



HAL
open science

Problématiques liées au calcul de la dose efficace engagée lors d'une contamination interne digestive par une particule de Cobalt 60 en centrale nucléaire de production d'électricité

Romain Grare

► To cite this version:

Romain Grare. Problématiques liées au calcul de la dose efficace engagée lors d'une contamination interne digestive par une particule de Cobalt 60 en centrale nucléaire de production d'électricité. Médecine humaine et pathologie. 2017. dumas-01620280

HAL Id: dumas-01620280

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01620280>

Submitted on 20 Oct 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE PRÉSENTÉE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

U.F.R. des sciences médicales

Spécialité MÉDECINE DU TRAVAIL

thèse n°3150, soutenue publiquement par

Romain GRARE

le 9 octobre 2017

Problématiques liées au calcul de la dose efficace engagée lors d'une contamination interne digestive par une particule de Cobalt 60 en centrale nucléaire de production d'électricité.

Directeur de thèse : **Dr. Bernard LANDRY**

Co-directeur de thèse : **Dr. Hervé COLINMAIRE**

Rapporteur : **Pr. Patrick BROCHARD**

Jury

| | | |
|----------------------------------|--------------|-------------------|
| Pr. Isabelle BALDI, | PU PH | Présidente |
| Pr. Michel DRUET-CABANAC, | PU PH | |
| Pr. Jean-Marc SOULAT, | PU PH | |
| Dr. Fabrice HERIN, | PH | |
| Dr. Bernard LANDRY, | | |

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier les membres du jury :

Madame le professeur Isabelle BALDI

Professeur universitaire, praticien hospitalier – CHU de BORDEAUX

Monsieur le professeur Michel DRUET-CABANAC

Professeur universitaire, praticien hospitalier – CHU de LIMOGES

Monsieur le professeur Jean-Marc SOULAT

Professeur universitaire, praticien hospitalier – CHU de TOULOUSE

Monsieur le docteur Fabrice HERIN

Praticien hospitalier – CHU de TOULOUSE

Monsieur le docteur Bernard LANDRY

EDF – CNPE du BLAYAIS

C'est un honneur que vous ayez accepté de siéger au jury d'évaluation de ce travail.
Veuillez trouver en celui-ci l'expression de ma profonde reconnaissance.

Je tiens ensuite à remercier tout particulièrement le rapporteur de ce travail :

Monsieur le professeur Patrick BROCHARD

Professeur universitaire, praticien hospitalier – CHU de BORDEAUX

Vous m'avez fait l'honneur d'accepter d'être le rapporteur de ce travail.

Veuillez trouver en celui-ci l'expression de la continuité de vos enseignements.

Votre implication pour la spécialité ainsi que la transmission de votre expérience et de vos connaissances resteront un modèle pour moi.

Je tiens à remercier ici :

Madame le Dr Catherine VERDUN-ESQUER

Praticien hospitalier – CHU de BORDEAUX

Pour vos enseignements et votre implication sans faille dans la coordination de la spécialité.

Veillez trouver en ce travail l'expression de ma sincère gratitude.

Et enfin je remercie infiniment les deux directeurs de cette thèse :

Monsieur le docteur Bernard LANDRY

EDF – CNPE du BLAYAIS

Vous m'avez doublement fait honneur, initialement en m'accueillant au sein du BLAYAIS sous votre tutelle, puis en devenant mon directeur de thèse.

Votre encadrement, votre entrain et votre savoir m'ont transmis le goût de la radioprotection, avant de me conduire sur le chemin que j'emprunte aujourd'hui.

Soyez en profondément remercié.

Monsieur le docteur Hervé COLINMAIRE

EDF – CNPE du BLAYAIS

Je vous remercie d'avoir accepté la co-direction de mon travail.

De vos connaissances abyssales et de votre mesure en toute chose ont découlé des préceptes qui guideront mon activité future.

Là aussi soyez en profondément remercié.

Je dédie ce travail :

à mes parents, **Catherine** et **Philippe**, pour leur amour ;

à mes frères, **Nicolas** et **Alexis**, pour leur soutien ;

à ma famille, pour leurs encouragements ;

à mes amis, pour leur amitié ;

et surtout à ma femme – **Laure** – pour la Vie.

Seul compte le cœur.

Primum non nocere.

Serment

Je jure par Apollon médecin, par Asclépios, par Hygie et Panacée, je prends à témoin tous les dieux et toutes les déesses d'accomplir fidèlement, autant qu'il dépendra de mon pouvoir et de mon intelligence, ce serment et cet engagement écrit; de regarder comme mon père celui qui m'a enseigné cet art, de veiller à sa subsistance, de pourvoir libéralement à ses besoins, de considérer ses enfants comme mes propres frères, de leur apprendre cet art sans salaire et sans aucune stipulation s'ils veulent l'étudier; de communiquer les préceptes vulgaires, les connaissances secrètes et tout le reste de la doctrine à mes enfants, à ceux de mon maître et aux adeptes qui se seront enrôlés et que l'on aura fait jurer selon la loi médicale, mais à aucun autre.

Je ferai servir suivant mon pouvoir et mon discernement le régime diététique au soulagement des malades; j'éloignerai d'eux tout ce qui pourrait leur être nuisible et toute espèce de maléfice; jamais je n'administrerai un médicament mortel à qui que ce soit, quelques sollicitations qu'on me fasse; jamais je ne serai l'auteur d'un semblable conseil; je ne mettrai pas aux femmes de pessaire abortif. Je conserverai ma vie pure et sainte aussi bien que mon art. Je ne taillerai jamais les calculeux, mais je les adresserai à ceux qui s'occupent spécialement de cette opération. Dans toutes les maisons où j'entrerai, ce sera pour le soulagement des malades, me conservant pur de toute iniquité volontaire, m'abstenant de toute espèce de débauche, m'interdisant tout commerce honteux, soit avec les femmes, soit avec les hommes, libres ou esclaves. Les choses que je verrai ou que j'entendrai dire dans l'exercice de mon art, ou hors de mes fonctions dans le commerce des hommes, et qui ne devront pas être divulguées, je les tairai, les regardant comme des secrets inviolables.

Si j'accomplis fidèlement mon serment, si je ne faillis point, puissé-je passer des jours heureux, recueillir les fruits de mon art et vivre honoré de tous les hommes et de la postérité la plus reculée; mais si je viole mon serment, si je me parjure, que tout le contraire m'arrive!

Résumé

Titre : Problématiques liées au calcul de la dose efficace engagée lors d'une contamination interne digestive par une particule de Cobalt 60 en centrale nucléaire de production d'électricité.

Résumé : Lors de contaminations internes digestives par des particules chaudes de Cobalt 60, l'application des modèles biocinétiques et dosimétriques peut conduire à des doses efficaces engagées significatives pour les salariés travaillant en centrales nucléaires de production d'électricité (CNPE); or la littérature scientifique expérimentale au sujet de l'intensité du passage sanguin des oxydes insolubles de ce radioélément tendrait vers un facteur d'absorption gastro-intestinale (f_1) plus faible qu'escompté.

L'objectif principal du travail est d'évaluer le facteur d'absorption gastro-intestinale f_1 en cas de contamination par une particule chaude. L'objectif secondaire est de proposer un coefficient de dose, DPUI, adapté lorsque ce facteur f_1 est proche de zéro. 14 cas de contamination interne purement digestive, repartis sur plusieurs CNPE, ont été étudiés dont 5 avec des examens radiotoxicologiques des excréta.

Les activités mesurées étaient statistiquement significativement différentes de celles attendues par les modèles ($p < 0,05$). Les calculs des f_1 expérimentaux étaient inférieurs au facteur d'absorption gastro-intestinale prévu pour les oxydes de cobalt (5×10^{-2}); ces valeurs étant inférieures à 1×10^{-4} . Ces résultats nous permettent de proposer un coefficient de DPUI lorsque le facteur f_1 calculé expérimentalement est proche de zéro. Les calculs donnent un coefficient de $1,6 \times 10^{-9} \text{ Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$.

Ces résultats montrent l'inadéquation des modèles biocinétiques et dosimétriques actuels pour décrire le comportement des particules chaudes insolubles d'oxydes de Cobalt 60. Il apparaît souhaitable dans cette situation de réaliser des analyses d'urines qui permettent de calculer expérimentalement le facteur d'absorption gastro-intestinale.

Mots-clefs : médecine du travail, radioprotection, dose efficace engagée, dosimétrie, radiotoxicologie, incorporation, Cobalt 60, centrale nucléaire, coefficient de dose.

Abstract

Title : Problems inherent to the calculation in the committed effective dose assessment in the case of a digestive intake of a Cobalt 60 hot particle in nuclear power plant.

Abstract : In nuclear power plant (NPP), on the occasion of an occupational digestive intake of Cobalt 60 hot particle, the biokinetic and dosimetric models may be responsible for a high committed effective dose. However experimental studies suggest a lower value for the gastrointestinal absorption factor (f_1) than estimated using the ICRP models.

The primary objective of this study is to evaluate an experimental gastrointestinal absorption factor f_1 value in case of a digestive incorporation of a Cobalt 60 hot particle. The secondary objective is to submit an experimental dose coefficient when the f_1 value is near zero. 14 contamination cases by ingestion, distributed on multiple french NPP, were studied, including 5 cases with measurements of urine and faecal samples.

Activity measurements of the uptake component were statistically different from those predicted by the models ($p < 0,05$). The experimental f_1 calculation were at least a hundred times lower than the theoretical gastrointestinal absorption factor for the insoluble oxides of cobalt compounds (5×10^{-2}); the values were below (1×10^{-4}). Those results allow us to suggest a dose coefficient of $1,6 \times 10^{-9} \text{ Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$ in this particular case of a hot particle.

Those results would suggest an inadequacy between the ICRP models and experimental data for Cobalt 60 hot particles encountered in NPP. Further studies would be necessary in order to strengthen our conclusion. It would be desirable to carry out urine analysis in order to proceed the calculation of an experimental f_1 value.

Keywords : occupational medicine, radiation protection, committed effective dose, dosimetry, radiotoxicology, incorporation, Cobalt 60, nuclear plant, dose coefficient.

Acronymes

ATP Anthropogammamétrie
CADOR Calcul de Dose Réglementaire
CEA Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives
CIPR Commission Internationale de Protection Radiologique
CNPE Centrale Nucléaire de Production d'Électricité
DPUI Dose efficace engagée Par Unité d'Incorporation
EDF Électricité De France
EURADOS *European Radiation Dosimetry Group*
GV Générateur de Vapeur
HATM *Human Alimentary Tract Model* – modèle du tractus alimentaire humain
IAEA *International Atomic Energy Agency*
ICRP *International Commission on Radiological Protection*
IMBA *Integrated Modules for Bioassay Analysis*
INB Installation Nucléaire de Base
INBS Installation Nucléaire de Base Secrète
IRSN Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire
LD Limite de Détection
MEDOR Méthode Dosimétrique de Référence
NPP *Nuclear Power Plant* – réacteur nucléaire de puissance
PF Produits de Fission
REP Réacteur à Eau Pressurisée
SAF *Specific Absorbed Fraction*
TGI Tractus Gastro-Intestinal

Liste des tableaux

| | | |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1 | Facteurs de pondération W_R pour chaque type de rayonnement. | 29 |
| 1.2 | Facteurs de pondération tissulaire W_T selon les Publications 60 et 103 de la CIPR. | 30 |
| 1.3 | Valeurs limites d'exposition. | 31 |
| 1.4 | Temps moyen de séjour dans chaque région du TGI. | 34 |
| 1.5 | Répartition tissulaire du cobalt et périodes biologiques associées. | 35 |
| 1.6 | Profondeurs et masses des cellules cibles pour chaque région du HATM chez l'homme adulte. | 39 |
| 2.1 | Caractéristiques des cas. | 46 |
| 2.2 | Facteurs de rétention et d'excrétion pour le Cobalt 60, $f_1 = 5 \times 10^{-2}$, en Bq par Bq ingéré. | 48 |
| 2.3 | Rapports des facteurs d'absorption gastro-intestinale et d'excrétion urinaire du Cobalt 60, à J1, J3, J5, J7 et J10. | 51 |
| 3.1 | Caractéristiques qualitatives des mesures ATP initiales. | 55 |
| 3.2 | Résultats de l'analyse de cohérence. | 56 |
| 3.3 | Activités mesurées et valeurs des f_1 expérimentaux associées. | 59 |

Table des figures

| | | |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1 | Schéma du fonctionnement d'un REP. | 23 |
| 1.2 | Spectre d'émission β | 24 |
| 1.3 | Schéma des mécanismes de désexcitation nucléaire. | 25 |
| 1.4 | Schéma de la désintégration du Cobalt 60. | 26 |
| 1.5 | Parcours et portée d'un faisceau d'électrons. | 28 |
| 1.6 | Muqueuse intestinale. | 32 |
| 1.7 | Modèle biocinétique du tractus gastro-intestinal décrit dans la publication 30 de la CIPR. | 33 |
| 1.8 | Cobalt 60 (ingestion $f_1 = 5 \times 10^{-2}$) : valeurs prédictives (Bq par Bq incorporé) après incorporation aiguë. | 36 |
| 1.9 | Structure du tractus gastro-intestinal humain (HATM) selon la publication 100 de la CIPR. | 37 |
| 1.10 | Coupe sagittale des parois de l'intestin grêle (à gauche) et du colon (à droite), montrant la couche de cellules cibles au fond des cryptes, d'après la CIPR 100. | 38 |
| 1.11 | Section de la géométrie des régions tubulaires de l'HATM selon la CIPR 100. | 38 |
| 1.12 | Comparaison du SAF (<i>Specific Absorbed Fraction</i>) pour l'estomac entre la CIPR 30 et la CIPR 100 en fonction de l'énergie des électrons. | 40 |
| 1.13 | Comparaison des valeurs du SAF entre la CIPR 30 (ULI) et la CIPR 100 (colon droit du HATM) en fonction de l'énergie des électrons. | 40 |
| 1.14 | Schéma du modèle « plissé » de l'intestin grêle utilisé pour prendre en compte l'irradiation croisée survenant depuis une autre partie de ce même intestin grêle (CIPR 133). | 41 |
| 2.1 | Graphique obtenu avec le logiciel CADOR pour évaluation de la cohérence du modèle. | 48 |
| 2.2 | Relation entre le facteur d'absorption gastro-intestinale et le facteur d'excrétion urinaire à J1. | 52 |
| 3.1 | CADOR : Courbes prédites par le modèle de la CIPR pour le cas n°1. | 58 |

| | | |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2 | Relation entre le coefficient de DPUI et le facteur d'absorption gastro-intestinale f_1 | 60 |
| 3.3 | Relation entre le coefficient de DPUI de la CIPR 134 et le facteur d'absorption gastro-intestinale f_1 | 61 |
| A.1 | Courbes produites par CADOR pour le cas n°1. | 74 |
| A.2 | Courbes produites par CADOR pour le cas n°2. | 75 |
| A.3 | Courbes produites par CADOR pour le cas n°3. | 76 |
| A.4 | Courbes produites par CADOR pour le cas n°4. | 77 |
| A.5 | Courbes produites par CADOR pour le cas n°5. | 78 |
| A.6 | IMBA : coefficient de dose pour $f_1 = 0$ | 79 |
| A.7 | Modèle dosimétrique pour le tractus gastro-intestinal (1). | 80 |
| A.8 | Modèle dosimétrique pour le tractus gastro-intestinal (2). | 81 |
| A.9 | Modèle dosimétrique pour le tractus gastro-intestinal (3). | 82 |
| A.10 | Modèle dosimétrique pour le tractus gastro-intestinal (4). | 83 |
| A.11 | Modèle dosimétrique pour le tractus gastro-intestinal (5). | 84 |
| A.12 | Fiche d'admission au bloc de décontamination en CNPE. | 85 |
| A.13 | Courrier médical après contamination en CNPE. | 86 |

Table des matières

| | |
|-----------------------------------------------------------|----|
| Résumé | 7 |
| Abstract | 9 |
| Acronymes | 11 |
| Liste des tableaux | 13 |
| Table des figures | 15 |
| INTRODUCTION | 19 |
| 1 CONTEXTE | 21 |
| 1.1 LES PARTICULES CHAUDES | 21 |
| 1.1.1 Fonctionnement d'une centrale nucléaire | 21 |
| 1.1.2 Origine des grattons | 22 |
| 1.2 LA RADIOACTIVITÉ | 24 |
| 1.2.1 L'émission β | 24 |
| 1.2.2 La désexcitation γ | 25 |
| 1.2.3 Caractéristiques du Cobalt 60 | 25 |
| 1.3 L'INTERACTION DANS LA MATIÈRE ET LE DÉPÔT D'ÉNERGIE | 27 |
| 1.4 GRANDEURS UTILISÉES EN DOSIMÉTRIE INTERNE | 28 |
| 1.4.1 Dose absorbée | 28 |
| 1.4.2 Dose équivalente | 28 |
| 1.4.3 Dose efficace | 29 |
| 1.4.4 Dose efficace engagée | 29 |
| 1.4.5 Les valeurs limites réglementaires d'exposition | 30 |
| 1.5 LES MODÈLES BIOCINÉTIQUE ET DOSIMÉTRIQUE ACTUELS | 31 |
| 1.5.1 Rappel anatomique sur l'épithélium intestinal | 32 |
| 1.5.2 Modèle biocinétique digestif de la CIPR 30 (1979) | 33 |
| 1.5.3 Modèle dosimétrique de la CIPR 78 | 34 |
| 1.6 LE MODÈLE BIOCINÉTIQUE DIGESTIF DE LA CIPR 100 (2006) | 36 |
| 1.7 Les publications n°133 et 134 de la CIPR | 41 |

| | | |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2 | MATÉRIEL ET MÉTHODE | 43 |
| 2.1 | MATÉRIEL | 43 |
| 2.1.1 | Critères d'inclusion | 43 |
| 2.1.2 | Liste des cas | 44 |
| 2.2 | MÉTHODE | 47 |
| 2.2.1 | Démonstration du mode d'incorporation digestif | 47 |
| 2.2.2 | Démonstration de l'absence de cohérence avec le modèle digestif | 47 |
| 2.2.3 | Estimation du facteur d'absorption gastro-intestinale | 50 |
| 2.2.4 | Calcul du coefficient de dose lorsque le facteur d'absorption gastro-intestinale est proche de zéro | 53 |
| 3 | RÉSULTATS | 55 |
| 3.1 | MODE D'INCORPORATION | 55 |
| 3.2 | ANALYSE DE COHÉRENCE AVEC LE MODÈLE | 56 |
| 3.3 | CALCUL DU FACTEUR D'ABSORPTION GASTRO-INTESTINALE EXPÉRIMENTAL | 59 |
| 3.4 | CALCUL DU FACTEUR DE DOSE LORSQUE f_1 EST PROCHE DE ZÉRO | 60 |
| 4 | DISCUSSION | 63 |
| 4.1 | VALIDITÉ DE LA MÉTHODE | 63 |
| 4.1.1 | Validité intrinsèque | 63 |
| 4.1.2 | Validité extrinsèque | 64 |
| 4.2 | PROPOSITION POUR L'ESTIMATION DE LA DOSE EFFICACE ENGAGÉE | 66 |
| | CONCLUSION | 67 |
| | Bibliographie | 69 |
| A | Annexes | 73 |

INTRODUCTION

Lors des activités de maintenance dans les centres nucléaires de production d'électricité, les travailleurs peuvent être exposés à des petites particules métalliques de Cobalt 60, dont le diamètre n'excède pas quelques dizaines ou centaines de micromètres (μm), mais dont l'activité radioactive peut être très élevée et atteindre plusieurs centaines de kilobecquerels (kBq). Ces particules chaudes (*hot particles*) dénommées « grattons » dans le langage EDF, terme que nous utiliserons par la suite, peuvent être à l'origine d'une contamination cutanée ou, plus rarement, d'une contamination interne. Dans cette situation, l'arrêté du 17 juillet 2013 [1] demande au médecin du travail de déterminer la dose efficace engagée ou la dose équivalente engagée selon les modalités de calcul définies par l'arrêté du 1^{er} septembre 2003 [2].

Ces contaminations se caractérisent par une disparition très rapide de l'activité mesurée dans l'organisme, l'apparition de toute l'activité sur une seule selle et l'absence d'activité détectable dans les urines. Ces éléments laissent penser que le mode d'incorporation est digestif et que le transfert systémique est quasiment nul. S'il n'y a pas de transfert systémique, les coefficients de dose efficace par unité d'incorporation (DPUI) de l'arrêté du 1^{er} septembre 2003, définis selon les modèles biocinétiques et dosimétriques de la publication 78 de la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR 78) [3] pourraient ne pas être adaptées. Ces coefficients ont été calculés sur la base des publications 30 [4], 68 [5] et 78 de la CIPR qui considèrent, qu'après ingestion, la fraction de l'activité transférée dans le sang est de 5×10^{-2} pour les oxydes de Cobalt 60.

L'objet de ce travail est :

- étudier en quoi les modèles de la CIPR et les coefficients de dose de l'arrêté du 1^{er} septembre 2003 ne semblent pas adaptés dans le cas particulier d'un gratton ;
- évaluer le facteur d'absorption gastro-intestinale f_1 en cas de contamination par une particule chaude ;
- proposer un coefficient de dose, DPUI, adapté lorsque ce facteur f_1 est proche de zéro.

CONTEXTE

Sommaire

| | | |
|-------|-----------------------------------------------------------------|----|
| 1.1 | LES PARTICULES CHAUDES | 21 |
| 1.1.1 | Fonctionnement d'une centrale nucléaire | 21 |
| 1.1.2 | Origine des grattons | 22 |
| 1.2 | LA RADIOACTIVITÉ | 24 |
| 1.2.1 | L'émission β | 24 |
| 1.2.2 | La désexcitation γ | 25 |
| 1.2.3 | Caractéristiques du Cobalt 60 | 25 |
| 1.3 | L'INTERACTION DANS LA MATIÈRE ET LE DÉPÔT D'ÉNERGIE | 27 |
| 1.4 | GRANDEURS UTILISÉES EN DOSIMÉTRIE INTERNE | 28 |
| 1.4.1 | Dose absorbée | 28 |
| 1.4.2 | Dose équivalente | 28 |
| 1.4.3 | Dose efficace | 29 |
| 1.4.4 | Dose efficace engagée | 29 |
| 1.4.5 | Les valeurs limites réglementaires d'exposition | 30 |
| 1.5 | LES MODÈLES BIOCINÉTIQUE ET DOSIMÉTRIQUE ACTUELS | 31 |
| 1.5.1 | Rappel anatomique sur l'épithélium intestinal | 32 |
| 1.5.2 | Modèle biocinétique digestif de la CIPR 30 (1979) | 33 |
| 1.5.3 | Modèle dosimétrique de la CIPR 78 | 34 |
| 1.6 | LE MODÈLE BIOCINÉTIQUE DIGESTIF DE LA CIPR 100 (2006) | 36 |
| 1.7 | Les publications n°133 et 134 de la CIPR | 41 |

1.1 LES PARTICULES CHAUDES

1.1.1 Fonctionnement d'une centrale nucléaire

Une centrale électrique est une usine qui produit de l'électricité en se basant classiquement sur un couple turbine - alternateur appelé turboalternateur. La rotation de la turbine entraîne l'alternateur qui fabrique l'électricité. Contrairement aux centrales thermiques à combustible fossile – pétrole, gaz naturel et charbon – une centrale nucléaire n'utilise pas *stricto sensu* de combustible. Cependant le terme de « combustible

nucléaire » est couramment employé par analogie pour désigner les noyaux fissiles ou non sur lesquels repose la réaction de fission ayant lieu au sein du cœur du réacteur.

La réaction de fission nucléaire est la fracture d'un noyau lourd fissile, Uranium 235 (^{235}U) ou Plutonium 239, en deux fragments de fission, sous l'action d'un neutron. Les noyaux résultants directement des fissions et ceux se formant par décroissance radioactive sont appelés « produits de fission » (PF) – Xénon 133, Krypton 85, Iode 131, Césium 137, Strontium 90, Technétium 99, etc. Ils décroissent progressivement en éléments stables. Chaque réaction de fission libère une énorme quantité d'énergie, ainsi qu'entre deux et trois neutrons dits « rapides ». Ces derniers sont ralentis afin de favoriser la réaction en chaîne* et sont alors dits « thermiques ». Ces neutrons peuvent être capturés par les éléments stables présents dans les structures métalliques ou l'enceinte de confinement des réacteurs. Il en résulte la formation par capture neutronique de radioéléments nommés « produits d'activation » – Cobalt 60, Manganèse 54, Chrome 51, Fer 59, Argent 110 métastable, Tritium, etc – pouvant se retrouver dans le circuit primaire (*cf infra*) [7]. Le parc nucléaire civil français de production d'électricité est constitué exclusivement de réacteurs à eau pressurisée (REP). Trois structures essentielles, indépendantes et interconnectées en assurent le fonctionnement, et sont illustrées par la figure 1.1 :

- le circuit primaire composé du cœur du réacteur, d'un fluide caloporteur, d'un pressuriseur et de pompes ;
- le circuit secondaire avec notamment les générateurs de vapeur et le groupe turboalternateur ;
- le circuit de refroidissement.

La réaction de fission nucléaire a lieu dans le cœur du réacteur et plus précisément au sein des assemblages de combustible appelés « crayons ». Le freinage des fragments de fission dans la matière libère de l'énergie dissipée sous forme de chaleur et qui représente environ 80 % de l'énergie nucléaire [8]. Entre les crayons peuvent coulisser des barres de contrôles constituées d'éléments neutrophages permettant d'éviter l'emballement de la réaction en chaîne en captant une partie des neutrons émis lors de la fission. Les crayons baignent dans un fluide caloporteur maintenu sous pression afin d'éviter sa vaporisation. Il capte l'énergie thermique et la transporte au contact du circuit secondaire au sein des générateurs de vapeur (GV). Le fluide du circuit secondaire est ainsi vaporisé dans les GV et entraîne la turbine qui, couplée à l'alternateur, crée de l'électricité. Cette vapeur est enfin condensée au contact du circuit de refroidissement pour être réinjectée vers les GV.

1.1.2 Origine des grattons

Dans les réacteurs de fission nucléaire, les particules chaudes ont pour origine des fragments d'éléments combustibles, i.e. des produits de fission, et des débris métalliques.

*. Cela permet de limiter approximativement à 4 % l'enrichissement isotopique nécessaire en ^{235}U du combustible nucléaire [6].

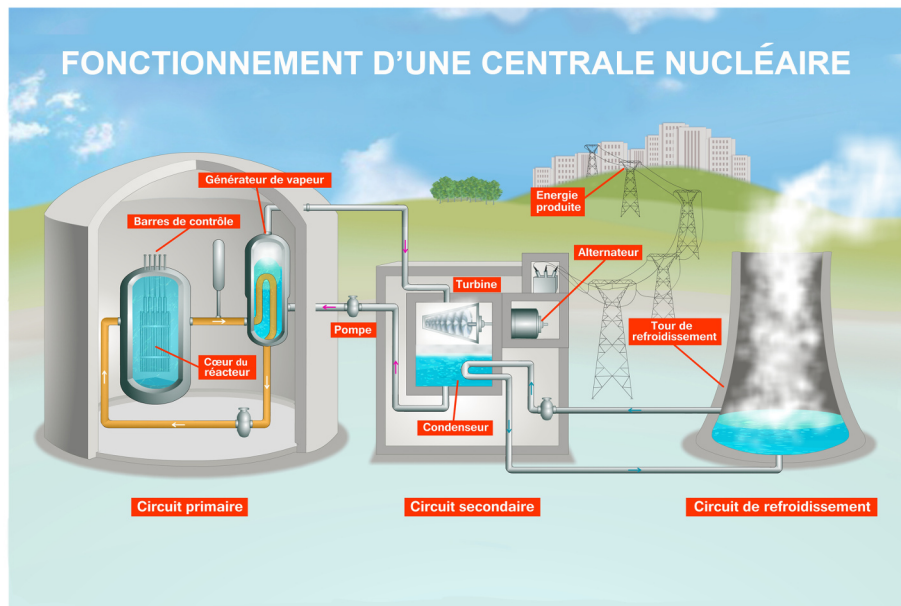


FIGURE 1.1 – Schéma du fonctionnement d'un REP.

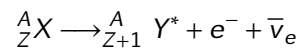
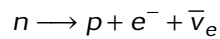
Ces débris sont essentiellement constitués de stellite, alliage d'acier à haute teneur en Cobalt 59, très résistant à l'usure, la corrosion et les hautes températures [6]. Le stellite est retrouvé sur les vannes, les robinets et les paliers de pompes, tandis que de petits copeaux peuvent être libérés dans le circuit primaire (figure 1.1), à la suite d'opérations de maintenance (rodage des robinets) ou d'incidents mécaniques (rupture de paliers) sur les pompes. Ils sont activés par le flux neutronique lors de leurs passages successifs dans le cœur du réacteur, le Cobalt 59 stable se transformant alors en Cobalt 60 radioactif. Ces particules chaudes n'excèdent pas quelques dizaines ou centaines de micromètres (μm) de diamètre, sont très mobiles et se déplacent au gré des mouvements d'eau. Leur activité peut être très élevée, allant jusqu'à atteindre plusieurs centaines de kilobecquerel (kBq). Le becquerel (Bq) est l'unité permettant d'exprimer l'activité d'une source radioactive. C'est le nombre de noyaux qui s'y désintègre par seconde.

Lorsque le réacteur nucléaire est en fonctionnement, les grattons se fixent majoritairement sur les éléments combustible, mais certains se déposent au fond de la cuve ou peuvent être piégés dans des singularités du circuit primaire et de ses auxiliaires. Cependant, une fois le cœur arrêté pour maintenance ou rechargement en combustible, les manutentions des crayons usagés libèrent en piscines de stockage une partie des grattons qui s'y étaient fixés. Dans cette situation, ils se dispersent alors dans les circuits au gré des vidanges de piscine et autres mouvements d'eau. Ils peuvent alors facilement se déposer dans les points bas des bras morts ou se retrouver piégés dans les singularités de ces circuits, comme par exemple les interfaces mécaniques de matériels ou les joints de soudure.

1.2 LA RADIOACTIVITÉ

1.2.1 L'émission β

En cas d'excès de neutrons, le noyau radioactif instable subit des transitions radioactives pour retourner à la stabilité. Ces transitions consistent en la transformation d'un neutron en un proton suivie par l'émission d'un électron (particule β) et d'un antineutrino électronique.



Le noyau X se transforme et le noyau final Y présente une énergie d'excitation E^* . L'énergie disponible au cours de la transformation, Q_{β^-} , est partagée selon la formule 1.1 entre le couple neutrino – antineutrino (énergie cinétique) et le noyau Y. Le spectre en énergie des particules β ainsi émises est continu jusqu'à la valeur maximale $E_{\beta_{max}}$. L'énergie moyenne $E_{\beta_{moy}}$ est égale au tiers environ de l'énergie maximale $E_{\beta_{max}}$ [6].

$$Q_{\beta} = E_{\beta_{max}} + E^* \quad (1.1)$$

avec

$$E_{\beta_{moy}} = \frac{1}{3} \cdot E_{\beta_{max}} \quad (1.2)$$

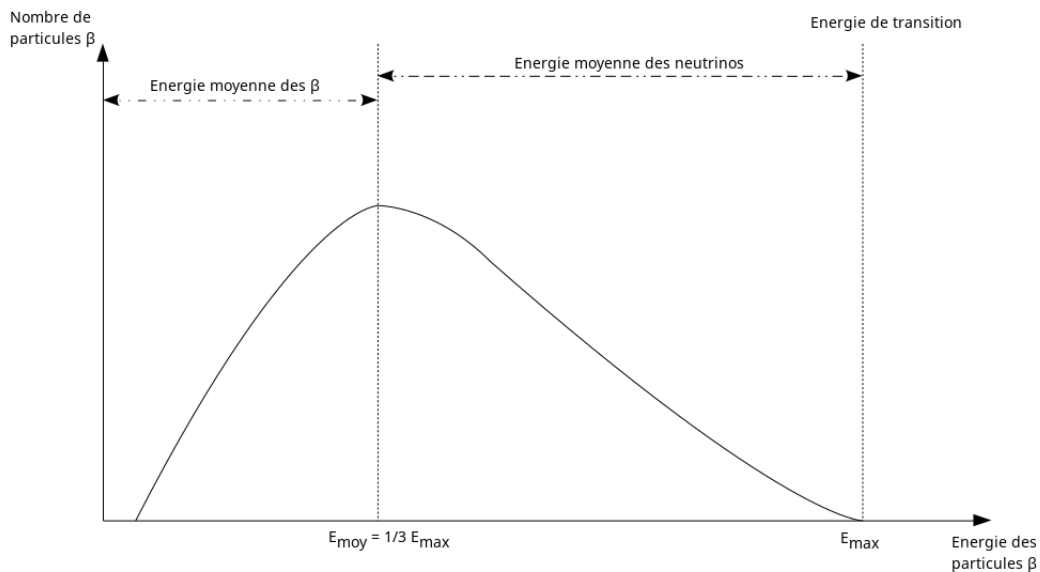


FIGURE 1.2 – Spectre d'émission β .

1.2.2 La désexcitation γ

La transformation nucléaire par émission β – mais aussi celles de fission ou d'émission α par exemple – laissent le noyau final dans un état excité, explicable par le modèle en couches. Un nucléon insuffisamment lié possède une énergie d'excitation E^* . La désexcitation nucléaire a lieu lorsque ce nucléon excité passe d'une couche superficielle à une couche plus « profonde » ayant une énergie de liaison plus élevée et disposant d'un emplacement libre. Ce mécanisme pouvant se dérouler au cours de plusieurs transitions, chacune s'effectue selon deux possibilités : émission d'un photon γ ou conversion interne, *cf* figure 1.3. Lors de la conversion interne, l'énergie excédentaire est directement transférée à un électron du cortège électronique qui est alors éjecté de l'atome avec une énergie cinétique égale à la différence entre l'énergie d'excitation E^* et l'énergie de liaison de l'électron expulsé. Dans le cas de la désexcitation γ , le photon émis emporte une énergie égale à l'énergie d'excitation E^* . Le spectre des photons γ est donc un spectre de raies. Habituellement la durée de l'état excité est très brève, de l'ordre de la picoseconde (ps). Ainsi, l'émission de photons γ ou la conversion interne accompagnent les autres émissions radioactives.

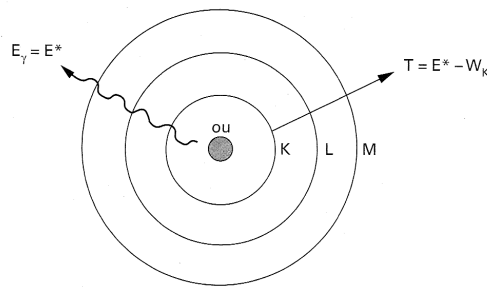
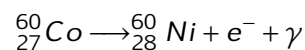


FIGURE 1.3 – Schéma des mécanismes de désexcitation nucléaire.

1.2.3 Caractéristiques du Cobalt 60

Le Cobalt 60 a une période radioactive λ de 5,27 ans et une activité massique de $4,18 \times 10^{13} \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$. Son processus de désintégration est repris dans la figure 1.4. C'est un radioélément instable qui se transforme en ^{60}Ni en émettant un électron. Cet atome de nickel possède à cet instant une énergie d'excitation qui sera expulsée dans l'immense majorité des cas au cours de l'émission simultanée de deux photons gamma. L'émission β est d'énergie maximale $E_{\beta_{max}} = 318 \text{ keV}$ tandis que le spectre d'émission γ est dominé par les raies de 1173 keV et de 1333 keV [9].

Conformément à la relation 1.2 (page 24), l'énergie moyenne des électrons émis est donc $E_{\beta_{moy}} = 106 \text{ keV}$.



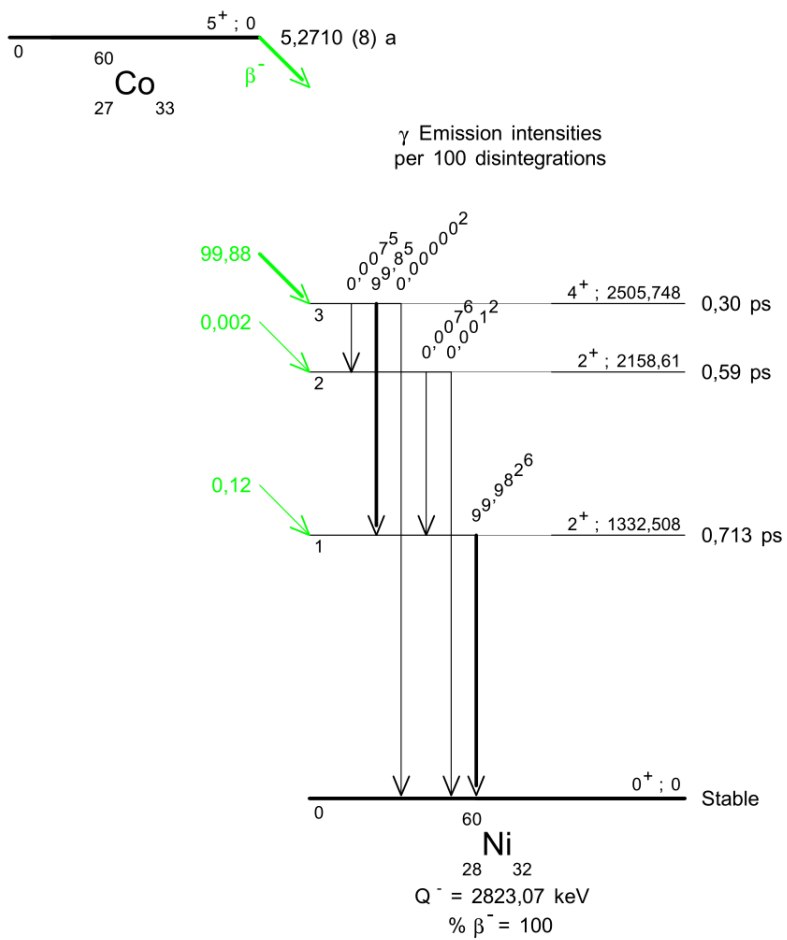


FIGURE 1.4 – Schéma de la désintégration du Cobalt 60.

1.3 L'INTERACTION DANS LA MATIÈRE ET LE DÉPÔT D'ÉNERGIE

La particule β correspond à un électron, c'est à dire une particule chargée légère interagissant majoritairement avec la matière selon deux processus : par interaction coulombienne responsable d'excitations et d'ionisations des électrons du milieu traversé et par collision inélastique avec les noyaux du milieu provoquant l'émission d'un rayonnement de freinage. Pour le rayonnement de freinage, il existe une valeur d'énergie, dite « critique », des électrons incidents en deçà de laquelle ce phénomène radiatif n'est pas significatif [10]. La formule empirique 1.3 permet d'accéder à cette valeur à 10 % près en fonction du numéro atomique Z des noyaux du milieu traversé :

$$E(\text{MeV}) = \frac{610}{Z + 1,24} \quad (1.3)$$

Ainsi, considérant que les tissus humains sont constitués en majorité de molécules d'hydrogène (soit $Z = 1$), le calcul de cette énergie critique retrouve 272 MeV. Le Cobalt 60 émet des particules β d'énergie maximale $E_{\beta_{max}} = 318\text{keV}$ au maximum et d'énergie moyenne $E_{\beta_{moy}} = 106\text{keV}$, bien en dessous de cette valeur, ce qui permet dans la suite de ce travail de négliger le rayonnement photonique de freinage des électrons émit par le Cobalt 60.

Concernant les interaction coulombiennes, ionisations et excitations, l'électron incident transfère progressivement son énergie cinétique aux électrons du milieu traversé. Ces phénomènes s'accompagnent généralement de déviations de la trajectoire dont la longueur réelle est appelée parcours. Les multiples déviations sont à l'origine d'un parcours sinueux dans la matière (cf schéma 1.5), ainsi en radioprotection il est apparu nécessaire de considérer la portée, notée R . Elle représente la profondeur maximale atteinte par le faisceau d'électron dans un milieu considéré. En pratique seule une fraction des électrons a une portée égale à leur parcours [6][11].

La relation empirique 1.4 de Katz et Penfold permet d'approcher cette valeur pour des β d'énergie E en MeV traversant un milieu de masse volumique ρ en $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$:

$$R(\mu\text{m}) = \frac{4120 \cdot E^n}{\rho} \quad (1.4)$$

avec

$$n = 1,265 - 0,0954 \ln E$$

Pour la plupart des électrons du Cobalt 60 dont l'énergie moyenne est de 0,106 MeV, la portée dans les tissus humains (de masse volumique $\rho \simeq 1$) est de l'ordre de 150 μm .

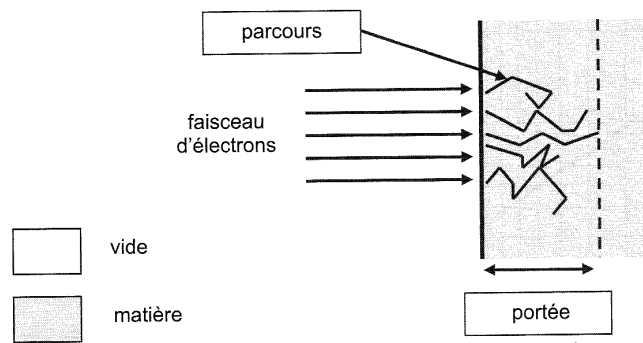


FIGURE 1.5 – Parcours et portée d'un faisceau d'électrons.

1.4 GRANDEURS UTILISÉES EN DOSIMÉTRIE INTERNE

1.4.1 Dose absorbée

Les rayonnements émis par les substances radioactives interagissent avec la matière en y cédant de l'énergie. La dose absorbée est alors définie comme la quantité d'énergie cédée par le rayonnement par unité de masse; elle s'exprime en Gray (Gy, soit $1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)

$$D = \frac{E}{m}$$

1.4.2 Dose équivalente

Cependant la dose absorbée seule ne permet pas de prédire l'intensité de l'effet biologique. En radiobiologie et en radiothérapie l'efficacité biologique relative (EBR) représente cette différence observée en fonction de différents facteurs comme le type de rayonnement, le débit de dose, le fractionnement, l'effet étudié...

En radioprotection, dans le cas des effets stochastiques à long terme, la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) a recommandé d'appliquer à la dose absorbée un facteur de pondération radiologique, W_R , caractéristique du rayonnement. W_R représente, de façon simplifiée, l'EBR pour les effets stochastiques à faible dose du rayonnement R [12].

Pour une même dose absorbée, la densité d'ionisations sera plus grande pour une particule α que pour un rayon γ . Les dommages causés par cette forte densité seront plus importants. C'est pourquoi la dose équivalente a été définie pour quantifier la dose reçue par un organe.

La dose équivalente H_T à l'organe ou au tissu T correspond à la dose moyenne absorbée dans cet organe $D_{T,R}$, exposé à un rayonnement R, pondéré par le facteur W_R relatif à la nature du rayonnement considéré, et est exprimé en Sievert (sievert) :

$$H_T = \sum_R W_R \cdot D_{T,R}$$

Les facteurs de pondération radiologique W_R , repris dans le tableau 1.1, ont été définis pour chaque type de rayonnement par la publication 30 de la CIPR [4], et révisés successivement par la CIPR 60 [13] et la CIPR 103 [14].

| Rayonnement | W_R |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| photons (y compris γ et rayon X) | 1 |
| électrons et muons | 1 |
| protons et pions chargés | 2 |
| neutrons | fonction continue selon l'énergie |
| particule α , fragments de fission, ions lourds | 20 |

TABLE 1.1 – Facteurs de pondération W_R pour chaque type de rayonnement.

1.4.3 Dose efficace

Elle exprime le risque pour l'organisme entier du fait d'une exposition aux rayonnements ionisants. Pour tenir compte de la sensibilité variable des tissus et organes aux rayonnements, la dose efficace – notée E – utilise un facteur W_T . Cette pondération reflète la sensibilité des tissus vis à vis du risque d'effets stochastiques induits par l'irradiation. Elle s'exprime en Sv :

$$E = \sum_T W_T \cdot H_T$$

$$E = \sum_T W_T \cdot \sum_R W_R \cdot D_{T,R}$$

La somme des facteurs de pondération tissulaire W_T , repris dans le tableau 1.2, est normalisée à 1 et leur valeur définie dans la publication 60 de la CIPR [13] révisée par la CIPR 103 [14].

Cette dose efficace est en général sommée pour les expositions de l'année d'incorporation, lors du suivi dosimétrique des travailleurs.

1.4.4 Dose efficace engagée

Contrairement à une exposition externe qui prend fin lorsque le sujet s'éloigne suffisamment de la source, l'irradiation interne continue jusqu'à décroissance complète des radionucléides retrouvés dans les tissus ou organes. La durée de rétention de la contamination dans l'organisme peut varier de quelques heures à plusieurs dizaines d'années. Pour prendre en compte l'ensemble du temps de résidence des radionucléides dans le corps, le concept de dose efficace engagée a été introduit. Son calcul nécessite l'utilisation de modèles biocinétiques.

†. Sont considérés ensemble : glandes surrénales, vésicule biliaire, cœur, reins, ganglions lymphatiques, muscles, muqueuse orale, pancréas, prostate (homme), intestin grêle, rate, thymus, utérus et ses annexes (femme), régions extra-thoraciques des voies respiratoires.

| Tissu ou organe | W_T - CIPR 60 | W_T - CIPR 103 |
|----------------------------|-----------------|------------------|
| gonades | 0,2 | 0,08 |
| glandes salivaires | non défini | 0,01 |
| œsophage | 0,05 | 0,04 |
| estomac | 0,12 | 0,12 |
| colon | 0,12 | 0,12 |
| poumons | 0,12 | 0,12 |
| vessie | 0,05 | 0,04 |
| sein | 0,05 | 0,12 |
| foie | 0,05 | 0,04 |
| thyroïde | 0,05 | 0,04 |
| peau | 0,01 | 0,01 |
| moelle osseuse (rouge) | 0,12 | 0,12 |
| surface des os | 0,01 | 0,01 |
| cerveau | non défini | 0,01 |
| autres tissus ou organes † | 0,05 | 0,12 |

TABLE 1.2 – Facteurs de pondération tissulaire W_T selon les Publications 60 et 103 de la CIPR.

La dose efficace engagée est calculée dès lors qu'il y a contamination interne avérée. En théorie, elle implique un passage systémique de la porte d'entrée vers le sang puis sa distribution vers les tissus ou organes cibles. Si l'individu exposé est un travailleur adulte, l'estimation de la dose efficace engagée est réalisée sur une durée de rétention de 50 ans, indépendamment de l'âge de l'agent. Elle est attribuée par anticipation dans son intégralité à la date de l'incorporation.

La dose efficace engagée est donc l'intégrale pendant 50 ans de la courbe de décroissance effective tenant compte des période biologique et radiologique.

$$E_{50} = \int_0^{50 \text{ ans}} E(t) \cdot dt$$

1.4.5 Les valeurs limites réglementaires d'exposition

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

- d'activités nucléaires soumises à un régime d'autorisation ou de déclaration, *i.e* installations nucléaires civiles et militaires, services de médecine nucléaire et laboratoires de recherche utilisant des traceurs radioactifs;
- de la présence sur le lieu de travail de radionucléides naturels non utilisés pour leurs propriétés radioactives (radon);
- de la présence de rayonnements cosmiques.

Les limites annuelles applicables en France sont définies dans les articles R.4451-12 et

13 du code du travail [15], rappelées dans le tableau 1.3 :

| | Corps entier (dose efficace) | Main, poignet, pied, cheville | Peau (dose équivalente sur tout cm ²) | Cristallin †(dose équivalente) |
|--------------------------|---------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| travailleur | 20 mSv | 500 mSv | 500 mSv | 150 mSv |
| travailleur 16-18 ans | 6 mSv | 150 mSv | 150 mSv | 45 mSv |

TABLE 1.3 – Valeurs limites d'exposition.

Les articles R.4451-11, 44 et 46 du code du travail précisent qu'à des fins de mise en place de la surveillance de l'exposition du travailleur, l'employeur procède à une analyse des postes de travail qui est renouvelée périodiquement et qui doit comprendre une étude dosimétrique de ces postes. Le travailleur susceptible de recevoir, dans les conditions habituelles de travail, une dose efficace supérieure à 6 mSv par an ou une dose équivalente supérieure aux 3/10^{es} des limites annuelles d'exposition est classé en catégorie A, sinon il est classé en catégorie B. Dès lors qu'il est classé, le travailleur bénéficie d'un suivi dosimétrique individuel et d'une surveillance médicale renforcée.

1.5 LES MODÈLES BIOCINÉTIQUE ET DOSIMÉTRIQUE ACTUELS

L'article 15 de l'arrêté du 17 juillet 2013 [1] relatif à la carte de suivi médical et au suivi dosimétrique des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants indique que « le médecin du travail, le cas échéant en ayant recours à l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), détermine la dose efficace engagée ou la dose équivalente engagée résultant de l'exposition interne du travailleur [...] » selon les modalités de calcul de l'arrêté du 1^{er} septembre 2003 [2].

L'arrêté du 1^{er} septembre 2003, définissant les modalités du calcul des doses efficaces et des doses équivalents résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants, rapporte en annexe première les règles de calcul de la dose efficace résultant d'une exposition externe et interne aux rayonnements ionisants ; en seconde annexe les définitions et méthodes utilisées pour le calcul de la dose efficace et de la dose équivalente résultant d'une exposition externe ; et enfin en troisième annexe les valeurs de dose efficace par unité d'incorporation (DPUI) de chaque radionucléide ingéré ou inhalé.

En cas d'exposition interne, l'estimation de l'activité incorporée puis de la dose engagée se fait en plusieurs étapes. En premier lieu, la réalisation de mesures sur le sujet et/ou ses excréta (urines et selles) permet de déterminer la nature du ou des radionucléide(s)

†. Un abaissement de la limite de dose au cristallin est attendu lors de la prochaine transposition en droit français de la directive 2013/59/EURATOM du 5 décembre 2013 fixant la limite de dose annuelle au cristallin à 20 mSv en moyenne sur 5 ans.

et leur activité. Ensuite en fonction du modèle biocinétique retenu, il est possible d'estimer l'activité incorporée à partir des activités qui ont été mesurées sur le sujet ou ses excréta. Finalement, il sera possible à partir de l'activité incorporée calculée d'estimer la dose engagée, en la multipliant par la valeur de la DPUI correspondante.

En cas d'incorporation par ingestion de Cobalt 60, la DPUI pour une forme oxyde (facteur d'absorption gastro-intestinale $f_1 = 5 \times 10^{-2}$) est de $2,5 \times 10^{-9} \text{ Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$. Ainsi un passage systémique de 5 % de l'activité incorporée est considéré comme ayant lieu lors au niveau de l'intestin grêle.

1.5.1 Rappel anatomique sur l'épithélium intestinal

La muqueuse intestinale de l'intestin grêle peut être décomposée en deux parties bien distinctes (figure 1.6) : les villosités, orientées vers la lumière intestinale, et les cryptes de Lieberkühn, orientée vers la couche musculaire. Cet épithélium concentre les fonctions de barrière intestinale, d'absorption des nutriments, eau, électrolytes et d'interface immunitaire.

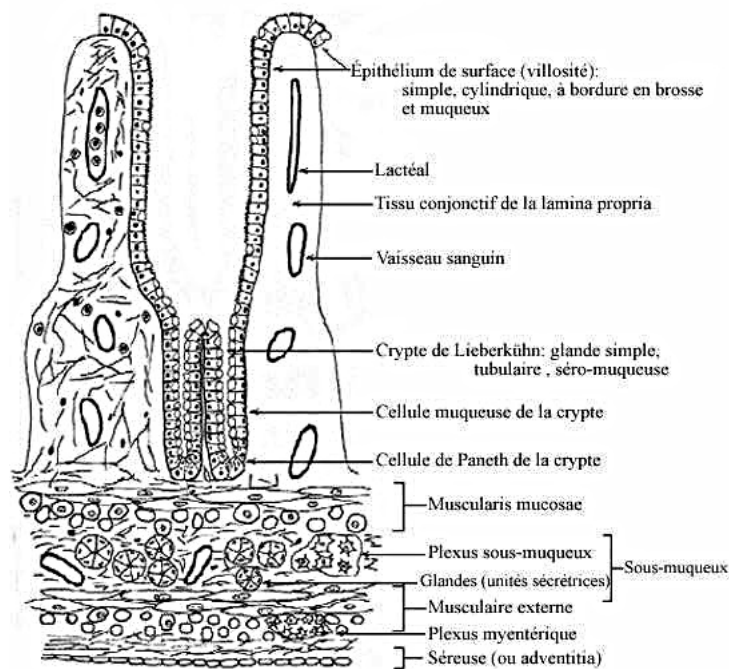


FIGURE 1.6 – Muqueuse intestinale.

Les villosités représentent le compartiment fonctionnel et différencié de la muqueuse intestinale. Elles constituent des expansions vers la lumière de l'intestin et sont tapissées d'un épithélium prismatique simple présentant quatre types cellulaires – des entérocytes, des cellules caliciformes, des cellules neuroendocrines et des cellules « M ».

Les cryptes de Lieberkühn sont des invaginations en doigts de gants vers la paroi musculaire. C'est au fond de chacune de ces cryptes que se trouvent une poignée de cellules

souches à l'origine de l'ensemble du renouvellement cellulaire. Par ailleurs les cryptes comportent aussi cinq types cellulaires différenciés : les entérocytes, les cellules caliciformes, neuroendocrines, de Paneth et « de transit ».

1.5.2 Modèle biocinétique digestif de la CIPR 30 (1979)

Le modèle biocinétique digestif de la CIPR 30 décrit le transport digestif et l'absorption sanguine des radionucléides ingérés (cf schéma 1.7).

Il a été élaboré plus spécialement pour le public pouvant être amené à consommer des aliments contaminés. L'incorporation digestive ne devrait normalement pas s'observer dans des conditions normales de travail car il est interdit de manger, boire et fumer en zone contrôlée d'une centrale nucléaire. En pratique, les contaminations observées chez les travailleurs officiant dans ces zones ne sont pas seulement cutanées ou respiratoires. Cela s'explique notamment par le fait que les particules inhalées les plus volumineuses, qui se déposent dans les voies aériennes supérieures, sont « remontées » vers l'œsophage par le mécanisme d'épuration muco-ciliaire et se voient finalement dégluties [4] [16].

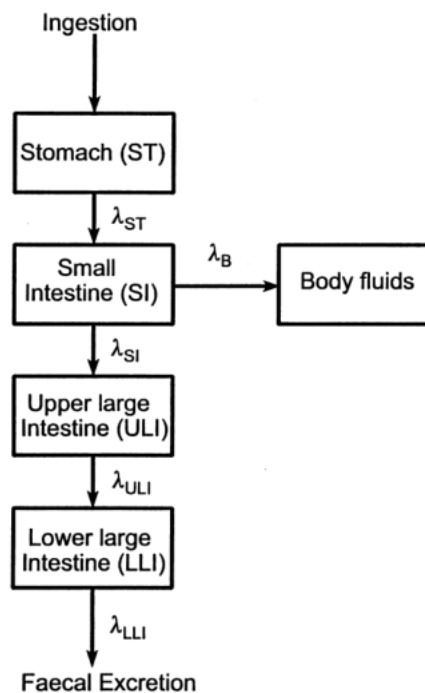


FIGURE 1.7 – Modèle biocinétique du tractus gastro-intestinal décrit dans la publication 30 de la CIPR.

La CIPR 30 considère quatre régions au sein du tractus gastro-intestinal (TGI) : l'estomac, l'intestin grêle, le colon ascendant et le colon descendant. Ce modèle considère le passage au niveau systémique des radioéléments comme n'ayant lieu qu'au niveau de l'intestin grêle. Une variable – le **facteur d'absorption gastro-intestinale** – notée f_1

et spécifique de chaque radioélément selon sa forme chimique, représente la fraction absorbée dans le sang.

Un temps moyen de séjour, indépendant du radionucléide ou de sa forme chimique, est associé à chaque région. Le facteur λ représente les fractions transportées par unité de temps. Les durées sont détaillées dans le tableau 1.4; le temps total de séjour au sein du TGI étant de 42 h.

| Régions du TGI | Temps de séjour (h) | fraction transférée par jour (j^{-1}) |
|------------------|---------------------|-------------------------------------------|
| estomac | 1 | 24 |
| intestin grêle | 4 | 6 |
| côlon ascendant | 13 | 1,8 |
| côlon descendant | 24 | 1 |

TABLE 1.4 – Temps moyen de séjour dans chaque région du TGI.

Cette modélisation du tube digestif considère que le passage de la barrière digestive dépend avant tout de la solubilité du radio-contaminant. Après ingestion, une fraction f_1 de l'activité ingérée franchit la barrière digestive pour passer dans le sang tandis que le reste est éliminé *via* les fèces. La valeur maximale de f_1 est égale à 1 pour les radionucléides de grande solubilité (iode, eau tritiée, chlore, césium...), alors que les valeurs minimales sont inférieures à 1×10^{-4} pour les moins solubles (oxydes de plutonium par exemple).

Les radionucléides ingérés sous forme insoluble ne traversent quasiment pas la barrière digestive. Au cours du transit du bol alimentaire, ils entraînent une irradiation préférentielle de l'appareil digestif qui dépend de l'énergie des rayonnements émis et du débit de dose. Le passage systémique est aussi dépendant de l'état de jeun de l'individu au moment de l'incorporation.

1.5.3 Modèle dosimétrique de la CIPR 78

Les premiers travaux sur l'absorption et la rétention du cobalt chez l'homme datent de 1972 [17] et se basent sur des examens anthroporadiométriques. Le développement de la scintigraphie a secondairement permis une observation plus fine de ces phénomènes [18].

Le cobalt n'est pas utilisé par le corps humain. Environ 50 % de la fraction passant dans le sang est ainsi rapidement excrété par l'organisme. 5 % sont captés par le foie, le cobalt a une certaine affinité pour cet organe. Ces 5 % se répartissent au sein de trois sous-compartiments à raison de 3 %, 1 % et 1 %. Leur période biologique respective est de 6 jours, 60 jours et 800 jours.

Les 45 % restants sont distribués uniformément dans le reste du corps. Ils sont regroupés au sein de trois autres sous-compartiments de périodes biologiques 6 jours, 60 jours et 800 jours.

Le tableau 1.5 reprend des données de la publication 78 de la CIPR [3] concernant la répartition du cobalt dans le corps humain après passage dans le sang :

| Compartiment | % de cobalt sanguin capté | Période biologique λ_{bio} (j) |
|-----------------|---------------------------|----------------------------------------|
| foie A | 3 | 6 |
| foie B | 1 | 60 |
| foie C | 1 | 800 |
| autres tissus A | 27 | 6 |
| autres tissus B | 9 | 60 |
| autres tissus C | 9 | 800 |

TABLE 1.5 – Répartition tissulaire du cobalt et périodes biologiques associées.

Le Cobalt 60 a une période radioactive $\lambda = 5,27$ ans et une période effective $\lambda_{eff} = 9,5$ jours. La période effective correspond au temps au bout duquel l'activité incorporée est divisée par deux du fait de la période radioactive et de la période biologique. Elle est donnée par la relation ci dessous :

$$\frac{1}{\lambda_{eff}} = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\lambda_{bio}} \quad (1.5)$$

Cependant pour ce radionucléide, la décroissance dans les compartiments ayant une période biologique de 800 jours se fait avec une période effective de 577 jours. Ainsi, schématiquement, après une incorporation de Cobalt 60, 10 % de l'activité absorbée via le sang s'élimine lentement de l'organisme avec une période effective d'un peu plus d'un an et demi.

La publication 78 de la CIPR fournit les courbes de rétention et d'excrétion pour la grande majorité des radionucléides rencontrés au cours de la surveillance des installations nucléaires de base (INB) par les service de médecine du travail. Elles représentent les valeurs prédictives de rétention de l'activité au niveau du corps entier et de l'activité excrétée par jour dans les urines et les fèces en fonction de l'activité incorporée. La figure 1.8 reprend les courbes de rétention et d'excrétion du Cobalt 60 ($f_1 = 5 \times 10^{-2}$). Elles sont applicables aux formes physico-chimiques insolubles du Cobalt 60 telles que les oxydes. Pour référence, le modèle dosimétrique détaillé de la CIPR pour le tractus gastro-intestinal est reproduit en annexe A.7 à A.11.

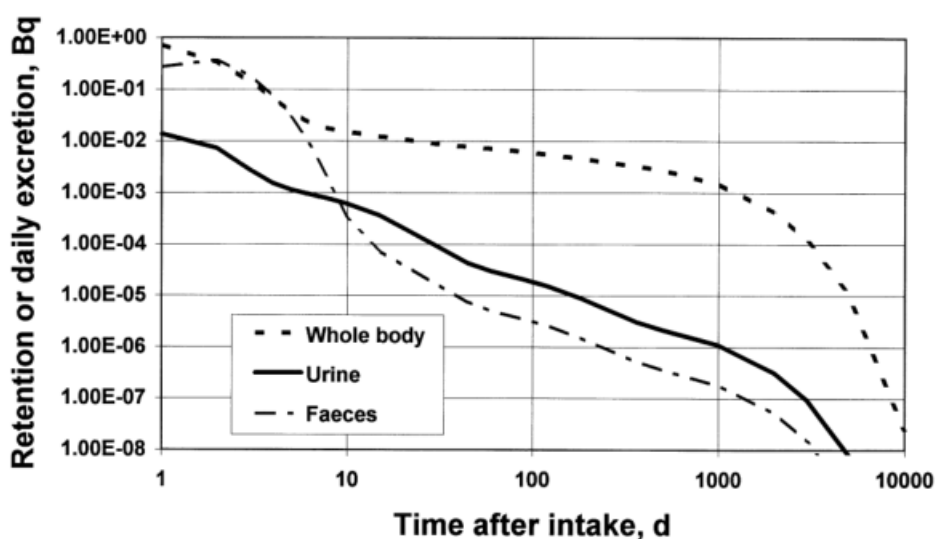


FIGURE 1.8 – Cobalt 60 (ingestion $f_1 = 5 \times 10^{-2}$) : valeurs prédictives (Bq par Bq incorporé) après incorporation aiguë.

1.6 LE MODÈLE BIOCINÉTIQUE DIGESTIF DE LA CIPR 100 (2006)

La publication numéro 100 [19] de la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR 100) a été publiée en 2006. Elle détaille un « nouveau » modèle biocinétique décrivant les processus physiologiques du transit gastro-intestinal et de l'absorption ayant lieu au sein du tractus (en anglais, *Human Alimentary Tract Model*, abrégé HATM par la suite). La CIPR 100 modélise plus finement le TGI comme le montre la figure 1.9 et comble une grande partie des lacunes [20] de la publication n°30 avec notamment :

- modélisation de compartiments non encore décrits par la CIPR 30 : cavité buccale et œsophage ;
- modélisation de nouvelles voies d'absorption et de sécrétion à partir d'autres compartiments corporels ;
- nouveau découpage fonctionnel du colon en accord avec les propriétés anatomophysiologiques : colon gauche, colon droit et rectosigmoïde en lieu et place des colon ascendant (en anglais *Upper Large intestine*, ULI) et descendant (en anglais *Lower Large Intestine*, LLI) ;
- description fine de la position anatomique des cellules radiosensibles et quantification de leur profondeur au sein des parois des différents compartiments ;
- affinement de la masse de ces cellules radiosensibles et de la fraction massique de l'énergie absorbée (en anglais *Specific Absorbed Fraction*, SAF) pour chaque compartiment ;
- prise en compte de l'énergie des rayons β pour le calcul du SAF ;
- nouvelles données sur les temps de transits en fonction de l'âge et du sexe ;

- prise en compte de la composition du bol alimentaire : solide, liquide et les deux ensemble ;
- prise en compte de la rétention sur les dents pour certains radioéléments (cadmium notamment, mercure, plutonium) et sur la paroi de l'intestin.

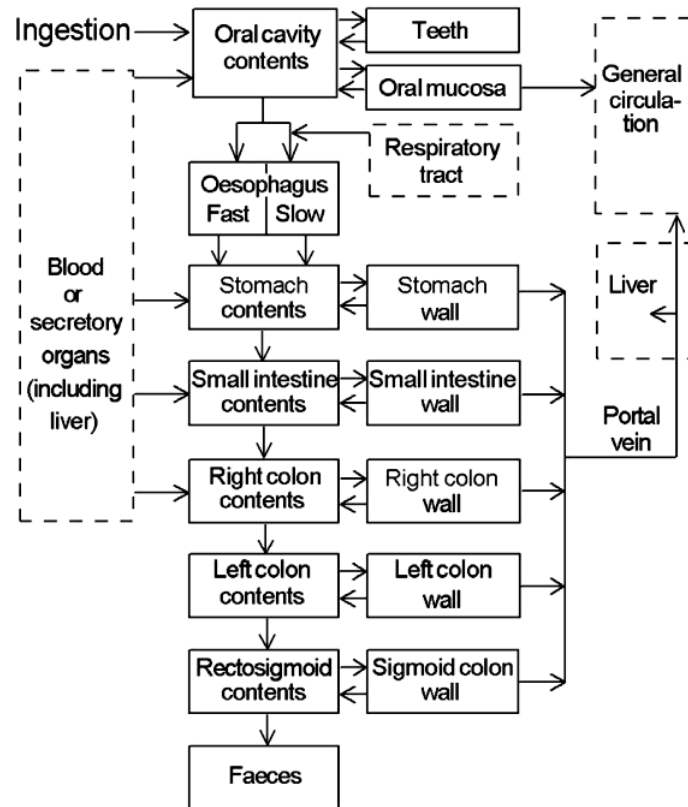


FIGURE 1.9 – Structure du tractus gastro-intestinal humain (HATM) selon la publication 100 de la CIPR.

La publication n°30 modélise les intestins comme un simple tube dans lequel circulent les aliments, ces derniers étant donc directement en contact avec les structures considérées radiosensibles. La CIPR 100, quant à elle, détaille plus finement la structure anatomique des intestins. Elle prend notamment en compte la composition cellulaire de la paroi en faisant le *distinguo* entre les cellules radiosensibles et celles ne l'étant pas. Toutes les régions tubulaires de l'HATM (œsophage, intestin grêle, colon et rectosigmoïdes) sont considérées comme des cylindres, avec une lumière, une couche de mucus, et une paroi comprenant les cellules dites « cibles » représentées par une couche continue à une profondeur définie. La couche de mucus et les villosités de l'intestin grêle ne sont cependant pas prises en compte pour le calcul du SAF.

Pour rappel, le SAF est défini comme la part de l'énergie d'une radiation émise au sein d'une région source qui est absorbée par unité de masse d'une région cible.

La figure 1.10 illustre la modélisation de l'intestin grêle et du colon. La figure 1.11 présente la section tubulaire de l'intestin en coupe frontale. Les villosités de l'intestin grêle

sont ainsi négligées dans ce modèle.

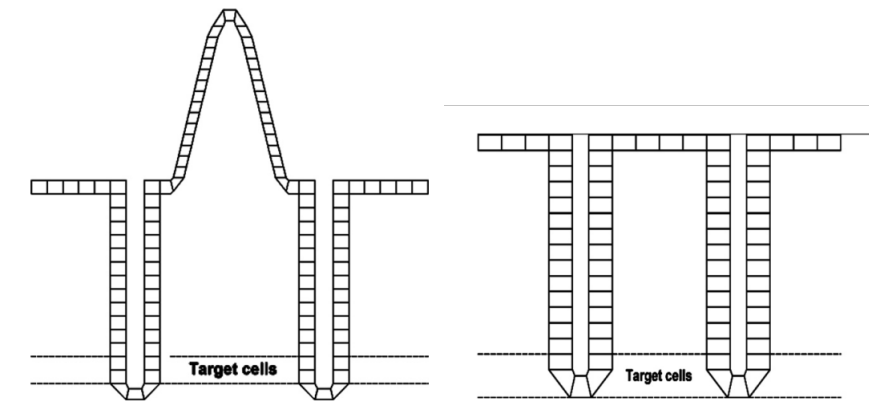


FIGURE 1.10 – Coupe sagittale des parois de l'intestin grêle (à gauche) et du colon (à droite), montrant la couche de cellules cibles au fond des cryptes, d'après la CIPR 100.

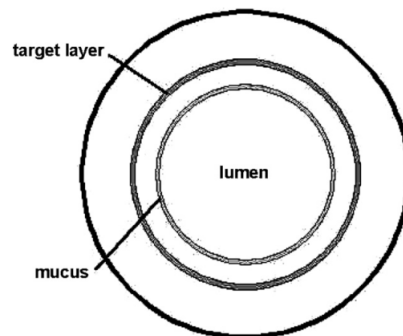


FIGURE 1.11 – Section de la géométrie des régions tubulaires de l'HATM selon la CIPR 100.

La profondeur de ces cellules d'intérêt pour la mesure des effets stochastiques à long terme est en effet un paramètre primordial. Le tableau 1.6 reprend certaines caractéristiques de la muqueuse intestinale telles que la profondeur par rapport à la lumière du tractus digestif ainsi que la masse des cellules cibles pour chaque région. Comme cela est détaillé en sous-section 1.3 page 27, la portée moyenne des électrons du Cobalt 60 est de l'ordre de 150 μm . Il apparaît donc que la majorité du rayonnement électronique émis par le Cobalt 60 n'attendrait pas les cellules souches de la cavité buccale, de l'œsophage, du colon et du rectosigmoïde. Seules régions encore concernées par cette radioactivité β , l'estomac et l'intestin grêle ne représentent qu'un cinquième environ du temps de transit total au sein du TGI. C'est à dire 5 heures et 10 minutes sur un total de 41 heures et 10 minutes chez l'homme adulte d'après le modèle de la CIPR 100.

| Région | Profondeur des cellules cibles (μm) | Masse des cellules cibles (g) |
|----------------|--------------------------------------------------|-------------------------------|
| cavité buccale | 190 – 200 | 0,23 |
| œsophage | 190 – 200 | 0,091 |
| estomac | 60 – 100 | 0,62 |
| intestin grêle | 130 – 150 | 3,6 |
| colon droit | 280 – 300 | 1,3 |
| colon gauche | 280 – 300 | 1,2 |
| rectosigmoïde | 280 – 300 | 0,73 |

TABLE 1.6 – Profondeurs et masses des cellules cibles pour chaque région du HATM chez l’homme adulte.

D’une manière plus générale, cela engendre des modifications importantes de la fraction massique de l’énergie absorbée (SAF) par les cellules cibles, occasionnée par le rayonnement β en fonction de son énergie.

La figure 1.12 compare la variation du SAF pour la région stomacale entre la CIPR 30 et la CIPR 100, en fonction de l’énergie des rayons β . Dans la CIPR 30, le SAF est considéré comme indépendant de la valeur de l’énergie des rayons β . Pour des énergies supérieures à environ 0,5 MeV le SAF du HATM est approximativement 25 % plus important que la valeur donnée par la CIPR 30 [4]. Pour l’énergie moyenne des électrons émis par le Cobalt 60 – $E_{\beta_{moy}} = 0,1 \text{ MeV}$ – le SAF du HATM ne représente que 20 % de la valeur du SAF de la CIPR 30 [19]. La relative similarité des valeurs de SAF pour les énergies modérées à fortes peuvent s’expliquer par la faible profondeur des cellules cibles dans l’estomac et par l’utilisation d’une masse de tissus similaire entre la CIPR 30 et l’HATM de la CIPR 100.

La figure 1.13 montre quant à elle la variation du SAF pour la région colique droite du HATM, chez l’homme adulte et la met en parallèle avec la région la plus similaire de la CIPR 30 : le colon ascendant abrégé ULI en anglais (*Upper Large Intestine*). Pour des énergies supérieures à 1 MeV, le SAF du HATM est environ cinq fois moins important que la valeur calculée par la CIPR 30. En dessous, la différence devient plus importante et tend vers zéro en deçà d’environ 0,25 MeV, du fait d’une énergie insuffisante pour que les électrons atteignent les cellules cibles (*cf supra*). Les valeurs supérieures du SAF de la CIPR 30 s’expliquent notamment par le fait que la modélisation considère la source comme directement au contact des cellules cibles de la muqueuse intestinale.

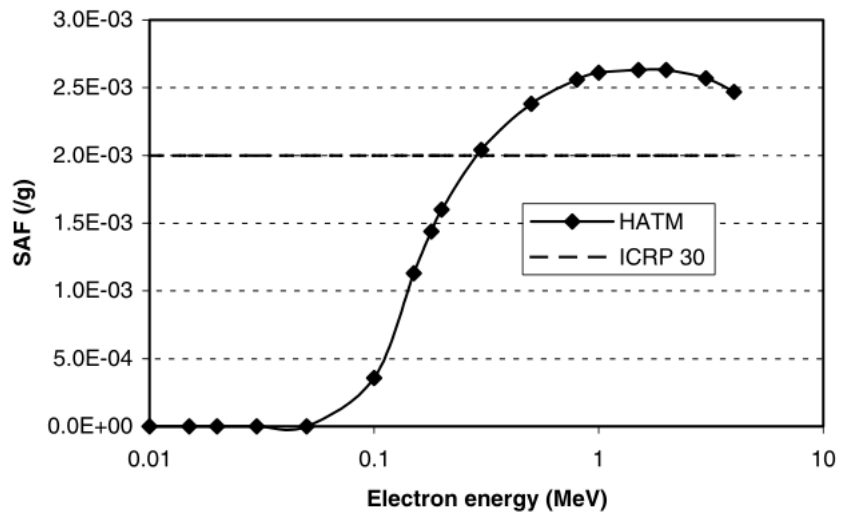


FIGURE 1.12 – Comparaison du SAF (*Specific Absorbed Fraction*) pour l'estomac entre la CIPR 30 et la CIPR 100 en fonction de l'énergie des électrons.

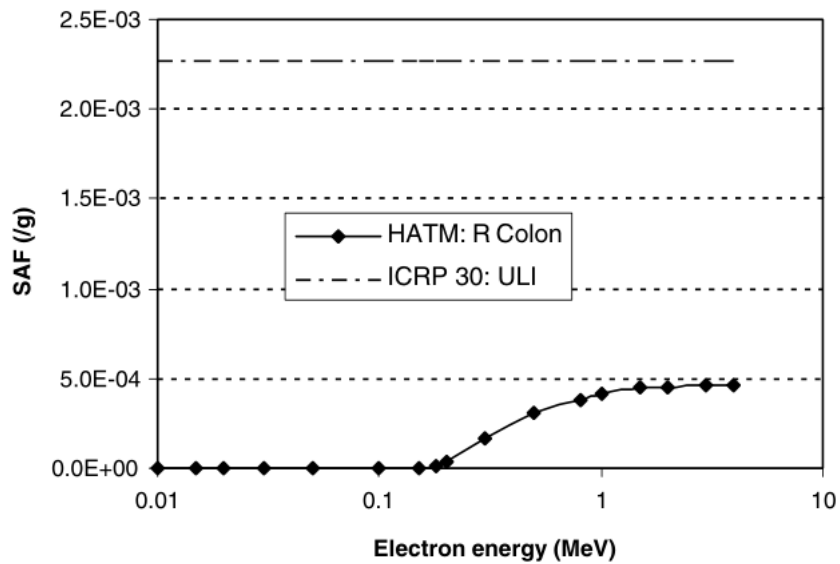


FIGURE 1.13 – Comparaison des valeurs du SAF entre la CIPR 30 (ULI) et la CIPR 100 (colon droit du HATM) en fonction de l'énergie des électrons.

Bien évidemment, le modèle biocinétique HATM de la CIPR 100, reflétant le facteur géométrique du tube digestif, ne peut être utilisé qu'en conjonction avec un modèle dosimétrique actualisé. En effet, comme exposé précédemment, la CIPR 30 est actuellement utilisée conjointement avec le modèle dosimétrique de la CIPR 78 pour aboutir aux formules permettant les calculs de dose efficace engagée. Un nouveau modèle dosimétrique tenant compte des nouveaux paramètres de la publication n°100 et des données les plus récentes de la sciences sur la biocinétique des radioéléments et de leur forme physique est donc nécessaire pour pouvoir profiter des avancées de la CIPR 100 en matière de calculs de doses.

1.7 Les publications n°133 et 134 de la CIPR

La modélisation de l'HATM a de nouveau été affiné en 2016 suite à la publication n°133 de la CIPR [21]. Elle détaille l'intégration des différents paramètres pour aboutir à la fraction spécifique absorbée (SAF) dans le cadre de l'estimation des calculs de dosimétrie interne. Par exemple, l'intestin grêle est modélisé par des cylindres adjacents afin de tenir compte de l'irradiation croisée pouvant avoir lieu en son sein (cf. figure 1.14).

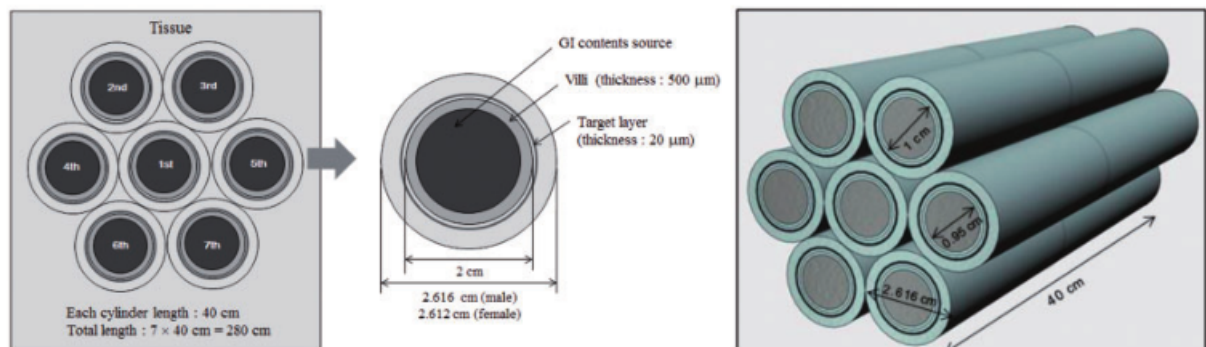


FIGURE 1.14 – Schéma du modèle « plissé » de l'intestin grêle utilisé pour prendre en compte l'irradiation croisée survenant depuis une autre partie de ce même intestin grêle (CIPR 133).

La dose efficace engagée délivrée au tube digestif par le rayonnement β du Cobalt 60 est probablement plus faible qu'escomptée initialement. Les incertitudes liées aux modèles sur lesquels sont basés les coefficients de dose efficace ont ainsi été développées par Leggett *et al.* en 2007 [22] [23].

Phipps *et al.* [24] ont estimé que les coefficients de dose effective (*i.e.* DPUI) seraient pour certains radionucléides (comprenant le Cobalt 60) de 25 % à 50 % moindre que les valeurs actuellement recommandées.

Très récemment, en 2016, est sortie la publication n°134 de la CIPR [25]. Intitulée « *Occupational intakes of radionuclides : part 2* » et faisant directement suite à la CIPR 130

[26] de 2015, elle actualise certaines données dosimétriques concernant une seconde frange de radionucléides. Cette révision n'est possible que suite à la reprise exhaustive des connaissances et avancés de la Science. En effet, une nouvelle valeur de dose efficace engagée par unité d'incorporation (DPUI) est précisée pour les oxydes insolubles de Cobalt 60. Ainsi lors de contaminations survenant sur un mode digestif, la DPUI selon la CIPR 134 est égale à $2,1 \times 10^{-9} \text{ Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$.

Cette valeur correspond à une diminution de 16 % soit environ un sixième de la DPUI actuellement retenue par l'arrêté du 1^{er} septembre 2003 [2] ($2,5 \times 10^{-9} \text{ Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$). La valeur du f_1 étant là encore fixée à 5×10^{-2} , cette diminution peut probablement être en lien avec la diminution du SAF pour l'essentiel du tractus gastro-intestinal, à l'exception notable de l'intestin grêle (*cf. supra*).

MATÉRIEL ET MÉTHODE

Sommaire

| | | |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 | MATÉRIEL | 43 |
| 2.1.1 | Critères d'inclusion | 43 |
| 2.1.2 | Liste des cas | 44 |
| 2.2 | MÉTHODE | 47 |
| 2.2.1 | Démonstration du mode d'incorporation digestif | 47 |
| 2.2.2 | Démonstration de l'absence de cohérence avec le modèle digestif | 47 |
| 2.2.3 | Estimation du facteur d'absorption gastro-intestinale | 50 |
| 2.2.4 | Calcul du coefficient de dose lorsque le facteur d'absorption gastro-intestinale est proche de zéro | 53 |

2.1 MATÉRIEL

2.1.1 Critères d'inclusion

Nous avons étudié les cas de contamination survenus au CNPE du BLAYAIS depuis les cinq dernières années et susceptibles de correspondre à une contamination interne digestive par un gratton de Cobalt 60. Les services médicaux des autres CNPE ont également été sollicités pour nous communiquer leurs cas de contamination interne.

Les critères d'inclusion étaient :

- une contamination liée principalement à une particule de Cobalt 60, si possible sans autre radionucléide associé;
- une activité initiale en Cobalt 60 à l'anthropogammamétrie (ATP) ≥ 2000 Bq;
- une disparition rapide et complète de l'activité sur les mesures anthropogammamétrique en moins de 4 jours;
- la réalisation d'analyses radiotoxicologiques des urines et des selles (critère non indispensable car non réalisées systématiquement).

2.1.2 Liste des cas

Nous avons pu étudier 14 cas de contamination, dont 5 ont fait l'objet d'analyses radiotoxicologiques urinaires, et dont les différents paramètres sont exposés ci-dessous puis repris dans le tableau 2.1.

- Cas 1° au CNPE du BLAYAIS : incorporation d'un gratton de Cobalt 60 ayant une activité initiale à l'ATP estimée entre 24 000 Bq et 39 000 Bq. Les selles et urines ont été recueillies pour examens radiotoxicologiques en laboratoire d'analyses médicales (LAM) spécialisé. L'ATP des selles recueillies dans la nuit de J2 à J3 retrouvait l'ensemble de l'activité mesurée jusqu'alors. L'ATP de l'agent à J4 ne retrouvait plus aucune trace de Cobalt 60. Les radiotoxicologies urinaires sont toutes revenues inférieures à la limite de détection ;
- Cas 2° au CNPE de CHINON : incorporation d'un gratton de Cobalt 60 ayant une activité initiale à l'ATP estimée entre 563 000 Bq et 380 000 Bq. Les selles et urines ont été recueillies pour examens radiotoxicologiques en LAM. L'ATP de la 3^e selle récupérée à J1 retrouvait l'ensemble de l'activité mesurée jusqu'alors. Les ATP de l'agent entre J1 et J4 ne trouvaient plus aucune trace de Cobalt 60. Les radiotoxicologies urinaires étaient inférieures à la limite de détection ;
- Cas 3° au CNPE de DAMPIERRE : incorporation d'un gratton de Cobalt 60 ayant une activité initiale à l'ATP estimée à 20 000 Bq. Les selles et urines ont été recueillies pour examens radiotoxicologiques. L'ATP des selles récupérées à J1 retrouvait l'ensemble de l'activité mesurée jusqu'alors. Par la suite, les ATP de l'agent ne trouvaient plus aucune trace de Cobalt 60. Les radiotoxicologies urinaires sont revenues inférieures à la limite de détection ;
- Cas 4° au CNPE de GRAVELINES : contamination mixte avec initialement une activité mesurée à 6500 Bq de Cobalt 60 et 1500 Bq de Manganèse 54*. Les selles et urines ont été recueillies pour examens radiotoxicologiques. Les ATP de contrôle de l'agent à partir de J1 ne trouvaient plus aucune activité mesurable. L'analyse des matières fécales recueillies à J1 retournaient 2770 Bq de Cobalt 60 et 309 Bq de Manganèse 54. Les selles de J2 présentaient encore une activité qui avait cependant décru d'un facteur 10. Les selles suivantes et les radiotoxicologies urinaires étaient toutes inférieures à la limite de détection ;

*. Abrégé ⁵⁴Mn.

- Cas 5° au CNPE de BUGEY : incorporation de 640 Bq de Zirconium 95[†] et d'un gratton estimé à 2400 Bq de Cobalt 60. Des prélèvements urinaires et fécaux ont été réalisés. La radiotoxicologie urinaire retrouvait 1,6 Bq tandis que la quasi intégralité de l'activité en Cobalt 60 était retrouvée dans les selles (séquentiellement 744 Bq puis 372 Bq). Les mesures ATP étaient inférieures à la limite de détection à partir de J1 ;
- Cas 6° au CNPE de BUGEY : incorporation de 190 Bq de Zirconium 95 et d'un gratton d'environ 8100 Bq de Cobalt 60 sur les mesures ATP initiales. Pas de prélèvement urinaire ou fécal effectué. Disparition rapide et complète de l'activité à J3 ;
- Cas 7° au CNPE du BLAYAIS : incorporation d'un gratton d'environ 2000 Bq de Cobalt 60 et de 740 Bq de Cobalt 58 sur les mesures ATP initiales. Pas de prélèvement urinaire ou fécal effectué. Disparition rapide et complète de l'activité à J4 ;
- Cas 8° au CNPE du BLAYAIS : incorporation d'un gratton de 2900 Bq de Cobalt 60 sur les mesures ATP initiales. Pas de prélèvement urinaire ou fécal effectué. Disparition rapide et complète de l'activité à J3 ;
- Cas 9° au CNPE du BLAYAIS : incorporation d'un gratton d'environ 2300 Bq de Cobalt 60 et de 930 Bq de Cobalt 58 sur les mesures ATP initiales. Pas de prélèvement urinaire ou fécal effectué. Disparition rapide et complète de l'activité à J1 ;
- Cas 10° au CNPE du BLAYAIS : incorporation d'un gratton estimé entre 10 000 Bq et 30 000 Bq de Cobalt 60 sur les mesures ATP initiales, avec une grande variabilité entre les mesures. L'agent a refusé pour raisons personnelles la réalisation des prélèvements urinaires et de selles. Disparition rapide et complète de l'activité corps entier à J4 ;
- Cas 11° au CNPE du BLAYAIS : incorporation d'un gratton de 5600 Bq de Cobalt 60 sur les mesures ATP initiales. Pas de prélèvement urinaire ou fécal effectué. Disparition rapide et complète de l'activité à J2 ;
- Cas 12° au CNPE du BLAYAIS : incorporation d'un gratton de Cobalt 60 d'activité estimée entre 2600 Bq et 4100 Bq sur les mesures ATP initiales. Pas de prélèvement urinaire ou fécal effectué. Disparition rapide et complète de l'activité à J3 ;
- Cas 13° au CNPE du BLAYAIS : incorporation d'un gratton de 2300 Bq de Cobalt 60 sur les mesures ATP initiales. Pas de prélèvement urinaire ou fécal effectué. Disparition rapide et complète de l'activité à J1 ;

†. Abrégé ⁹⁵Zr.

- Cas 14° au CNPE du BLAYAIS : incorporation d'un gratton de Cobalt 60 d'activité estimée entre 4300 Bq et 8500 Bq sur les mesures ATP initiales. Seuls des prélèvements de selles ont été réalisés pour examens radiotoxicologiques. Disparition complète de l'activité sur les mesures ATP à J4. La quasi totalité de l'activité en Cobalt 60 était retrouvée dans les selles (séquentiellement 923 Bq puis 441 Bq et enfin 434 Bq).

| Cas | Contamination ⁶⁰ Co seul | Activité initiale (Bq) | Disparition activité avant J4 | Analyses radiotoxicologiques |
|-----|-------------------------------------|------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 1 | oui | 39 000 | oui | oui |
| 2 | oui | 380 000 – 563 000 | oui (J1) | oui |
| 3 | oui | 20 000 | oui (J1) | oui |
| 4 | non (1500 Bq de ⁵⁴ Mn) | 6500 | oui (J1) | oui |
| 5 | non (636 Bq de ⁹⁵ Zr) | 2372 – 2900 | oui (J1) | oui |
| 6 | non (188 Bq de ⁹⁵ Zr) | 8082 | oui (J3) | non |
| 7 | non (734 Bq de ⁵⁸ Co) | 2000 | oui | non |
| 8 | oui | 2900 | oui (J3) | non |
| 9 | non (930 Bq de ⁵⁸ Co) | 2300 | oui (J1) | non |
| 10 | oui | 10 000 – 30 000 | oui | non |
| 11 | oui | 5575 | oui (J2) | non |
| 12 | oui | 2581 – 4064 | oui (J3) | non |
| 13 | oui | 2300 | oui (J1) | non |
| 14 | oui | 4300 – 8500 | oui | oui (selles) |

TABLE 2.1 – Caractéristiques des cas.

2.2 MÉTHODE

2.2.1 Démonstration du mode d'incorporation digestif

Les appareils de mesure comportent deux détecteurs, un détecteur haut situé en face des poumons et un détecteur bas situé au niveau de l'abdomen. Lorsque le mode d'incorporation est l'inhalation, l'activité mesurée quelques heures après la contamination est plus élevée sur le détecteur haut; lorsqu'il s'agit d'une ingestion, l'activité est plus importante sur le détecteur bas. Par ailleurs, si plusieurs mesures sont réalisées de façon rapprochée, une variation importante de l'activité mesurée ne peut s'expliquer que par une modification rapide de la géométrie de comptage liée au transit du gratton dans le tube digestif.

Lorsque ces deux paramètres – activité majoritairement détectée sur le capteur bas le jour de l'incorporation et variation importante de l'activité – sont réunis, l'incorporation digestive d'une particule chaude est très probable. La démonstration est en toute rigueur confirmée par les mesures ATP qui montrent la disparition de l'activité en deux à trois jours et par les analyses radiotoxicologiques qui confirment l'élimination totale de l'activité *via* les selles.

2.2.2 Démonstration de l'absence de cohérence avec le modèle digestif

L'apport principal de l'analyse des mesures ATP est l'étude de la cohérence des résultats des mesures avec les activités prévues par le modèle biocinétique de la CIPR. Cette étude de cohérence est faite en incluant les analyses radiotoxicologiques des urines et des selles lorsqu'elles ont été réalisées.

La cohérence peut être validée par trois méthode :

- 1° la première méthode, la plus simple, consiste à comparer les estimations de l'activité incorporée obtenues à partir de chaque résultat de mesure. La cohérence est jugée acceptable lorsqu'il n'existe pas plus d'un facteur trois entre les différentes estimations (R61) [27]. Si le rapport est supérieur à trois, la cohérence des activités mesurées avec le modèle ingestion ne peut être validée. L'activité incorporée est calculée en divisant les mesures par le facteur de rétention ou d'excrétion correspondant de la CIPR 78 [3]. Les valeurs de J1 à J5 – pour le Cobalt 60, $f_1 = 5 \times 10^{-2}$ (oxydes), modèle ingestion – ont été reportées pour information dans le tableau 2.2. Si le résultat de la mesure est inférieure à la limite de détection (LD), le calcul est fait en utilisant une valeur égale à la moitié de la LD (R51) [27]. La limite de détection de l'examen ATP pour le Cobalt 60 est de 300 Bq.

| | J1 | J2 | J3 | J4 | J5 |
|--------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| ATP | $7,1 \times 10^{-1}$ | $3,4 \times 10^{-1}$ | $1,5 \times 10^{-1}$ | $6,8 \times 10^{-2}$ | $3,7 \times 10^{-2}$ |
| urines | $1,4 \times 10^{-2}$ | $7,3 \times 10^{-3}$ | $2,8 \times 10^{-3}$ | $1,5 \times 10^{-3}$ | $1,1 \times 10^{-3}$ |
| selles | $2,7 \times 10^{-1}$ | $3,7 \times 10^{-1}$ | $1,9 \times 10^{-1}$ | $7,7 \times 10^{-2}$ | $3,0 \times 10^{-2}$ |

TABLE 2.2 – Facteurs de rétention et d'excrétion pour le Cobalt 60, $f_1 = 5 \times 10^{-2}$, en Bq par Bq ingéré.

- 2° La deuxième méthode, lorsque l'on dispose d'un outil de calcul informatique, consiste à estimer la cohérence sur l'aspect visuel d'un graphique montrant les activités mesurées et celles prévues par le modèle. Il est recommandé de ne pas retenir le modèle si le tracé graphique de sa prévision apparaît incohérent avec les valeurs de mesure à l'œil de l'expert [27]. La figure 2.1 obtenu à l'aide du logiciel CADOR[‡] [28] d'EDF illustre l'utilité des outils informatiques de calcul pour juger de la cohérence des mesures avec le modèle théorique (courbe rouge).

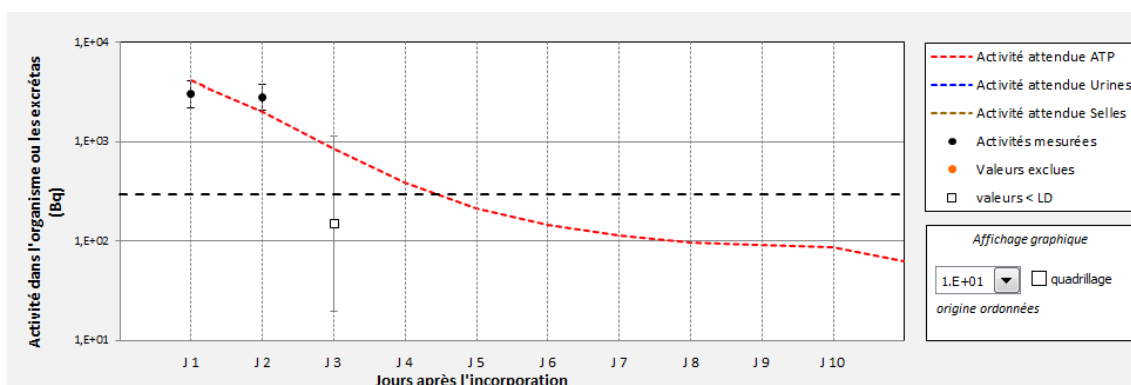


FIGURE 2.1 – Graphique obtenu avec le logiciel CADOR pour évaluation de la cohérence du modèle.

- 3° La troisième méthode, la plus précise, fait suite aux recommandations IDEAS de l'European Radiation Dosimetry Group (IDEAS *guidelines*, EURADOS) [29] afin d'harmoniser les pratiques d'estimation de la dose efficace engagée à partir des données recueillies lors de la surveillance des travailleurs. Elle consiste à réaliser un test du khi².

‡. Calcul Dosimétrie Réglementaire.

Principe du test du khi²

Plus les écarts entre les valeurs mesurées et les valeurs données par le modèle sont élevés, moins il y a de chance pour que le modèle corresponde à la série de mesure. Le test du khi² permet d'affirmer que l'hypothèse de la cohérence entre les mesures et le modèle est fautive et doit être rejetée. Les tables statistiques donnent une valeur appelée khi² théorique qui représente la valeur maximale permise des écarts entre les mesures et les valeurs prévues par le modèle. La valeur du khi² théorique dépend du nombre de degrés de liberté – égal au nombre de mesures réalisées moins une – et du risque α , dit de première espèce, correspondant au risque de rejeter l'hypothèse de cohérence alors qu'elle est vraie. Habituellement ce risque α est défini à 5 %.

Le khi² calculé est obtenu par l'équation 2.1 en faisant la somme des écarts observés entre les mesures et les valeurs prévues par le modèle. Chaque écart est divisé par l'incertitude associée à la mesure. Par conséquent si les incertitudes de mesures sont élevées, le khi² calculé diminue, si elles sont faibles c'est l'inverse. Lorsque le khi² calculé est supérieur au théorique, l'hypothèse est rejetée. Dans le cas contraire l'hypothèse est retenue. Cela ne signifie pas pour autant que les mesures correspondent forcément au modèle, mais seulement qu'elles sont en accord aux incertitudes de mesure près. Plus la valeur du khi² calculé est proche de zéro, plus il y a de chances que les mesures correspondent effectivement au modèle.

$$\chi_o^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\ln(M_i) - \ln[I \cdot m(t_i)]}{\ln(SF_i)} \right)^2 \quad (2.1)$$

avec M_i l'activité mesurée, I l'activité incorporée, $m(t_i)$ le facteur de rétention ou d'excrétion au temps t , SF_i le facteur de dispersion de la mesure.

Incertitudes de mesure

La formule de calcul du khi² nécessite de connaître les incertitudes de mesure. Le guide IDEAS distingue les incertitudes de type A et celles de type B. Les incertitudes de type A sont liées à la statistique de comptage et sont décrites par une loi de Poisson. Les incertitudes de type B sont tous les autres facteurs d'incertitude – i.e. variation de la position du corps, variation de morphologie, bruit de fond, incertitude liée à l'étalonnage, prélèvements des excréta – qui se caractérisent par une distribution log-normale.

Lorsque les mesures effectuées sont bien supérieures à la limite de détection de l'ATP, les incertitudes de type A sont alors négligeables et l'incertitude totale peut être décrite par une distribution log-normale. Elle est alors quantifiée à l'aide de l'écart type géométrique, appelé facteur de dispersion (SF pour *scattering factor*). Le guide propose des valeurs pour les SFA et les SFB, correspondant aux incertitudes de type A et B, à partir de la dispersion habituellement observée sur les différents types d'analyse. Le SF

total peut être calculé à partir des facteurs de dispersion – noté SF_i – de chaque facteur d'incertitude à l'aide de la relation 2.2.

$$SF = \exp \left[\sqrt{\sum_i \ln^2(SF_i)} \right] \quad (2.2)$$

Les recommandations IDEAS procurent les valeurs du SF total pour les différents types de mesures :

- 1,2 pour les mesures ATP > 100 keV;
- 1,1 pour les analyses urinaires de 24h;
- 3 pour les analyses des selles des 24h.

Si la distribution est de type log-normale, pour un résultat de mesure égal à M , l'intervalle de confiance à 95 % correspondant est $IC_{95\%} = \left[\frac{M}{SF^2}; M \cdot SF^2 \right]$.

Utilisation des mesures inférieures à la limite de détection

Les mesures dont le résultat est inférieur à la limite de détection peuvent être utilisées pour le test du χ^2 (section 2.2.2 page 47). Le facteur de dispersion pour les mesures inférieures à la LD a été calculé en considérant que l'incertitude sur la statistique de comptage est de 50 %, ce qui correspond à un SFA égal à 1,65.

Les valeurs du SF total pour les différents types de mesures lorsqu'elles sont inférieures à la limite de détection :

- 1,68 pour les mesures ATP;
- 1,66 pour les analyses urinaires (urines de 24h);
- 2,35 pour les analyses des selles (selles de 72h).

Pour le Cobalt 60, la LD pour les mesures ATP est de 300 Bq, une valeur de 150 Bq a donc été retenue pour l'étude de cohérence. Ainsi, lorsqu'une mesure ATP est inférieure à la LD, on admet que la valeur vraie se situe, avec une probabilité de 95 %, dans un intervalle situé entre 53 Bq et 423 Bq, soit $IC_{95\%} = [53; 423]$.

2.2.3 Estimation du facteur d'absorption gastro-intestinale

Suivi de l'activité de l'organisme entier

La diminution rapide en dessous de la limite de détection de l'activité mesurée à l'examen anthropogammamétrique, indique un facteur d'absorption gastro-intestinale f_1 plus faible que celui prévu par le modèle biocinétique pour les oxydes ($f_1 = 5 \times 10^{-2}$) [3]. Le calcul du facteur d'absorption pourrait être fait à partir du ratio entre les activités dans l'organisme entier mesurées et prévues par le modèle, mais cela nécessite une correction complexe pour tenir compte de l'activité présente dans le tube digestif les premiers jours suivant l'incorporation. En conséquence nous ne l'avons pas retenu.

Suivi de l'activité excrétée dans les selles

La comparaison de l'activité incorporée et de l'activité excrétée dans les selles les trois premiers jours suivant l'incorporation pourrait paraître un moyen simple d'estimer le facteur d'absorption gastro-intestinale. C'est à dire que si le facteur d'absorption gastro-intestinale est de 5 %, l'activité retrouvée dans les selles devrait être inférieure de 5 % à l'activité incorporée. Cependant cette fraction est largement couverte par les incertitudes de mesure. De plus l'estimation de l'activité incorporée n'est pas fiable dans le cas particulier d'une source ponctuelle dans le tractus gastro-intestinal en raison des variations de la géométrie de comptage liées au transit du gratton. Là aussi nous ne pouvons retenir cette méthode pour le calcul du facteur d'absorption.

Suivi de l'activité excrétée dans les urines

Le facteur d'absorption gastro-intestinale peut être estimé à partir de l'activité excrétée dans les urines (M_i). En effet, l'activité excrétée dans les urines ne provient que de l'activité incorporée (I). Si le facteur d'absorption gastro-intestinale est nul, l'activité excrétée dans les urines est nulle. Par ailleurs, quelque soit le jour de recueil des urines, le rapport entre les fractions excrétées ($m(t_i)$) données dans les tableaux de la publication 78 de la CIPR [3] pour les différentes formes chimiques – tous composés et oxydes – est égal au rapport des facteurs d'absorption gastro-intestinale comme le montre le tableau 2.3 ci dessous.

| | f_1 | $m(t_{J1})$ | $m(t_{J3})$ | $m(t_{J5})$ | $m(t_{J7})$ | $m(t_{J10})$ |
|-------------------------|--------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Toutes formes chimiques | 1×10^{-1} | $2,8 \times 10^{-2}$ | $5,5 \times 10^{-3}$ | $2,3 \times 10^{-3}$ | $1,7 \times 10^{-3}$ | $1,2 \times 10^{-3}$ |
| Oxydes insolubles | 5×10^{-2} | $1,4 \times 10^{-2}$ | $2,8 \times 10^{-3}$ | $1,1 \times 10^{-3}$ | $8,4 \times 10^{-4}$ | $6,1 \times 10^{-4}$ |
| rapport | 2 | 2 | 2 | 2,1 | 2 | 2 |

TABLE 2.3 – Rapports des facteurs d'absorption gastro-intestinale et d'excrétion urinaire du Cobalt 60, à J1, J3, J5, J7 et J10.

Il est donc possible pour chaque jour J_i d'établir une relation linéaire $f_1 = a \cdot m(t_i)$ entre le facteur d'absorption gastro-intestinale f_1 et le facteur d'excrétion urinaire $m(t_i)$ (cf. figure 2.2 p.52).

Pour J1 la relation est :

$$f_1 = 3,57 \cdot m(t_i)$$

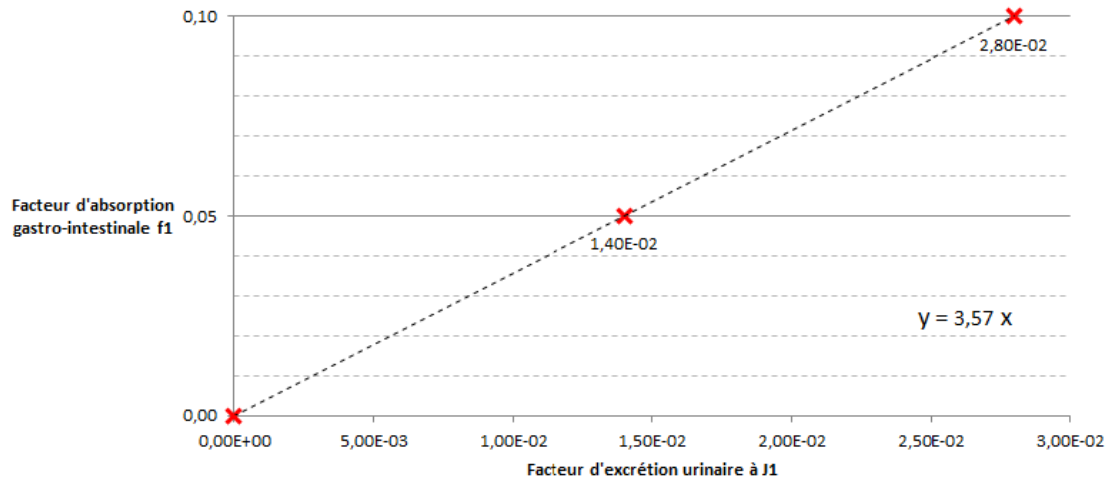


FIGURE 2.2 – Relation entre le facteur d'absorption gastro-intestinale et le facteur d'excrétion urinaire à J1.

Si pour une activité incorporée I , l'activité M_{J1} excrétée dans les urines à J1 est plus faible que celle prévue par le modèle, nous pouvons calculer la fraction réellement excrétée :

$$m(t_{J1}) = \frac{M_{J1}}{I}$$

Et nous pouvons en déduire expérimentalement le facteur d'absorption gastro-intestinale à l'aide de la relation précédente qui devient :

$$f_1 = \frac{3,57 \cdot M_{J1}}{I} \quad (2.3)$$

La limite de détection dans les mesures urinaires est de 1 Bq pour le Cobalt 60. Lorsque l'activité mesurée dans les urines à J1 est inférieure à la LD, une valeur égale à la moitié de la LD (et non une valeur nulle) est retenue pour le calcul, conformément à la recommandation 51 du guide IDEAS [29], soit 0,5 Bq.

Par conséquent lorsque aucune activité n'est retrouvée dans les urines, la formule nous donne :

$$f_1 = \frac{3,57 \times 0,5}{I} = \frac{1,785}{I}$$

Lorsque l'activité de la particule chaude est très élevée – plusieurs centaines de kBq – l'absence d'activité détectable dans les urines indique que le facteur f_1 tend vers zéro. Dans ce cas, la meilleure estimation de l'activité incorporée est donnée par l'activité de la particule chaude si elle a été récupérée dans les selles ($M_{gratton} \approx I$), bien que cela ne change pas significativement la valeur du facteur f_1 ainsi calculé.

2.2.4 Calcul du coefficient de dose lorsque le facteur d'absorption gastro-intestinale est proche de zéro

L'activité incorporée I se répartit entre l'activité qui transite dans le tube digestif et la fraction absorbée f_1 qui passe au niveau sanguin.

L'activité qui passe dans le sang est égale à $I \cdot f_1$; celle qui transite dans le tube digestif est égale à $I \cdot (1 - f_1)$.

La dose efficace engagée étant déterminée par la relation $E_{50} = I \cdot DPUI$, nous obtenons la formule suivante dans laquelle b et c sont deux constantes :

$$DPUI = b \cdot (1 - f_1) + c \cdot f_1$$

En posant $a = c - b$, nous constatons que la DPUI est une fonction affine du facteur d'absorption gastro-intestinale :

$$DPUI = a \cdot f_1 + b \tag{2.4}$$

Nous avons calculé les valeurs de a et b à l'aide des valeurs de f_1 publiées dans la CIPR 78 [3]. Pour $f_1 = 1 \times 10^{-1}$ la DPUI vaut $3,4 \times 10^{-9} \text{ Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$ tandis que pour $f_1 = 5 \times 10^{-2}$ la DPUI vaut $2,5 \times 10^{-9} \text{ Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$.

RÉSULTATS

Sommaire

| | | |
|-----|--------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1 | MODE D'INCORPORATION | 55 |
| 3.2 | ANALYSE DE COHÉRENCE AVEC LE MODÈLE | 56 |
| 3.3 | CALCUL DU FACTEUR D'ABSORPTION GASTRO-INTESTINALE EXPÉRIMENTAL | 59 |
| 3.4 | CALCUL DU FACTEUR DE DOSE LORSQUÉ f_1 EST PROCHE DE ZÉRO | 60 |

3.1 MODE D'INCORPORATION

Une synthèse des caractéristiques des mesures anthropogammamétriques (ATP) initialement effectuées est présentée dans le tableau 3.1 ci dessous.

| Cas | Activité détecteur bas > détecteur haut ? | Variation importante de l'activité ? | Source ponctuelle dans le tube digestif ? |
|-----|-------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------|
| 1 | oui | oui | probable |
| 2 | oui | oui | probable |
| 3 | n.c. * | n.c. | probable (disparition à J1) |
| 4 | n.c. | n.c. | probable (disparition à J1) |
| 5 | n.c. | oui | probable |
| 6 | oui | oui | probable |
| 7 | n.c. | oui | probable (disparition à J3) |
| 8 | n.c. | oui | probable (disparition à J3) |
| 9 | n.c. | n.c. | probable (disparition à J1) |
| 10 | oui | oui | probable |
| 11 | oui | oui | probable |
| 12 | oui | oui | probable |
| 13 | n.c. | oui | probable (disparition à J1) |
| 14 | oui | oui | probable |

TABLE 3.1 – Caractéristiques qualitatives des mesures ATP initiales.

Pour la moitié des cas, les mesures ATP corps entier retrouvent une activité prédominant sur le détecteur inférieur, en faveur d'une localisation digestive. Pour l'autre moitié, ces

*. n.c. : donnée non recueillie dans le dossier médical.

données ne sont pas présentes dans les données médicales. Une variation importante de l'activité lors des mesures ATP initiales est observée dans la majorité des cas; celle-ci est possiblement en lien avec une variation de la géométrie de comptage due à la mobilité du gratton dans le tractus gastro-intestinal. Enfin, la disparition brutale et complète de l'activité en ATP corps entier entre J1 et J3 conforte l'hypothèse d'un gratton – source ponctuelle en transit dans le tube digestif.

Au total, ces résultats confirment que pour les cas étudiés l'incorporation est digestive et qu'il s'agit d'une source ponctuelle transitant dans le tube digestif.

3.2 ANALYSE DE COHÉRENCE AVEC LE MODÈLE

Le tableau 3.2 présente les résultats de l'analyse de cohérence selon les différentes méthodes abordées dans la sous-section 2.2.2 page 47.

| Cas | Rapport d'estimation $\frac{A_{i,min}}{A_{i,max}}$ | Cohérence sur l'aspect visuel | Khi ² th. | khi ² calc. | Cohérence avec le modèle † |
|-----|----------------------------------------------------|-------------------------------|----------------------|------------------------|----------------------------|
| 1 | > 3 | non | 15,51 | 222,11 | non |
| 2 | > 3 | non | 9,49 | 94,46 | non |
| 3 | > 3 | non | 7,81 | 28,84 | non |
| 4 | > 3 | non | 11,07 | 68,48 | non |
| 5 | > 3 | non | 7,81 | 290,15 | non |
| 6 | > 3 | non | 5,99 | 24,30 | non |
| 7 | > 3 | non | 5,99 | 19,61 | non |
| 8 | > 3 | non | 3,84 | 6,74 | non |
| 9 | > 3 | non | 3,84 | 13,54 | non |
| 10 | > 3 | non | 3,84 | 17,38 | non |
| 11 | > 3 | non | 3,84 | 10,41 | non |
| 12 | > 3 | non | 5,99 | 10,90 | non |
| 13 | > 3 | non | 3,84 | 6,90 | non |
| 14 | > 3 | non | 9,49 | 11,37 | non |

TABLE 3.2 – Résultats de l'analyse de cohérence.

Les examens radiotoxicologiques peuvent ne pas être systématiquement pratiqués pour plusieurs raisons : une première estimation par le médecin du travail de la dose efficace engagée inférieure au seuil d'enregistrement par exemple ou encore simplement le refus du salarié.

Aucun des cas n'apparaît en cohérence avec le modèle – avec $p < 0,05$ – et ce de façon d'autant plus importante que les cas sont bien documentés avec des radiotoxicologies des urines et des selles. Par ailleurs, le rapport entre les activités mesurées au cours des examens ATP est supérieur à 3 pour chacun des cas étudiés. De plus, comme cela est représenté ci-dessous par la figure 3.1 et reproduit en annexes A.1 à A.5 pour les

†. $p < 0,05$.

cinq premiers cas, les courbes prédites par le modèle biocinétique illustrent l'absence de cohérence avec les mesures expérimentales. Les χ^2 calculés, présentés dans le tableau 3.2 sont bien supérieurs aux χ^2 théoriques, et ce d'autant plus que les cas sont étayés par de multiples ATP et examens radiotoxicologiques.

Cela nous amène à rejeter l'hypothèse selon laquelle le modèle biocinétique observé pour les particules chaudes d'oxydes de Cobalt 60 suit le modèle biocinétique de la CIPR en cas d'incorporation digestive pure.

Ces résultats confirment l'absence de cohérence entre les données expérimentales et les modèles de la CIPR, et tendent à suggérer l'existence d'un modèle biocinétique spécifique – encore non décrit par la CIPR – pour les grattons d'oxydes de Cobalt 60.

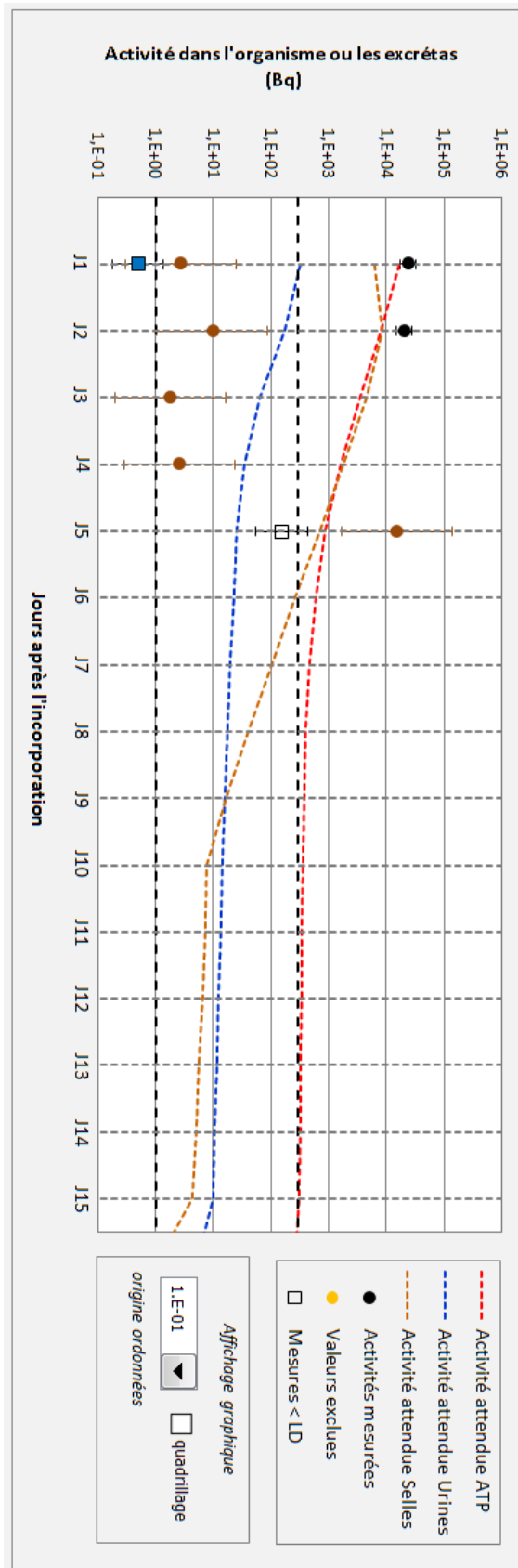


FIGURE 3.1 – CADOR : Courbes prédites par le modèle de la CIPR pour le cas n°1.

3.3 CALCUL DU FACTEUR D'ABSORPTION GASTRO-INTESTINALE EXPÉRIMENTAL

Nous avons vu que la relation 2.3 page 52 permettait de calculer une valeur de f_1 expérimentale. Le tableau 3.3 reprend pour chaque cas, lorsque des examens radiotoxicologiques urinaires ont été réalisés, la valeur des f_1 ainsi calculés.

| Cas | Activité incorporée I (Bq) | Activité urinaire à J1 (Bq) | f_1 expérimental |
|-----|------------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| 1 | 15 000 | < LD | $1,19 \times 10^{-4}$ |
| 2 | 352 500 | < LD | $5,1 \times 10^{-6}$ |
| 3 | 8070 | < LD | $2,2 \times 10^{-4}$ |
| 4 | 2770 | < LD | $6,4 \times 10^{-4}$ |
| 5 | ≈ 1100 | 1,6 | $5,2 \times 10^{-3}$ |

TABLE 3.3 – Activités mesurées et valeurs des f_1 expérimentaux associées.

Compte tenu du fait que lorsque l'activité urinaire à J1 est inférieure à la limite de détection (LD), une valeur égale à la moitié de la LD est retenue, le facteur f_1 est donné par la relation 2.3 page 52 :

$$f_1 = \frac{3,57 \cdot M_{J1}}{I}$$

Par exemple pour le cas n°3, l'estimation du facteur d'absorption gastro-intestinale est :

$$f_1 = \frac{3,57 \times 0,5}{8070} = 2,2 \times 10^{-4}$$

Lorsque l'activité urinaire à J1 est inférieure à la limite de détection (cas 1 à 4), la valeur du f_1 calculé expérimentalement est d'autant plus basse que l'activité incorporée est importante. Dans les cas étudiés, les valeurs sont de l'ordre de 1×10^{-4} à 1×10^{-6} .

Le seul cas pour lequel une activité dans les urines est mesurée à J1 est le cas n°5, mais ce cas ne correspond pas typiquement à une seule particule chaude car l'activité excrétée dans les selles est réparties entre J2 et J3 (744 et 372 Bq).

En pratique, nous pouvons retenir qu'après l'ingestion d'un gratton de 20 kBq et lorsque aucune activité n'est retrouvée dans les urines, le facteur d'absorption gastro-intestinale est inférieur à 1×10^{-4} et peut être considéré comme proche de zéro.

Ces résultats illustrent le fait que le transfert dans le compartiment systémique ne se produit que pour les radionucléides en solution ou les particules suffisamment petites. Lorsque de plus grosses particules très peu solubles sont ingérées, tout se passe comme si elles ne faisaient que transiter dans le tube digestif ; toute l'activité incorporée est en pratique retrouvée dans les selles lorsque des analyses radiotoxicologiques ont lieu.

3.4 CALCUL DU FACTEUR DE DOSE LORSQUE f_1 EST PROCHE DE ZÉRO

Les équations exposées en sous-section 2.2.4 :

$3,4 \times 10^{-9} = a \cdot 1 \times 10^{-1} + b$ et $2,5 \times 10^{-9} = a \cdot 5 \times 10^{-2} + b$ permettent de calculer les constantes a et b , et nous donnent :

$$a = 1,8 \times 10^{-8}$$

$$b = 1,6 \times 10^{-9}$$

La figure 3.2 ci dessous illustre la relation entre la DPUI et le facteur d'absorption gastro-intestinale f_1 .

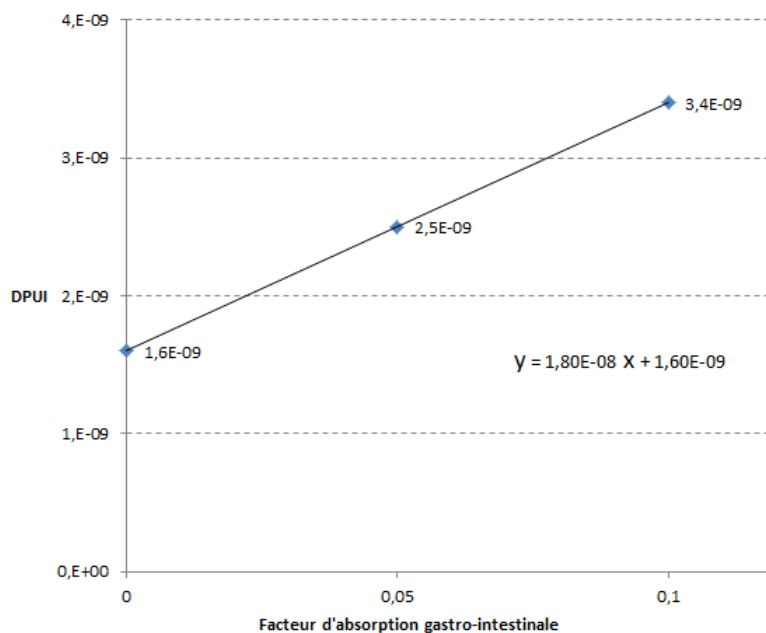


FIGURE 3.2 – Relation entre le coefficient de DPUI et le facteur d'absorption gastro-intestinale f_1 .

Ainsi, quand $f_1 = 0$, le coefficient de dose efficace par unité d'incorporation est de $1,6 \times 10^{-9} \text{ Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$.

De plus, nous avons vu en section 1.7 page 41 que la publication n°134 de la CIPR proposait de nouveaux coefficients de dose pour le Cobalt 60 en cas d'ingestion. Ainsi, pour les oxydes lorsque $f_1 = 0,05$ le coefficient de dose vaut $2,1 \times 10^{-9} \text{ Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$; pour les autres formes chimiques, lorsque $f_1 = 0,1$ la DPUI est égale à $3,2 \times 10^{-9} \text{ Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$.

Il est alors possible de représenter à nouveaux la relation entre les DPUI de la CIPR 134 et le facteur d'absorption gastro-intestinale f_1 . La droite obtenue illustrant cette relation (cf. figure 3.3) permet de calculer un autre coefficient de dose lorsque le facteur d'absorption gastro-intestinale f_1 vaut zéro.

En se basant sur la CIPR 134, lorsque $f_1 = 0$, le coefficient de dose est égal à $1 \times 10^{-9} \text{ Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$, soit une diminution de 37,5 % de la dose efficace engagée par rapport aux modèles actuellement en vigueur.

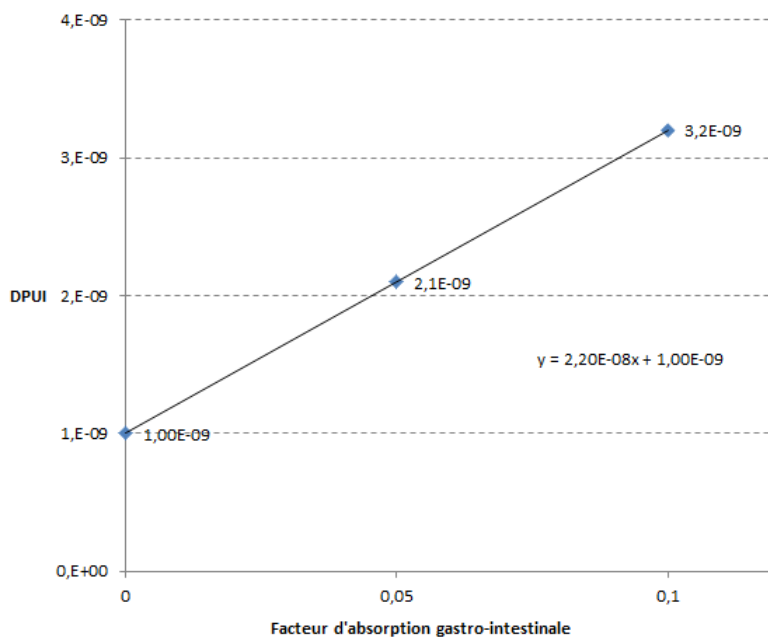


FIGURE 3.3 – Relation entre le coefficient de DPUI de la CIPR 134 et le facteur d'absorption gastro-intestinale f_1 .

DISCUSSION

Sommaire

| | | |
|-------|---------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1 | VALIDITÉ DE LA MÉTHODE | 63 |
| 4.1.1 | Validité intrinsèque | 63 |
| 4.1.2 | Validité extrinsèque | 64 |
| 4.2 | PROPOSITION POUR L'ESTIMATION DE LA DOSE EFFICACE ENGAGÉE | 66 |

4.1 VALIDITÉ DE LA MÉTHODE

4.1.1 Validité intrinsèque

La méthode du calcul expérimental du facteur d'absorption gastro-intestinale a été présentée au groupe de travail MEDOR* au cours de la réunion du 18 mai 2017 au CNPE du BLAYAIS. Ce groupe de travail national est composé d'experts en dosimétrie et de médecins du travail des exploitants d'INB (AREVA, CEA, EDF, IRSN). La méthode utilisée a été validée à l'issue de la présentation.

Des logiciels élaborés de calcul de dose existent; leur utilisation est communément réservée aux experts. Parmi eux, le logiciel IMBA [30] (*Integrated Modules for Bioassay Analysis*), d'envergure internationale, implémente les modèles de la CIPR pour permettre l'estimation des activités incorporées pour de nombreux radionucléides ainsi que les doses efficaces associées. Pour la modélisation biocinétique et dosimétrique d'une contamination interne par voie digestive, IMBA est actuellement basé sur le couple CIPR 30 – CIPR 78. Nos résultats ont été comparés avec les coefficients de dose obtenus avec IMBA qui permet de librement faire varier le facteur f_1 .

Comme reproduit en annexe A.6, selon IMBA, le coefficient de dose associé à un $f_1 = 0$ est égal à $1,6 \times 10^{-9} \text{ Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$.

Le principal enseignement apporté par les résultats de ce travail est que lorsque aucune activité n'est retrouvée dans les urines, le facteur d'absorption gastro-intestinale peut être considéré comme étant proche de zéro. La faiblesse de ce travail se concentre

*. Méthode Dosimétrique de Référence.

ainsi dans le nombre restreint de cas avec examens radiotoxicologiques. La principale explication est due au fait que les analyses sont en pratique rarement demandées par les médecins du travail dans ces circonstances particulières. En effet, ces derniers s'attendent – d'expérience – à ne rien retrouver dans les urines.

Donc quand les analyses d'urines ne sont pas demandées, il apparaît difficile d'extrapoler cette conclusion à l'ensemble des contaminations supposées par des grattons. Par exemple, le premier des prélèvements urinaires effectués pour le cas 5 retrouve une activité non nulle et supérieure à la limite de détection. Ceci pourrait s'expliquer par une contamination concomitante par un gratton concentrant l'essentielle de l'activité incorporée mais aussi par de plus petites « poussières » de Cobalt 60. Ces dernières suivent les modèles décrits par la CIPR et passent effectivement au niveau systémique.

Les résultats obtenus au cours de ce travail sont en faveur d'un passage systémique plus faible que prévu voire négligeable du Cobalt 60 lorsqu'il se présente sous la forme d'un gratton d'oxydes. Dans cette situation, l'irradiation de l'organisme est nettement plus faible que celle prévue par les modèles de la CIPR. Cette situation est relativement fréquente en pratique et c'est notamment pour cette raison qu'il n'est pas possible de donner d'emblée une estimation fiable de la dose engagée en cas d'incorporation accidentelle.

4.1.2 Validité extrinsèque

L'absorption du cobalt au niveau digestif – pour les formes physico-chimiques rencontrées dans un contexte professionnel – pourrait être bien inférieure à celle des formes inorganiques relativement solubles.

En 1989 Bailey *et al.* [31] a mesuré l'absorption du cobalt 57 sous forme d'oxyde de cobalt (Co_3O_4) en comparaison des processus ayant lieu lors de l'absorption de particules par voie inhalée chez différents mammifères. Les estimations de l'absorption après instillation gastrique se situaient entre 1×10^{-2} et 5×10^{-2} pour les souris, hamsters, rats, cochons d'Inde et pour les babouins.

Vrba *et al.* (2007) [32] ont montré que la biocinétique du Cobalt 60 rencontré en centrale nucléaire nécessitait des études plus poussées. Ceci afin de permettre une meilleure corrélation entre la modélisation et les données observées à partir de cas d'expositions réelles. En effet, quels que soient les paramètres biocinétiques utilisés (f_1 , diamètre aérodynamique médian en activité, formes physico-chimiques) les données recueillies expérimentalement ne concordaient pas, après analyses, avec les modèles de la CIPR.

La littérature expérimentale suggère que la valeur de la fraction transférée au niveau systémique lors de l'ingestion d'oxydes de cobalt est au moins inférieure d'un facteur 10 à celle actuellement recommandée par la CIPR.

Chevalier *et al.* en 1993 [16] ont estimé, pour cinq cas de contamination par des grattons de Cobalt 60, la valeur du coefficient d'absorption gastro-intestinale. Les valeurs étaient

comprises entre 1×10^{-3} et 1×10^{-4} . Les auteurs exposaient par ailleurs le concept des macro-particules d'oxydes de Cobalt 60 – les « grattons ».

La possibilité du transit d'une macro-particule de Cobalt 60 sans transfert systémique a aussi été observé au cours d'autres études. Whillans *et al.* en 2007 [33] ont là aussi estimé une fraction transférée inférieure à 1×10^{-3} . Ils ont constaté l'absence d'activité significative détectable dans les prélèvements urinaires et la récupération de la quasi totalité de l'activité incorporée sur une seule selle. Ainsi ils ont probablement été en rapport avec un gratton d'oxyde de Cobalt 60 ($I = 330\,000\text{Bq}$).

Les auteurs considéraient que dans ces conditions $f_1 \approx 0$ et estimaient une dose efficace engagée de $520 \times 10^{-6}\text{Sv}$ à l'aide d'IMBA. Cette estimation concorde avec notre estimation du coefficient de dose dans ces conditions. De plus, en appliquant le coefficient de dose de la CIPR 134, extrapolé lorsque $f_1 = 0$, la dose efficace engagée pourrait être plus faible, aux alentours de $330 \times 10^{-6}\text{Sv}$.

Ainsi, cette fraction apparaît moins importante que celle prévue par le supplément à la première partie de la CIPR 30 [34]. Cette publication sortie en 1979 considère en effet que le Cobalt 60 absorbé est responsable de près de la moitié de la dose efficace.

Ces constatations d'un facteur d'absorption gastro-intestinale f_1 inférieur à celui prévu par les modèles de la CIPR pourrait s'expliquer par la granulométrie des grattons – c'est à dire le diamètre des particulaires. Il pourrait en effet en résulter une surface d'échange plus faible avec la muqueuse intestinale.

Un parallèle pourrait être fait avec les contaminations par inhalation. En effet, elles se caractérisent par une valeur de diamètre aérodynamique médian en activité (DAMA). Le DAMA correspond à la valeur du diamètre aérodynamique telle que 50 % de l'activité dans l'air d'un aérosol défini sont associés à des particules plus petites que le DAMA, et que 50 % de l'activité sont associés à des particules plus grosses que le DAMA.

Nos résultats concordent avec les données de la littérature sur la biocinétique et la dosimétrie des particules chaudes d'oxydes de Cobalt 60. S'il ne sont pas le seul mode d'incorporation du Cobalt 60, les grattons semblent représenter un modèle biocinétique encore mal appréhendé. Cependant, pour les autres formes physico-chimiques – y compris les formes classiques d'oxydes – les modèles de la CIPR restent les modèles dosimétriques de référence.

4.2 PROPOSITION POUR L'ESTIMATION DE LA DOSE EFFICACE ENGAGÉE

La dose efficace engagée E_{50} est le produit de l'activité incorporée estimée I avec le coefficient de dose (DPUI). Pour rappel, la DPUI pour le Cobalt 60 est de $2,5 \times 10^{-9} \text{ Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$ pour les oxydes insolubles dont le coefficient d'absorption gastro-intestinale f_1 vaut 5×10^{-2} .

$$E_{50} = \text{DPUI} \cdot I = 2,5 \times 10^{-9} \cdot I$$

Comme détaillé en sous-section 3.4 page 60 et d'après les modèles biocinétiques et dosimétriques actuellement utilisés lorsque $f_1 = 0$, le coefficient de dose est égale à $1,6 \times 10^{-9} \text{ Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$.

La récente publication n°134 de la CIPR [25] tendrait même vers une valeur encore plus faible égale à $1 \times 10^{-9} \text{ Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$.

Ces valeurs, une fois multipliées à l'activité incorporée, représenteraient la « base fixe de la dose efficace engagée » due aux seules composantes γ et β irradiant le tube digestif. Autrement dit, $0,9 \times 10^{-5} \text{ Sv}$ – soit 36 % – de la dose efficace engagée calculée finalement pour les oxydes de cobalt sont directement secondaires au passage sanguin de la contamination et de sa distribution dans le corps humains (cf. tableau 1.5).

De plus, si on se place dans le cadre de la CIPR 134, un facteur $f_1 = 5 \times 10^{-2}$ serait responsable d'environ 52 % de la dose efficace engagée. Cela serait concordant avec le supplément à la première partie de la CIPR 30 [34].

Il apparaît qu'au moins 36 % soit approximativement un tiers de la dose efficace engagée est secondaire à la composante systémique d'une incorporation digestive de Cobalt 60.

Dans ce contexte, il apparaît souhaitable de réaliser des prélèvements urinaires et de selles lorsqu'en cas de contamination interne, les premières mesures anthropogammamétriques suggéreraient l'ingestion d'un gratton de Cobalt 60 d'activité supérieure à 20 000 Bq. En effet, si l'activité mesurée dans les urines est inférieure à la limite de détection, alors le facteur d'absorption gastro-intestinale f_1 serait inférieur à 1×10^{-4} (cf. relation 2.3 page 52) et approximativement égal à zéro.

Enfin, dans le cas particulier du gratton de Cobalt 60, la dose efficace engagée pourrait alors être calculée à partir de l'activité excrétée dans les selles, en appliquant un coefficient de dose DPUI de $1,6 \times 10^{-9} \text{ Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$.

CONCLUSION

Ce travail étaye l'existence d'un modèle biocinétique digestif spécifique pour les grattons de Cobalt 60. Ces macro-particules d'oxydes de cobalt très peu solubles, dérivés des matériaux dits « stellités » de l'ingénierie nucléaire, ne semblent pas suivre le modèle biocinétique de la Commission Internationale de Protection Radiologique.

Les doses efficaces engagées calculées jusqu'alors sont objectivement faibles et ne portent pas préjudice aux salariés du nucléaire. Cependant, les observations d'activités très importantes en contamination cutanée laissent planer le risque de contaminations digestives aux issues beaucoup plus péjoratives pour les travailleurs ; que ce soit un risque médicale d'irradiation intestinale aiguë ou un risque « professionnel » avec l'interdiction réglementaire de poursuivre à plus ou moins long terme une activité en zone contrôlée d'une INB.

Dans ce cas il apparaît important et nécessaire d'affiner les modèles biocinétiques et dosimétriques utilisés *in fine* par le médecin du travail opérant en centrale nucléaire.

Les facteurs d'absorption gastro-intestinale calculés expérimentalement sont largement inférieurs au facteur d'absorption gastro-intestinale $f_1 = 5 \times 10^{-2}$ associé aux oxydes de Cobalt 60 par la CIPR. Si l'activité mesurée dans les selles est de l'ordre de 20 kBq et si l'activité mesurée dans les urines est inférieure à la limite de détection, alors le facteur d'absorption gastro-intestinale est inférieur à 1×10^{-4} . Dans ce cas où f_1 tend vers zéro, le coefficient de dose, DPUI, est égal à $1,6 \times 10^{-9} \text{ Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$ selon les modèles actuels.

Les nouvelles données de la publication n° 134 de la CIPR permettent même d'évaluer ce coefficient de dose à $1 \times 10^{-9} \text{ Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$ lorsque $f_1 = 0$.

En conclusion, lorsque les premières mesures anthropogammamétriques évoquent l'ingestion d'une particule chaude de Cobalt 60 d'activité supérieure à 20 kBq, il apparaît souhaitable de réaliser des analyses radiotoxicologiques des urines et des selles. Si l'activité mesurée dans les urines est inférieure à la limite de détection, alors l'activité incorporée est égale à celle mesurée dans les selles. La dose efficace engagée pourrait être calculée en appliquant un coefficient de dose $\text{DPUI} = 1,6 \times 10^{-9} \text{ Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$.

Bibliographie

- [1] Arrêté du 17 juillet 2013 relatif à la carte de suivi médical et au suivi dosimétrique des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants.
- [2] Arrêté du 1^{er} septembre 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants.
- [3] ICRP : *Individual monitoring for internal exposure of workers*. Numéro 78 de Annals of the ICRP. Pergamon Press, 1998.
- [4] ICRP : *Limits for intakes of radionuclides by workers*. Numéro 30 de Annals of the ICRP. Pergamon Press, 1979.
- [5] ICRP : *Dose coefficients for intakes of radionuclides by workers*. Numéro 68 de Annals of the ICRP. Pergamon Press, 1994.
- [6] D. J. GAMBINI et R. GRANIER : *Manuel pratique de radioprotection*. Lavoisier, 2007.
- [7] P. GALLE : *Toxiques nucléaires*. Masson, 1998.
- [8] D. GRENÊCHE : *Histoire et techniques des réacteurs nucléaires et de leurs combustibles*. EDP sciences, 2016.
- [9] BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES : *Table of Radionuclides*. Reproduction service, 2006.
- [10] R. ANTONI et L. BOURGOIS : *Physique appliquée à l'exposition externe*. Springer, 2012.
- [11] H. MÉTIVIER : *Radioprotection et ingénierie nucléaire*. EDP sciences, 2006.
- [12] M. TUBIANA : *Radiobiologie : bases fondamentales*. Hermann, 2008.
- [13] ICRP : *Recommendations of the international commission on radiological protection*. Numéro 60 de Annals of the ICRP. Pergamon Press, 1990.
- [14] ICRP : *The 2007 recommendations of the international commission on radiological protection*. Numéro 103 de ICRP publication. Elsevier, 2007.
- [15] IRSN : *La radioprotection des travailleurs : exposition professionnelle aux rayonnements ionisants en France – bilan 2015*.
- [16] C. CHEVALIER et M. GONIN : *The gastrointestinal absorption factor for cobalt : a study of contamination cases from french nuclear power plants*. *Radiation Protection Dosimetry*, 48(4):363–365, 1993.

- [17] T. SMITH, C. J. EDMONDS et C.F. BARNABY : Absorption and retention of cobalt in man by whole-body counting. *Health Physics*, 22(4):359–367, 1972.
- [18] L. O. SIMONSEN, H. HARBAK et P. BENNEKOU : Cobalt metabolism and toxicology – a brief update. *Science of the Total Environment*, 432:210–215, 2012.
- [19] ICRP : *Human alimentary tract model for radiological protection*. Numéro 100 de ICRP publication. Elsevier, 2006.
- [20] E. BLANCHARDON : Évolution récente des modèles de dosimétrie interne. Société Française de Radioprotection, 2011.
- [21] ICRP : *The ICRP computational framework for internal dose assessment for reference adults : specific absorbed fractions*. Numéro 133 de ICRP publication. SAGE, 2016.
- [22] R. W. LEGGETT : Reliability of the ICRP’s dose coefficients for members of the public : I. sources of uncertainty in the biokinetic models. *Radiation Protection Dosimetry*, 95(3):199–213, 2001.
- [23] R. LEGGETT, J. HARRISON et A. PHIPPS : Reliability of the ICRP’s dose coefficients for members of the public : IV. basis of the human alimentary tract model and uncertainties in model predictions. *Radiation Protection Dosimetry*, 123(2):156–170, 2007.
- [24] A. W. PHIPPS, T. P. FELL, J. D. HARRISON, F. PAQUET et R. W. LEGGETT : Dose coefficients calculated using the new icrp model for the human alimentary tract. *Radiation Protection Dosimetry*, 127(1–4):79–85, 2007.
- [25] ICRP : *Occupational intakes of radionuclides : part 2*. Numéro 134 de ICRP publication. SAGE, 2016.
- [26] ICRP : *Occupational intakes of radionuclides*. Numéro 130 de ICRP publication. SAGE, 2015.
- [27] SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE MÉDECINE DU TRAVAIL : *Surveillance médico-professionnelle de l’exposition interne en installations nucléaires de base*. Recommandations de bonnes pratiques label HAS, 2011.
- [28] B. LANDRY : CADOR : un outil de calcul de la dose efficace engagée. *Radioprotection*. Draft 2017.
- [29] C. M. CASTELLANI, J. W. MARSH, C. HURTGEN, E. BLANCHARDON, P. BERARD, A. GIUSSANI et M. A. LOPEZ : *IDEAS Guidelines (v2) for the estimation of committed doses from incorporation monitoring data*. EURADOS, 2013.
- [30] A. BIRCHALL, N. S. JARVIS, M. S. PEACE, A. E. RIDDELL et W. P. BATTERSBY : The IMBA suite : Integrated modules for bioassay analysis. *Radiation Protection Dosimetry*, 79(1–4):107–110, 1998.
- [31] M. R. BAYLEY, W. G. KREYLING, S. ANDRÉ et A. BATCHELOR : An interspecies comparison of the lung clearance of inhaled monodisperse cobalt oxide particles – part I : objectives and summary of results. *J. Aerosol Sci.*, 20(2):169–188, 1989.

- [32] T. VRBA, I. MALATOVA et B. JUROCHOVA : Analysis of a case of internal contamination with cobalt radioisotopes. *Radiation Protection Dosimetry*, 125(1–4):527–530, 2007.
- [33] D. W. WHILLANS, W. J. CHASE et W. H. WOŁODARSKY : Dose assessment for ingestion of a 330 kilobecquerel ^{60}Co hot particle. *Radiation Protection Dosimetry*, 127(1–4):90–92, 2007.
- [34] ICRP : *Limits for intakes of radionuclides by workers (supplement to part 1)*. Numéro 30 de Annals of the ICRP. Pergamon Press, 1979.
- [35] ISO 27048 radioprotection – estimation de la dose interne dans le cadre de la surveillance des travailleurs en cas d'exposition aux rayonnements.
- [36] J. BRUNZENDORF : Determination of depth-dose curves in beta dosimetry. *Radiation Protection Dosimetry*, 151(2):203–210, 2012.
- [37] A. Sh. AYDAROUS : The effect of volume and surface distributed activity sources on surface doses. *Radiation Protection Dosimetry*, 141(1):64–71, 2010.
- [38] IAEA : *Safety reports series No.37 : Methods for assessing occupational radiation doses due to intakes of radionuclides*. 2004.

Chapitre A

Annexes

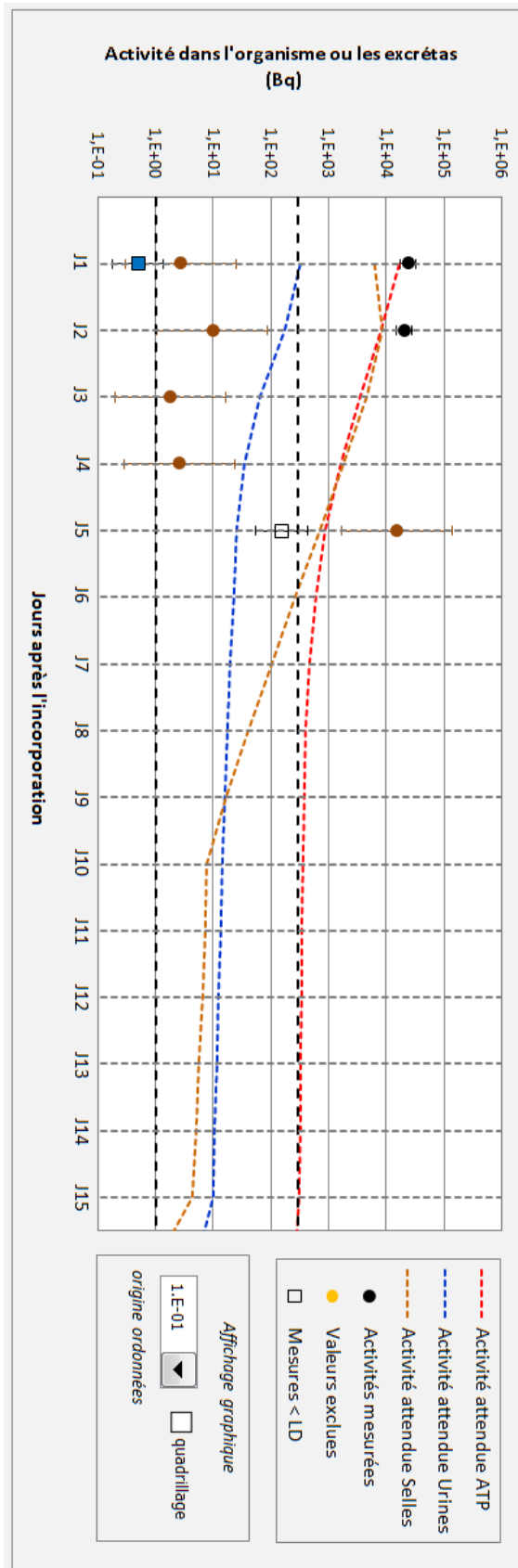


FIGURE A.1 – Courbes produites par CADOR pour le cas n°1.

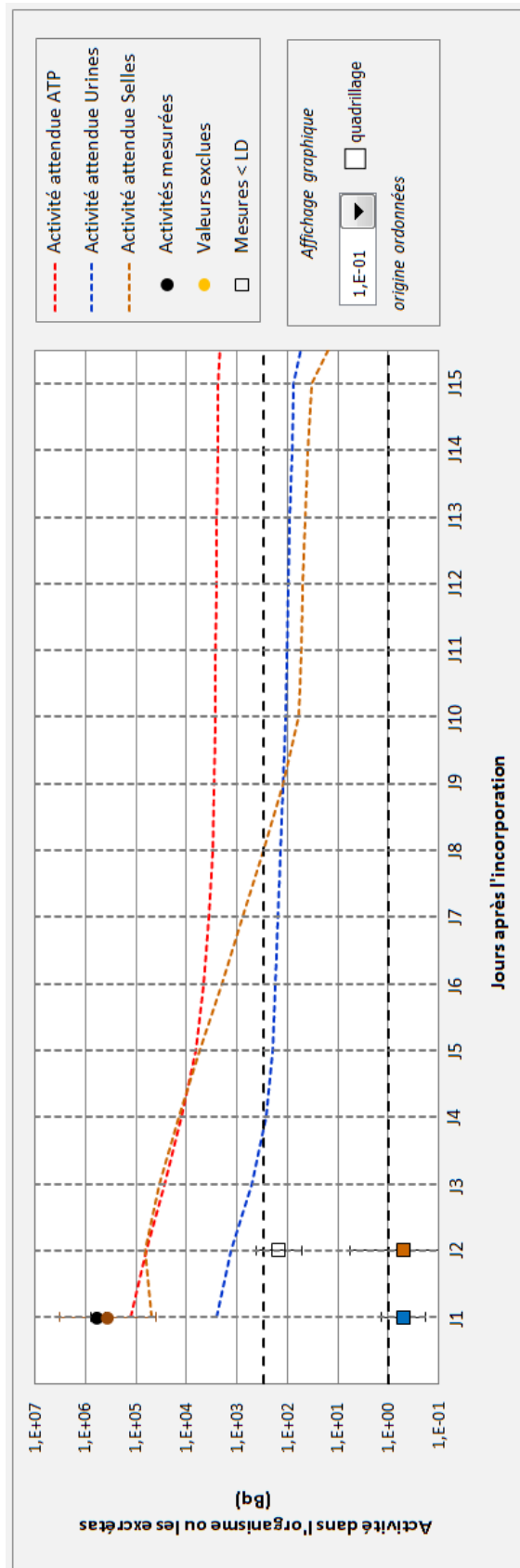


FIGURE A.2 – Courbes produites par CADOR pour le cas n°2.

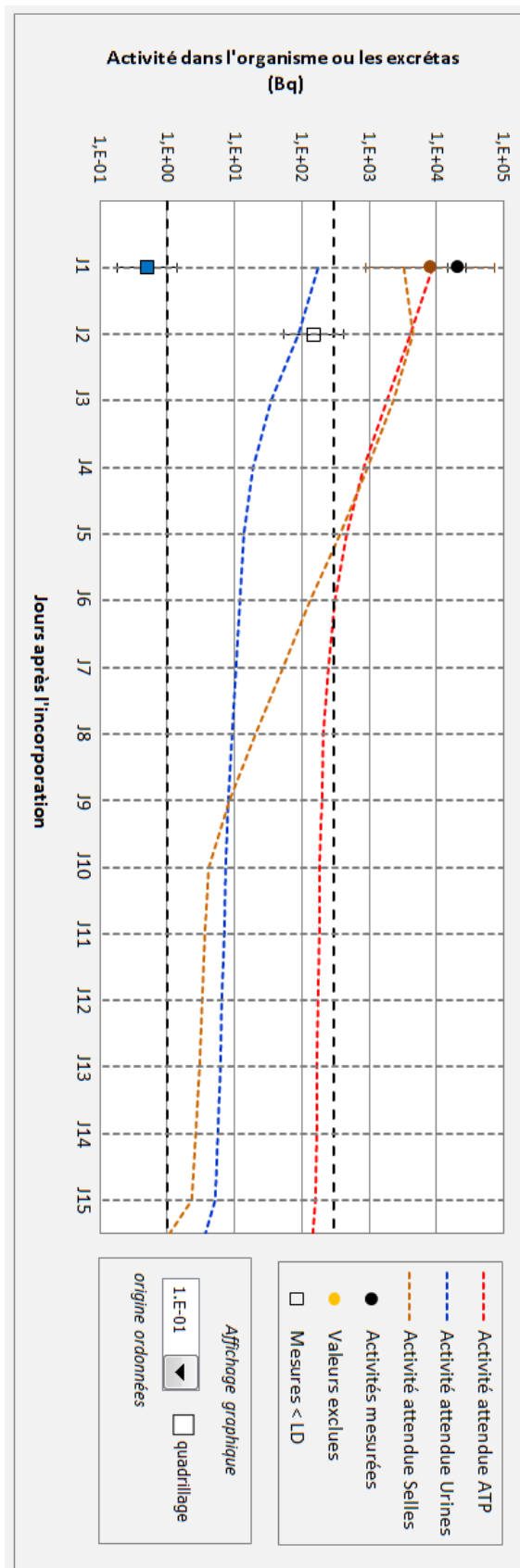


FIGURE A.3 – Courbes produites par CADOR pour le cas n°3.

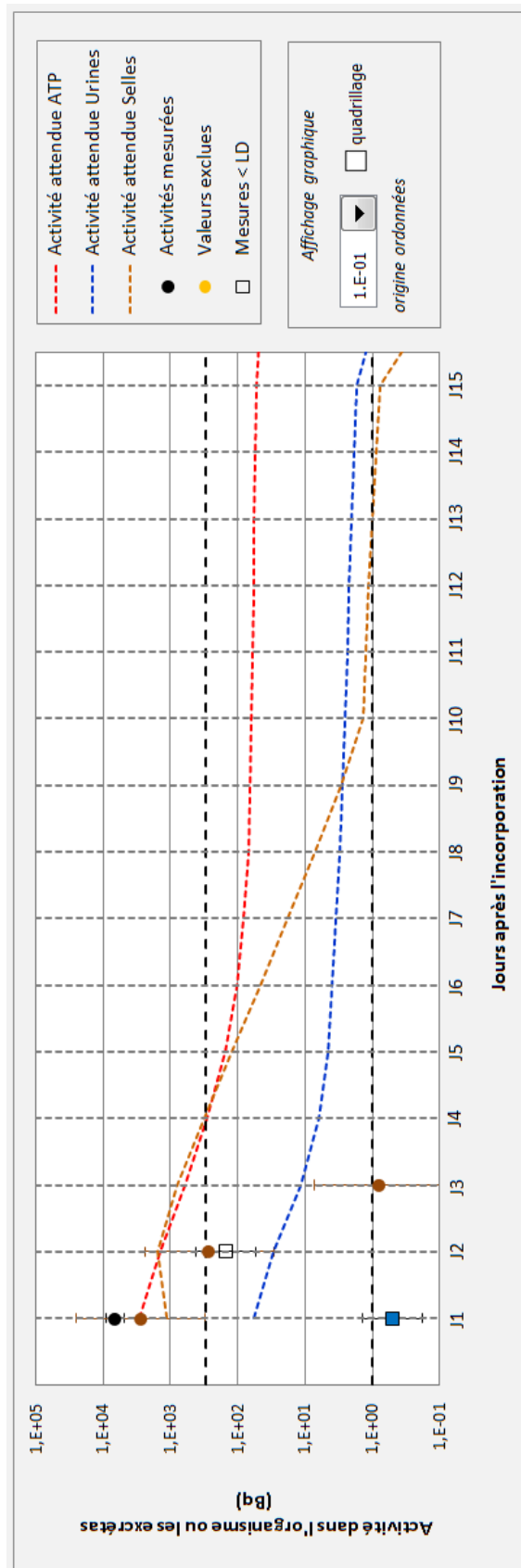


FIGURE A.4 – Courbes produites par CADOR pour le cas n°4.

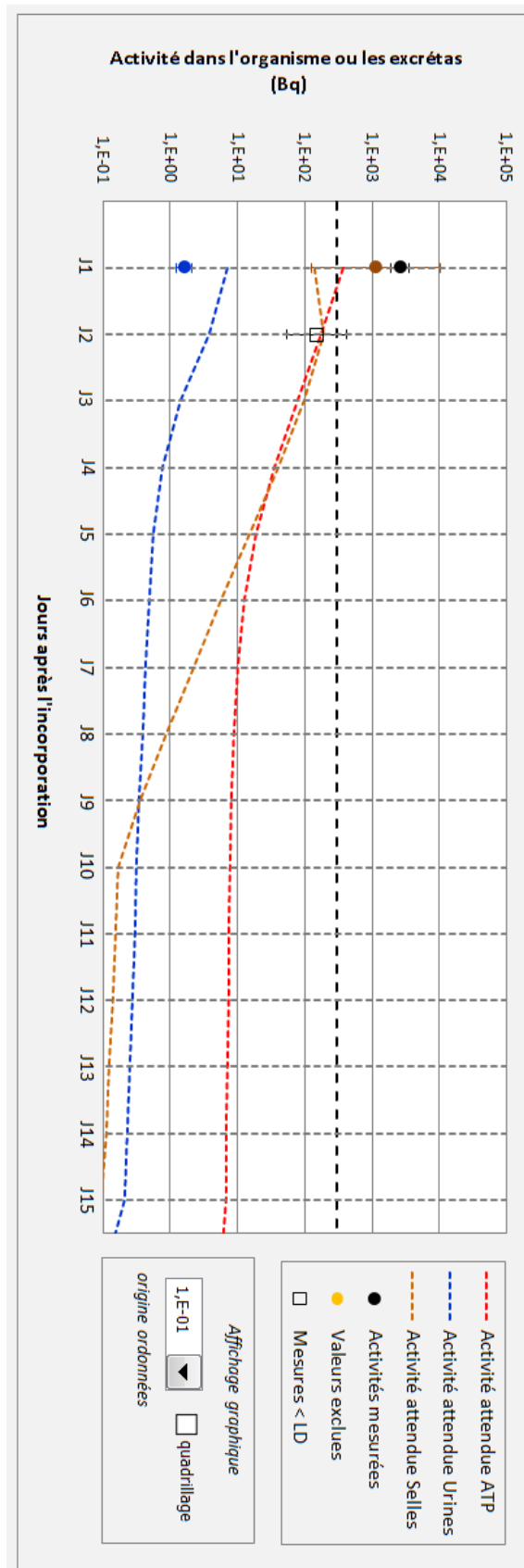


FIGURE A.5 – Courbes produites par CADOR pour le cas n°5.

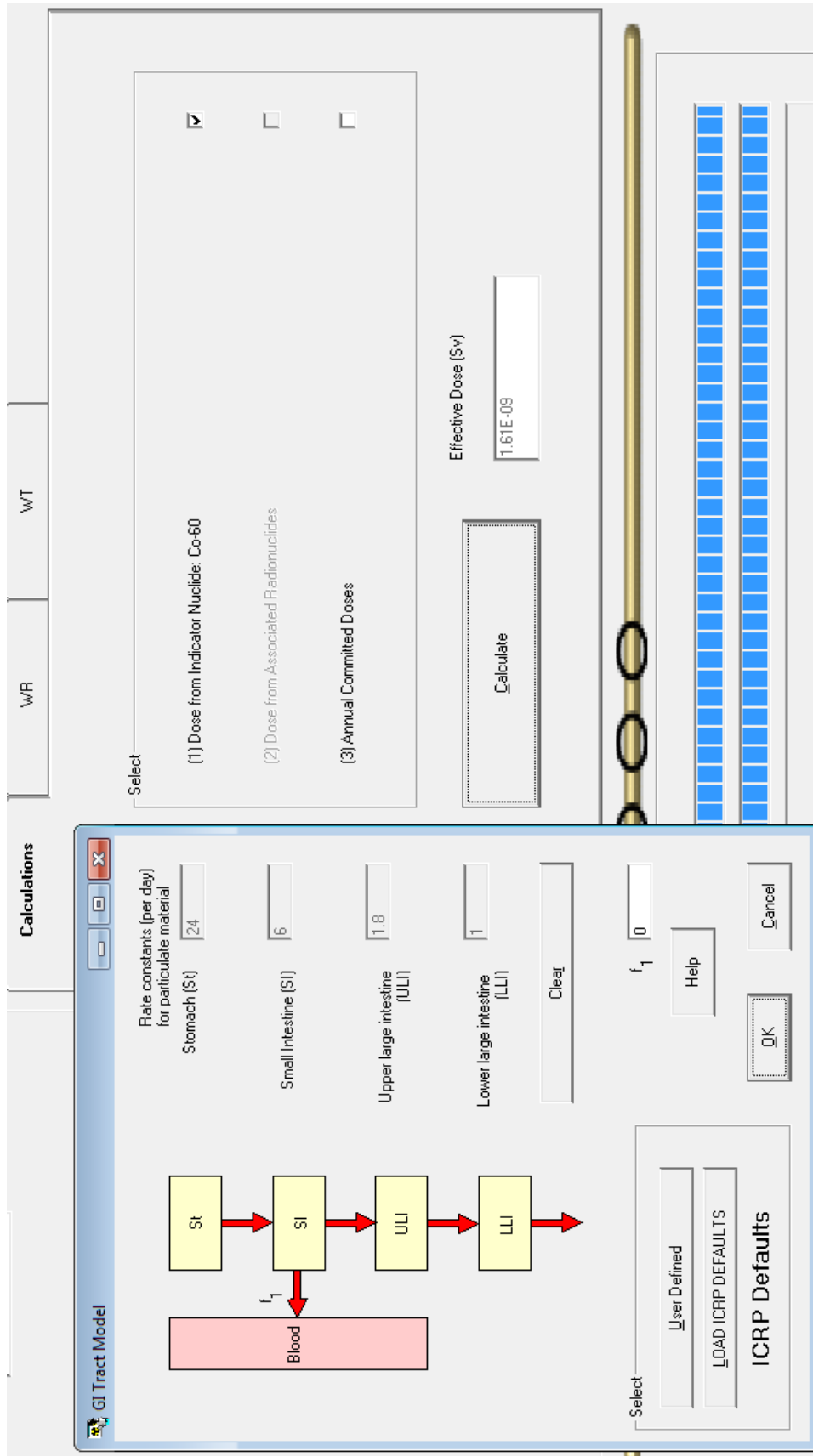


FIGURE A.6 – IMBA : coefficient de dose pour $f_1 = 0$.

6. DOSIMETRIC MODEL FOR THE GASTROINTESTINAL TRACT

6.1. Introduction

As explained in previous chapters of this report, exposure of workers to a radioactive material is limited by consideration of the committed dose equivalent H_{50} received by organs and tissues of the body following intake of the radionuclide concerned. The general method used to calculate H_{50} has been discussed in Chapter 4, where it was explained that $H_{50,T}$ in a target organ T depends on U_S , the number of transformations in source organ S over the 50 years following intake of the radionuclide and $SEE(T \leftarrow S)$, the specific effective energy absorbed in target organ T from radiations originating in source organ S . The methods used to calculate U_S , $SEE(T \leftarrow S)$ and $H_{50,T}$ for sections of the gastrointestinal (GI) tract following ingestion of a radionuclide are discussed below. These sections of the GI tract are treated as separate target tissues (para. 105, *ICRP Publication 26*). Organs and tissues of the body other than the GI tract will also be irradiated by that fraction of the radionuclide which enters the body fluids and also, in some cases, by photon irradiation from material retained in the GI tract. The general methods used to calculate $H_{50,T}$ following entry of a radionuclide into body fluids have been described in Chapter 4. The method used to calculate the activity of an ingested radionuclide or its radioactive daughters, transferred to body fluids from the GI tract, is discussed below.

6.2. Dosimetric Model

The dosimetric model is based on the biological model developed by Eve (1966). For the purposes of radiological protection the GI tract is taken to consist of the 4 sections shown schematically in Fig. 6.1. (See p. 33).

Each of these sections is considered as a single compartment and translocation from one compartment to the next is taken to be governed by first order kinetics. Thus, if $q(t)$ is the activity of ingested radionuclide in a compartment at time t then the model is completely described by the following equations

$$\frac{d}{dt} q_{ST}(t) = -\lambda_{ST}q_{ST}(t) - \lambda_R q_{ST}(t) + \dot{I}(t) \quad (6.1a)$$

$$\frac{d}{dt} q_{SI}(t) = -\lambda_{SI}q_{SI}(t) - \lambda_R q_{SI}(t) - \lambda_B q_{SI}(t) + \lambda_{ST}q_{ST}(t) \quad (6.1b)$$

$$\frac{d}{dt} q_{ULI}(t) = -\lambda_{ULI}q_{ULI}(t) - \lambda_R q_{ULI}(t) + \lambda_{SI}q_{SI}(t) \quad (6.1c)$$

$$\frac{d}{dt} q_{LLI}(t) = -\lambda_{LLI}q_{LLI}(t) - \lambda_R q_{LLI}(t) + \lambda_{ULI}q_{ULI}(t) \quad (6.1d)$$

where λ_R is the radioactive decay constant of the radionuclide in question;

$\lambda_B q_{SI}(t)$ is the rate of transfer of activity to body fluids from the small intestine, assumed to be the only site of absorption from the GI tract to body fluids, and

$\dot{I}(t)$ is the rate of ingestion of activity of the radionuclide at time t .

FIGURE A.7 – Modèle dosimétrique pour le tractus gastro-intestinal (1).

Similarly, the model for a radioactive daughter produced in the GI tract from its ingested parent radionuclide is completely described by

$$\frac{d}{dt} q'_{ST}(t) = -\lambda_{ST}q'_{ST}(t) - \lambda'_R q'_{ST}(t) + \lambda'_R q_{ST}(t) \quad (6.2a)$$

$$\frac{d}{dt} q'_{SI}(t) = -\lambda_{SI}q'_{SI}(t) - \lambda'_R q'_{SI}(t) - \lambda_B q'_{SI}(t) + \lambda_{ST}q'_{ST}(t) + \lambda'_R q_{SI}(t) \quad (6.2b)$$

$$\frac{d}{dt} q'_{ULI}(t) = -\lambda_{ULI}q'_{ULI}(t) - \lambda'_R q'_{ULI}(t) + \lambda_{SI}q'_{SI}(t) + \lambda'_R q_{ULI}(t) \quad (6.2c)$$

$$\frac{d}{dt} q'_{LLI}(t) = -\lambda_{LLI}q'_{LLI}(t) - \lambda'_R q'_{LLI}(t) + \lambda_{ULI}q'_{ULI}(t) + \lambda'_R q_{LLI}(t) \quad (6.2d)$$

where λ'_R is the radioactive decay constant of the radionuclide in question;

$q'(t)$ is its activity in any compartment and $q(t)$ is the activity of its immediate parent.

The value of λ_B can be estimated from f_1 , the fraction of a stable element reaching the body fluids following ingestion:

$$\begin{aligned} \frac{\lambda_B}{\lambda_{SI} + \lambda_B} &= f_1 \\ \therefore \frac{f_1 \lambda_{SI}}{1 - f_1} &= \lambda_B \end{aligned} \quad (6.3)$$

Values of f_1 are given in the metabolic data for a number of classes of compounds of each individual element. For radioactive daughters, produced by decay of their parents in the GI tract, the value of f_1 used is usually that appropriate to the stable element of which the ingested radionuclide is an isotope (see Chapter 4). Where a value $f_1 = 1$ is given it is assumed that the radionuclide passes directly from the stomach to body fluids and does not pass through other sections of the gastrointestinal tract.

A system of equations similar to (6.1) and (6.2) can be derived that describe the activities of a chain of parent and daughter radionuclides, the activity of each daughter being determined by the activity of its predecessor in the chain. The metabolic behaviour of all the radioactive progeny is assumed to be the same as that of the ancestral radionuclide which was ingested.

6.3. Activity Transferred from the Respiratory System

The activity of an inhaled radionuclide in any section of the GI tract is described by eqns (6.1a)–(6.1d) in which the term $I(t)$ in eqn (6.1a) is the rate of entry of activity of the radionuclide to the GI tract from the respiratory system (Chapter 5). The activity of a daughter radionuclide in any section of the GI tract is described by eqns (6.2a)–(6.2d) with the addition of a term, $+I'(t)$, to the right hand side of eqn (6.2a). $I'(t)$ is the rate of entry of activity of the daughter radionuclide to the GI tract, the daughter having been produced by decay of its parent in the respiratory system. The value of f_1 for any daughter produced in the respiratory system is usually assumed to be the same as that of the parent radionuclide (Chapter 4).

FIGURE A.8 – Modèle dosimétrique pour le tractus gastro-intestinal (2).

6.4. Activity Transferred to Body Fluids

The activity transferred to body fluids is the integral over 50 years of $\lambda_B q_{SI}(t)$ for the parent and $\lambda_B q'_{SI}(t)$ for its daughter. Their evaluation is described in the Appendix.

6.5. Calculations of Committed Dose Equivalent, H_{50} , to Sections of the Gastrointestinal Tract

As described in Chapter 4, $H_{50,T}$ for any target organ T from a number of source organs S containing a mixture of radionuclides j is given by

$$H_{50,T} = 1.6 \times 10^{-10} \sum_S \sum_T \left[U_S \sum_i \text{SEE}(T \leftarrow S)_i \right]_j \quad \text{Sv} \quad (6.4)$$

where U_S is the total number of transformations in a source organ S over 50 years following intake of a radionuclide j , and

$\text{SEE}(T \leftarrow S)_i$ (in MeV g^{-1} per transformation) is the specific effective energy from radiations of type i originating in S .

When the source organ is a section of the GI tract, U is the integral over 50 years of appropriate values of $q(t)$ from eqn (6.1) and (6.2). Methods of calculating U for a parent radionuclide and its daughters in a section of the GI tract following ingestion of unit activity of the parent radionuclide are discussed further in the Appendix.

$\text{SEE}(T \leftarrow S)_i$, for any radionuclide j , is given by

$$\text{SEE}(T \leftarrow S)_i = \frac{Y_i E_i \text{AF}(T \leftarrow S)_i Q_i}{M_T} \text{ MeV g}^{-1} \text{ per transformation}$$

where Y_i is the yield of radiations of type i per transformation of radionuclide j ;

E_i (in MeV) is the average, or unique, energy of radiation i ;

$\text{AF}(T \leftarrow S)_i$ is the average fraction of energy absorbed in T from radiation i arising in S ;

Q_i is the quality factor appropriate for radiation i , and

M_T (in g) is the mass of the target organ.

$H_{50,T}$ is estimated for the walls of each section of the GI tract and it is convenient to consider values of SEE for non-penetrating (np) and penetrating (p) radiations separately. Non-penetrating radiations are, in this context, taken to be heavy recoil particles, fission fragments, α -particles and β -like radiations; penetrating radiations are taken to be x rays, γ rays and fission neutrons.

For both p and np radiations $H_{50,T}$ is calculated for the mucosal layer of each section of the GI tract. For p radiations the average dose to the walls of the tract is used as a measure of the dose to the mucosal layer. Thus, the value of SEE for any target section of the GI tract and for all emissions from radionuclide j within the tract is given by

$$\text{SEE} = \sum_{\text{np}} \frac{Y_{\text{np}} E_{\text{np}} Q_{\text{np}} \text{AF}(\text{ML} \leftarrow T)_{\text{np}}}{M_T^{\text{ML}}} + \sum_S \sum_p \frac{Y_p E_p Q_p \text{AF}(W \leftarrow S)_p}{M_T^W} \text{ MeV g}^{-1} \text{ per transformation}$$

FIGURE A.9 – Modèle dosimétrique pour le tractus gastro-intestinal (3).

where Y_{np} is the yield of a non-penetrating radiation per transformation of the radionuclide;

E_{np} (in MeV) is the average or unique energy of the non-penetrating radiation;

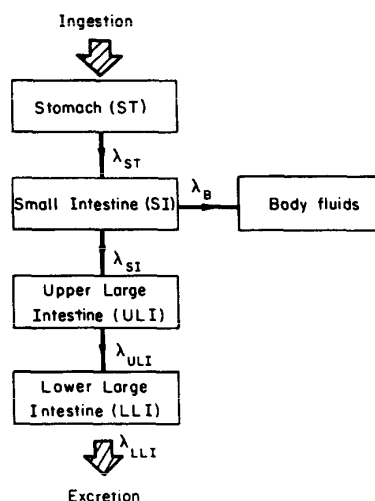
Q_{np} is 20 for recoil atoms, fission fragments and α -particles and 1 for electrons as described in Chapter 4.

$$\frac{AF(ML \leftarrow T)_{np}}{M_T^{ML}}$$

is the specific absorbed fraction for the mucosal layer of the section of the GI tract under consideration and is taken to be equal to

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{M_T^c} \cdot v,$$

where M_T^c (in g) is the mass of the contents of that section of the GI tract (Fig. 6.1) and v is a factor between 0 and 1 representing the degree to which these radiations penetrate the mucus. The factor $\frac{1}{2}$ is introduced because the dose at the surface of the contents will be approximately half that within their volume for np radiations. v is taken to be unity for β particles, zero for recoil atoms and 0.01 for α particles and fission



| Section of GI tract | Mass of walls* (g) | Mass of contents* (g) | Mean residence time (day) | λ day ⁻¹ |
|-----------------------------|--------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Stomach (ST) | 150 | 250 | 1/24 | 24 |
| Small Intestine (SI) | 640 | 400 | 4/24 | 6 |
| Upper Large Intestine (ULI) | 210 | 220 | 13/24 | 1.8 |
| Lower Large Intestine (LLI) | 160 | 135 | 24/24 | 1 |

* From ICRP Publication 23 (1975).

Fig. 6.1. Mathematical model used to describe the kinetics of radionuclides in the gastrointestinal tract

FIGURE A.10 – Modèle dosimétrique pour le tractus gastro-intestinal (4).

fragments. Although this latter factor is clearly arbitrary there is experimental evidence that its use is warranted (Sullivan *et al.*, 1960).

M_T^W (in g) is the mass of the walls of the target section concerned (Fig. 6.1)

Y_p is the yield of penetrating radiations per transformation of the radionuclide.

E_p (in MeV) is the average or unique energy of the penetrating radiation.

Q_p is 1 for photons and 10 for fission neutrons;

$AF(W \leftarrow S)_p$ is the fraction of the energy of a photon or fission neutron emitted in source organ S which is absorbed in the walls of the target section T concerned.

Values of $AF(W \leftarrow S)_p/M_T^W$, the specific absorbed fraction for photons, are given in *ICRP Publication 23*. Corresponding values for fission neutrons have been derived from data by Dillman and Jones (1975) and Ford *et al.* (1977).

For the general case of a number of radionuclides, including the case of an ingested parent together with its daughters produced in the tract, H_{50} is derived by the summation of U_S and SEE over all radionuclides and source organs, as described previously in Chapter 4. In the dosimetric data for each radionuclide collected in the Supplement to this report values of U_S are given for the ingested parent and for its radioactive daughters produced in the various sections of the GI tract. SEE values are also given for the various sections of the GI tract as target organs with the contents of these sections and other organs and tissues of the body as source organs.

References

- Dillman, L. T. and Jones, T. D. (1975). Internal dosimetry of spontaneously fissioning nuclides. *Health Phys.* **29**, 111–123.
- Eve, I. S. (1966). A review of the physiology of the gastrointestinal tract in relation to radiation doses from radioactive materials. *Health Phys.* **12**, 131–161.
See also Dolphin, G. W. and Eve, I. S. (1966). Dosimetry of the gastrointestinal tract. *Health Phys.* **12**, 163–172.
- Ford, M. R., Snyder, W. S., Dillman, L. T. and Watson, S. B. (1977). Maximum permissible concentration (MPC) values for spontaneously fissioning radionuclides. *Health Phys.* **33**, 35–43.
- ICRP Publication 23, Task Group Report on Reference Man*. Pergamon Press, Oxford, 1975.
- ICRP Publication 26, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Pergamon Press, Oxford, 1977.
- Sullivan, M. F., Hackett, P. L., George, L. A. and Thompson, R. C. (1960). Irradiation of the intestine by radioisotopes. *Radiat. Res.* **13**, 343–355.

FIGURE A.11 – Modèle dosimétrique pour le tractus gastro-intestinal (5).



Suite à : C1 C2 C3 ATP Evac.BR Autre :

Nom, Prénom : Date : Heure :

Date de naissance : Nom infirmier :

Service ou Entreprise :

Nom du Médecin du travail assurant le suivi catégorie A/B :

Renseignements donnés par le salarié :

Bâtiment : Tranche : Niveau :

Chantier ou activité :

Circonstances :

Heure supposée de l'incident : A défaut : heure entrée ZC : heure sortie ZC :

CONCLUSIONS

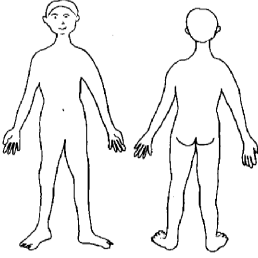



| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Localisation de la contamination</p>  <p>Radionucléides identifiés (Sous réserve de validation biologique)</p> <p>.....</p> <p>.....</p> <p>.....</p> | <p><input type="checkbox"/> CONTAMINATION VESTIMENTAIRE : Niveau en Bq Coordination QSPR prévenue : <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/> OUI</p> <p><i>En cas de contamination uniquement vestimentaire et simple déshabillage ne pas remplir la suite de la fiche</i></p> <p><input type="checkbox"/> EXPOSITION EXTERNE PAR CONTACT :</p> <div style="border: 1px dashed red; padding: 5px; margin: 5px 0;"> <input type="checkbox"/> > 500 Chocs/Seconde avec MIP10+SBM-2D <input type="checkbox"/> > 700 Chocs/Seconde/cm² avec SELECTRA </div> <p>Evaluation de dose à la peau : → <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/> OUI →</p> <div style="border: 1px dashed blue; padding: 5px; margin: 5px 0; text-align: center;">  Fiche pratique dosimétrie cutanée se  Activité Gratuite du xxx xxx xxx </div> <p style="text-align: center;">« Fiche pratique Détermination de la dosimétrie cutanée » (Hors UMA) <small>\\Atlas.edf.fr\co\33bla-dpn\Team.005\Medical.017\REFERENCIEL DOCUMENTAIRE\ - LDA du SST\Dossier contamination cutanée\Procedure</small></p> <p><input type="checkbox"/> EXPOSITION INTERNE :</p> <p><input type="checkbox"/> < Limite d'Interprétation Opérationnelle</p> <p><input type="checkbox"/> > Limite d'Interprétation Opérationnelle → <input type="checkbox"/> INCORPORATION :</p> <div style="border: 1px dashed red; padding: 5px; margin: 5px 0;"> <input type="checkbox"/> Incorporation < Seuil d'Evaluation de Dose <input type="checkbox"/> Incorporation ≥ Seuil d'Evaluation de Dose </div> <p><input type="checkbox"/> Médecin DMP prévenu le à h <i>(Le médecin DMP préviendra l'IRSN)</i></p> <p><input type="checkbox"/> Décision QSPR prévenue le à h</p> <p><input type="checkbox"/> PCD 1 prévenu le à h</p> |
| <p><input type="checkbox"/> SUITE A DONNER :</p> <p style="text-align: center;"> <input type="checkbox"/> ACCES ZC AUTORISE <input type="checkbox"/> INTERDICTION ZC → <input type="checkbox"/> Blocage MICADO <input type="checkbox"/> Dispense C3 </p> <div style="border: 1px dashed blue; padding: 5px; margin: 5px auto; text-align: center;">  Dispense C3.docx </div> | |

FIGURE A.12 – Fiche d'admission au bloc de décontamination en CNPE.



EDF Direction Production Ingénierie - Division Production Nucléaire

CNPE du BLAYAIS
UNITE DE MESURES ANTHROPOGAMMAMETRIQUES
COURRIER MEDICAL APRES CONTAMINATION

FORBLA-ATP Courrier médical après contamination

Indice 0

Page : 1/1

CNPE du BLAYAIS

Service Santé au Travail
BP 27
33820 St Ciers / Gironde
Tel : 05 57 33 33 70
Fax : 05 57 33 38 59

A l'attention du Docteur

Mon cher Confrère,

Le / / 20....., votre salarié(e) M/ Mme

Né(e) le / / de l'entreprise

A été pris en charge au Service de Santé au Travail du CNPE du Blayais, pour une suspicion de contamination détectée :

- Suite à un déclenchement de portique C1 C2 C3
- Dans les circonstances suivantes : ATP Evac BR Autre

Il a été réalisé :

- Une décontamination cutanée
- Un traitement de la contamination interne
- Une prescription d'examens radiotoxicologiques

En conclusion, cet événement correspond à une :

- CONTAMINATION EXTERNE
 - N'entraînant pas de dose équivalente à la peau > 50 mSv (seuil d'enregistrement)
 - Entraînant une dose équivalente à la peau* évaluée à :
- CONTAMINATION INTERNE
 - Entraînant une dose efficace engagée < 0.1 mSv (seuil de calcul de dose)
 - Entraînant une dose efficace engagée évaluée à (*) :
 - Contamination interne pour laquelle les résultats des examens radiotoxicologiques sont en attente.

() - Arrêté du 17 juillet 2013 : « Le médecin du travail communique à SISERI la dose efficace engagée calculée dès lors qu'il la juge significative et, dans tous les cas, lorsqu'elle est égale ou supérieure à 1 mSv ». Le niveau de dose proposé par EDF pour l'enregistrement dans l'application SISERI de l'IRSN est 0,5 mSv.*

Je reste à votre entière disposition pour toute information complémentaire et vous prie de recevoir, mon cher Confrère, l'expression de mes confraternelles sentiments.

Pièces jointes :

- Copie fiche d'admission au bloc de décontamination
- Copie rapports d'examens anthropogammamétriques
- Copie résultats d'analyses radiotoxicologiques

St Ciers / Gironde, le / /

FIGURE A.13 – Courrier médical après contamination en CNPE.

