	1.34E-08	1.73E-08	3.44E-05	7.70E-06	7.60E-06	5.94E-13	2.14E-05	3.55E-08
<sup>237</sup> Np	2.76E-07	1.08E-07	5.04E-07	1.61E-07	1.85E-06	5.16E-08	8.78E-10	9.18E-10	3.14E-29	1.02E-07	1.97E-08	5.94E-13	0.00E+00	3.16E-09
<sup>238</sup> Pu	3.09E-07	6.79E-09	1.10E-08	2.74E-10	4.10E-07	4.14E-08	7.03E-10	4.02E-08	2.29E-08	1.17E-02	1.18E-02	2.35E-03	2.45E-06	2.27E-08
<sup>239</sup> Pu	3.12E-07	6.94E-09	2.54E-08	6.93E-09	4.64E-07	4.22E-08	7.18E-10	3.99E-08	1.16E-07	1.28E-02	1.29E-02	2.56E-03	2.48E-06	2.25E-08
<sup>240</sup> Pu	2.94E-07	6.70E-09	1.47E-08	4.10E-10	3.92E-07	3.95E-08	6.71E-10	3.80E-08	3.37E-08	1.28E-02	1.29E-02	2.56E-03	2.34E-06	2.14E-08
<sup>241</sup> Pu	3.44E-10	1.11E-10	5.60E-10	2.87E-11	1.51E-09	6.16E-11	1.05E-12	8.45E-12	3.52E-09	2.25E-04	2.27E-04	4.48E-05	2.93E-09	5.48E-12
<sup>241</sup> Am	6.04E-06	1.53E-06	8.87E-06	6.72E-09	1.25E-05	1.03E-06	1.75E-08	1.69E-07	3.29E-05	1.07E-02	1.08E-02	2.17E-03	5.47E-05	1.11E-07

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable.

Dose efficace (mSv/an) pour un dépôt de 1 Bq.cm <sup>-2</sup> pour les scénarios de la filière automobile						
Gestionnaire parc automobile	Contrôle	Transport	Conduite voiture neuve Conducteur	Conduite voiture neuve Passager 2-7 ans	Conduite voiture occasion - Conducteur	Conduite voiture occasion - Passager
<sup>137</sup> Cs+	5.43E-03	7.28E-04	6.12E-03	7.25E-03	1.02E-02	1.12E-02
<sup>134</sup> Cs	1.02E-02	1.96E-03	1.32E-02	1.48E-02	2.06E-02	2.37E-02
<sup>136</sup> Cs	6.73E-04	1.36E-03	9.74E-04	1.05E-03	1.05E-03	1.15E-03
<sup>131</sup> I	1.78E-04	1.80E-04	1.71E-04	9.03E-04	4.63E-04	1.25E-03
<sup>132</sup> I	5.04E-06	1.30E-05	7.49E-06	7.35E-06	1.50E-02	1.75E-02
<sup>133</sup> I	1.45E-05	3.16E-05	1.93E-05	3.72E-05	5.66E-05	8.20E-05
<sup>129m</sup> Te	9.06E-05	3.02E-05	7.11E-05	4.35E-04	3.16E-04	7.27E-04
<sup>131</sup> Te	1.70E-07	5.61E-07	2.48E-07	2.45E-07	7.32E-07	8.29E-07
<sup>131m</sup> Te	4.20E-05	1.21E-04	5.94E-05	6.20E-05	6.79E-05	7.21E-05
<sup>132</sup> Te	2.51E-05	4.68E-05	2.80E-05	7.46E-05	6.10E-05	1.15E-04
<sup>110m</sup> Ag	1.03E-02	3.19E-03	1.47E-02	1.53E-02	1.83E-02	1.96E-02
<sup>122</sup> Sb	3.07E-05	7.54E-05	4.49E-05	5.82E-05	8.78E-05	1.10E-04
<sup>124</sup> Sb	2.49E-03	1.81E-03	3.52E-03	3.85E-03	5.83E-03	6.64E-03
<sup>125</sup> Sb	2.40E-03	5.53E-04	3.50E-03	4.06E-03	1.18E-02	1.41E-02
<sup>127</sup> Sb	1.60E-04	1.79E-04	9.08E-05	1.08E-04	1.22E-04	1.45E-04
<sup>128</sup> Sb	5.94E-06	1.51E-05	8.64E-06	8.60E-06	1.15E-05	1.20E-05
<sup>58</sup> Co	1.58E-03	1.07E-03	2.37E-03	2.45E-03	5.05E-03	5.69E-03
<sup>60</sup> Co	1.37E-02	2.92E-03	1.93E-02	2.24E-02	2.81E-02	3.30E-02
<sup>140</sup> Ba+	7.42E-04	1.41E-03	9.94E-04	1.16E-03	1.10E-03	1.28E-03
<sup>103</sup> Ru+	4.49E-04	5.01E-04	7.09E-04	7.34E-04	8.42E-04	8.93E-04
<sup>106</sup> Ru+	1.69E-03	2.62E-04	1.78E-03	5.83E-03	6.48E-03	1.15E-02
<sup>94</sup> Nb	9.44E-03	1.99E-03	1.40E-02	1.48E-02	1.72E-02	1.86E-02
<sup>95</sup> Nb	6.34E-04	7.31E-04	9.47E-04	9.72E-04	1.03E-03	1.07E-03
<sup>99</sup> Mo	1.06E-05	2.67E-05	1.53E-05	1.92E-05	1.53E-05	1.92E-05
<sup>90</sup> Sr	4.61E-03	0.00E+00	2.52E-03	1.41E-02	5.29E-03	1.74E-02
<sup>91</sup> Sr	6.51E-06	1.62E-05	9.38E-06	1.32E-05	9.63E-06	1.35E-05
<sup>144</sup> Ce+	6.04E-04	6.04E-05	5.17E-04	1.73E-03	8.41E-04	2.09E-03
<sup>239</sup> Np	1.02E-05	2.96E-05	1.17E-05	1.75E-05	1.17E-05	1.75E-05
<sup>238</sup> Pu	3.48E-02	1.07E-08	1.91E-02	7.71E-02	1.91E-02	7.71E-02
<sup>239</sup> Pu	3.80E-02	9.67E-08	2.08E-02	8.24E-02	2.08E-02	8.24E-02
<sup>240</sup> Pu	1.60E-02	9.92E-09	2.08E-02	8.24E-02	2.08E-02	8.24E-02
<sup>241</sup> Pu	3.06E-04	7.12E-04	3.90E-04	1.34E-03	3.94E-04	1.34E-03
<sup>241</sup> Am	3.05E-02	1.51E-05	1.67E-02	6.74E-02	1.67E-02	6.74E-02

Dose efficace (mSv) pour un dépôt unitaire de 1 Bq.cm <sup>-2</sup>	
Scénario « Biberon »	
<sup>137</sup> Cs+	6.06E-03
<sup>134</sup> Cs	8.09E-03
<sup>136</sup> Cs	4.80E-03
<sup>131</sup> I	9.10E-02
<sup>132</sup> I	1.21E-03
<sup>133</sup> I	2.22E-02
<sup>129m</sup> Te	1.21E-02
<sup>131</sup> Te	3.34E-04
<sup>131m</sup> Te	7.08E-03
<sup>132</sup> Te	1.52E-02
<sup>110m</sup> Ag	7.08E-03
<sup>122</sup> Sb	6.06E-03
<sup>124</sup> Sb	8.09E-03
<sup>125</sup> Sb	3.08E-03
<sup>127</sup> Sb	6.06E-03
<sup>129</sup> Sb	1.42E-03
<sup>58</sup> Co	2.22E-03
<sup>60</sup> Co	1.36E-02
<sup>140</sup> Ba+	9.10E-03
<sup>103</sup> Ru+	2.32E-03
<sup>106</sup> Ru+	2.48E-02
<sup>94</sup> Nb	4.90E-03
<sup>95</sup> Nb	1.62E-03
<sup>99</sup> Mo	1.77E-03
<sup>90</sup> Sr	3.69E-02
<sup>91</sup> Sr	2.02E-03
<sup>144</sup> Ce+	1.97E-02
<sup>239</sup> Np	2.88E-03
<sup>238</sup> Pu	2.02E-01
<sup>239</sup> Pu	2.12E-01
<sup>240</sup> Pu	2.12E-01
<sup>241</sup> Pu	2.88E-03
<sup>241</sup> Am	1.87E-01

## ANNEXE 4 SEUILS DE GESTION DU BOIS ET DE SES SOUS-PRODUITS EN VIGUEUR EN UKRAINE APRES L'ACCIDENT DE TCHERNOBYL

Décret du ministère de la Santé n°73 du 31 octobre 2005

Produits forestiers	Concentration maximale (Bq/kg)	
	<sup>137</sup> Cs	<sup>90</sup> Sr
<b>1. Bois bruts</b>		
<b>1. bois rond</b>		
- Grumes	1500	-
- Bois pour l'industrie du papier	1000	-
- Bois pour la fabrication de placage	1000	-
- Bois à des fins industrielles construction et structures temporaires	1500	-
- Bois d'étais (mines)	3000	-
<b>2. Bois pour les besoins technologiques</b>	1500	-
<b>2. Bois transformés</b>		
- Planche à bois	1000	-
- avivés	740	-
- arrondi	740	-
- parquet	740	-
- Bois sciés, y compris les meubles	740	-
- Bois sciés pour poêles	1500	-
- Bois pour conteneurs	1000	-
<b>Les produits à destination culturelle et des ménages</b>		
- Bois de chauffage, bûches	600	60
- clôtures	1000	-
- souvenirs	740	-
- produits économiques et de consommation (poignées, planches de cuisine, etc.)	740	-

## ANNEXE 5 : PARAMETRES, HYPOTHESES ET RESULTATS UNITAIRES POUR LE SCENARIO « BIBERON »

### La situation couverte

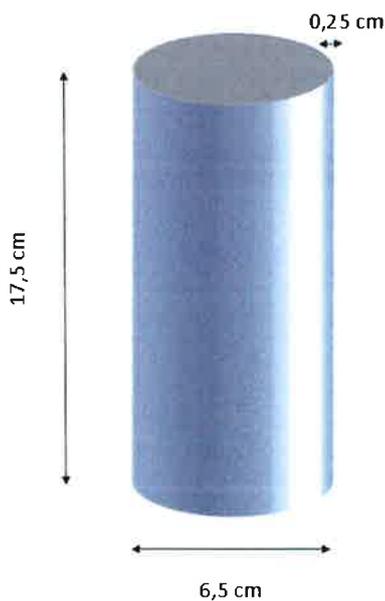
Il est fait l'hypothèse qu'un biberon en plastique est laissé soumis à un dépôt de radioactivité généré par une situation accidentelle. Les surfaces extérieures et intérieures sont supposées uniformément contaminées à raison de  $1 \text{ Bq.cm}^{-2}$  de chaque RN.

Ce biberon est utilisé sans lavage pour la préparation du repas d'un jeune enfant, typiquement entre 1 et 2 ans. Le dépôt à l'intérieur du biberon est supposé se diluer dans le lait contenu dans le biberon et être ensuite ingéré par l'enfant.

Par ailleurs, la contamination des mains de l'enfant après la prise du biberon est supposée donner lieu à une exposition interne, par contact mains/ bouche et ingestion involontaire.

Il n'est considéré qu'une seule prise de biberon et donc une exposition unique et ponctuelle.

### Description de la source : Biberon de 330 ml



### Hypothèse de transfert de la contamination du biberon vers les mains :

- la surface des mains de l'enfant est égale à environ  $260 \text{ cm}^2$  pour les deux mains considérées en entier. La surface des paumes correspond donc à la moitié de cette valeur ;
- 20 % de la contamination présente sur le biberon est transféré sur les mains.
- l'intervalle entre deux lavages de main de l'enfant est supposé être de 4 heures, avec 10 contacts main-bouche par heure.
- sur l'ensemble des contacts, il est supposé qu'au total 15% de la contamination initiale est ingéré par l'enfant.