



**HAL**  
open science

# Étude de la cinétique anthropogammamétrique dans l'évaluation de la dose efficace engagée après contamination interne par radionucléides émetteurs gamma en installation nucléaire de base

Mathieu Saily

► **To cite this version:**

Mathieu Saily. Étude de la cinétique anthropogammamétrique dans l'évaluation de la dose efficace engagée après contamination interne par radionucléides émetteurs gamma en installation nucléaire de base. Médecine humaine et pathologie. 2018. dumas-01906027

**HAL Id: dumas-01906027**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01906027>**

Submitted on 26 Oct 2018

**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 POUR LE  
DOCTORAT EN MEDECINE**

(Diplôme d'État)

PAR

SAILLY Mathieu

Né le 18/11/1990 A Cambrai (59)

Présentée et soutenue publiquement le 01<sup>er</sup> Octobre 2018

**ÉTUDE DE LA CINÉTIQUE ANTHROPOGAMMAMÉTRIQUE DANS  
L'ÉVALUATION DE LA DOSE EFFICACE ENGAGÉE APRÈS  
CONTAMINATION INTERNE PAR RADIONUCLÉIDES ÉMETTEURS  
GAMMA EN INSTALLATION NUCLÉAIRE DE BASE.**

PRÉSIDENT DE JURY : Monsieur le Professeur Jean-François GEHANNO

MEMBRES DU JURY : Monsieur le Professeur Luc THIBERVILLE

DIRECTEUR DE THÈSE : Madame le Docteur Laetitia ROLLIN, Madame le Docteur Isabelle LE-  
COUTEULX.

**ANNEE UNIVERSITAIRE 2017 - 2018**  
**U.F.R. DE MEDECINE ET DE PHARMACIE DE ROUEN**

-----

DOYEN : **Professeur Pierre FREGER**

ASSESEURS : **Professeur Michel GUERBET**  
**Professeur Benoit VEBER**  
**Professeur Pascal JOLY**  
**Professeur Stéphane MARRET**

<b>I - MEDECINE</b>
---------------------

**PROFESSEURS DES UNIVERSITES – PRATICIENS HOSPITALIERS**

Mr Frédéric <b>ANSELME</b>	HCN	Cardiologie
Mme Gisèle <b>APTER</b>	Havre	Pédopsychiatrie
Mme Isabelle <b>AUQUIT AUCKBUR</b>	HCN	Chirurgie plastique
Mr Fabrice <b>BAUER</b>	HCN	Cardiologie
Mme Soumeya <b>BEKRI</b>	HCN	Biochimie et biologie moléculaire
Mr Ygal <b>BENHAMOU</b>	HCN	Médecine interne
Mr Jacques <b>BENICHOU</b>	HCN	Bio statistiques et informatique médicale
Mr Olivier <b>BOYER</b>	UFR	Immunologie
Mme Sophie <b>CANDON</b>	HCN	Immunologie
Mr François <b>CARON</b>	HCN	Maladies infectieuses et tropicales
Mr Philippe <b>CHASSAGNE</b> ( <i>détachement</i> )	HCN	Médecine interne (gériatrie) – Détachement
Mr Vincent <b>COMPERE</b>	HCN	Anesthésiologie et réanimation chirurgicale
Mr Jean-Nicolas <b>CORNU</b>	HCN	Urologie
Mr Antoine <b>CUVELIER</b>	HB	Pneumologie
Mr Pierre <b>CZERNICHOW</b> ( <i>surnombre</i> )	HCH	Epidémiologie, économie de la santé
Mr Jean-Nicolas <b>DACHER</b>	HCN	Radiologie et imagerie médicale
Mr Stéfan <b>DARMONI</b>	HCN	Informatique médicale et techniques de communication

Mr Pierre <b>DECHELOTTE</b>	HCN	Nutrition
Mr Stéphane <b>DERREY</b>	HCN	Neurochirurgie
Mr Frédéric <b>DI FIORE</b>	CB	Cancérologie
Mr Fabien <b>DOGUET</b>	HCN	Chirurgie Cardio Vasculaire
Mr Jean <b>DOUCET</b>	SJ	Thérapeutique - Médecine interne et gériatrie
Mr Bernard <b>DUBRAY</b>	CB	Radiothérapie
Mr Philippe <b>DUCROTTE</b>	HCN	Hépto-gastro-entérologie
Mr Frank <b>DUJARDIN</b>	HCN	Chirurgie orthopédique - Traumatologique
Mr Fabrice <b>DUPARC</b>	HCN	Anatomie - Chirurgie orthopédique et traumatologique
Mr Eric <b>DURAND</b>	HCN	Cardiologie
Mr Bertrand <b>DUREUIL</b>	HCN	Anesthésiologie et réanimation chirurgicale
Mme Hélène <b>ELTCHANINOFF</b>	HCN	Cardiologie
Mr Manuel <b>ETIENNE</b>	HCN	Maladies infectieuses et tropicales
Mr Thierry <b>FREBOURG</b>	UFR	Génétique
Mr Pierre <b>FREGER</b>	HCN	Anatomie - Neurochirurgie
Mr Jean François <b>GEHANNO</b>	HCN	Médecine et santé au travail
Mr Emmanuel <b>GERARDIN</b>	HCN	Imagerie médicale
Mme Priscille <b>GERARDIN</b>	HCN	Pédopsychiatrie
M. Guillaume <b>GOURCEROL</b>	HCN	Physiologie
Mr Dominique <b>GUERROT</b>	HCN	Néphrologie
Mr Olivier <b>GUILLIN</b>	HCN	Psychiatrie Adultes
Mr Didier <b>HANNEQUIN</b>	HCN	Neurologie
Mr Fabrice <b>JARDIN</b>	CB	Hématologie
Mr Luc-Marie <b>JOLY</b>	HCN	Médecine d'urgence
Mr Pascal <b>JOLY</b>	HCN	Dermato – Vénérologie
Mme Bouchra <b>LAMIA</b>	Havre	Pneumologie
Mme Annie <b>LAQUERRIERE</b>	HCN	Anatomie et cytologie pathologiques
Mr Vincent <b>LAUDENBACH</b>	HCN	Anesthésie et réanimation chirurgicale
Mr Joël <b>LECHEVALLIER</b>	HCN	Chirurgie infantile
Mr Hervé <b>LEFEBVRE</b>	HB	Endocrinologie et maladies métaboliques
Mr Thierry <b>LEQUERRE</b>	HB	Rhumatologie
Mme Anne-Marie <b>LEROI</b>	HCN	Physiologie
Mr Hervé <b>LEVESQUE</b>	HB	Médecine interne

Mme Agnès <b>LIARD-ZMUDA</b>	HCN	Chirurgie Infantile
Mr Pierre Yves <b>LITZLER</b>	HCN	Chirurgie cardiaque
Mr Bertrand <b>MACE</b>	HCN	Histologie, embryologie, cytogénétique
M. David <b>MALTETE</b>	HCN	Neurologie
Mr Christophe <b>MARGUET</b>	HCN	Pédiatrie
Mme Isabelle <b>MARIE</b>	HB	Médecine interne
Mr Jean-Paul <b>MARIE</b>	HCN	Oto-rhino-laryngologie
Mr Loïc <b>MARPEAU</b>	HCN	Gynécologie - Obstétrique
Mr Stéphane <b>MARRET</b>	HCN	Pédiatrie
Mme Véronique <b>MERLE</b>	HCN	Epidémiologie
Mr Pierre <b>MICHEL</b>	HCN	Hépto-gastro-entérologie
M. Benoit <b>MISSET</b>	HCN	Réanimation Médicale
Mr Jean-François <b>MUIR</b> ( <i>urnombre</i> )	HB	Pneumologie
Mr Marc <b>MURAINÉ</b>	HCN	Ophtalmologie
Mr Philippe <b>MUSETTE</b>	HCN	Dermatologie - Vénérologie
Mr Christophe <b>PEILLON</b>	HCN	Chirurgie générale
Mr Christian <b>PFISTER</b>	HCN	Urologie
Mr Jean-Christophe <b>PLANTIER</b>	HCN	Bactériologie - Virologie
Mr Didier <b>PLISSONNIER</b>	HCN	Chirurgie vasculaire
Mr Gaëtan <b>PREVOST</b>	HCN	Endocrinologie
Mr Jean-Christophe <b>RICHARD</b> ( <i>détachement</i> )	HCN	Réanimation médicale - Médecine d'urgence
Mr Vincent <b>RICHARD</b>	UFR	Pharmacologie
Mme Nathalie <b>RIVES</b>	HCN	Biologie du développement et de la reproduction
Mr Horace <b>ROMAN</b>	HCN	Gynécologie - Obstétrique
Mr Jean-Christophe <b>SABOURIN</b>	HCN	Anatomie - Pathologie
Mr Guillaume <b>SAVOYE</b>	HCN	Hépto-gastrologie
Mme Céline <b>SAVOYE-COLLET</b>	HCN	Imagerie médicale
Mme Pascale <b>SCHNEIDER</b>	HCN	Pédiatrie
Mr Michel <b>SCOTTE</b>	HCN	Chirurgie digestive
Mme Fabienne <b>TAMION</b>	HCN	Thérapeutique
Mr Luc <b>THIBERVILLE</b>	HCN	Pneumologie
Mr Christian <b>THUILLEZ</b> ( <i>urnombre</i> )	HB	Pharmacologie
Mr Hervé <b>TILLY</b>	CB	Hématologie et transfusion
M. Gilles <b>TOURNEL</b>	HCN	Médecine Légale

Mr Olivier <b>TROST</b>	HCN	Chirurgie Maxillo-Faciale
Mr Jean-Jacques <b>TUECH</b>	HCN	Chirurgie digestive
Mr Jean-Pierre <b>VANNIER</b> ( <i>surnombre</i> )	HCN	Pédiatrie génétique
Mr Benoît <b>VEBER</b>	HCN	Anesthésiologie - Réanimation chirurgicale
Mr Pierre <b>VERA</b>	CB	Biophysique et traitement de l'image
Mr Eric <b>VERIN</b>	HB	Service Santé Réadaptation
Mr Eric <b>VERSPYCK</b>	HCN	Gynécologie obstétrique
Mr Olivier <b>VITTECOQ</b>	HB	Rhumatologie
Mme Marie-Laure <b>WELTER</b>	HCN	Physiologie

### **MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES – PRATICIENS HOSPITALIERS**

Mme Noëlle <b>BARBIER-FREBOURG</b>	HCN	Bactériologie – Virologie
Mme Carole <b>BRASSE LAGNEL</b>	HCN	Biochimie
Mme Valérie <b>BRIDOUX HUYBRECHTS</b>	HCN	Chirurgie Vasculaire
Mr Gérard <b>BUCHONNET</b>	HCN	Hématologie
Mme Mireille <b>CASTANET</b>	HCN	Pédiatrie
Mme Nathalie <b>CHASTAN</b>	HCN	Neurophysiologie
Mme Sophie <b>CLAEYSSSENS</b>	HCN	Biochimie et biologie moléculaire
Mr Moïse <b>COEFFIER</b>	HCN	Nutrition
Mr Serge <b>JACQUOT</b>	UFR	Immunologie
Mr Joël <b>LADNER</b>	HCN	Epidémiologie, économie de la santé
Mr Jean-Baptiste <b>LATOUCHE</b>	UFR	Biologie cellulaire
Mr Thomas <b>MOUREZ</b>	HCN	Virologie
Mr Gaël <b>NICOLAS</b>	HCN	Génétique
Mme Muriel <b>QUILLARD</b>	HCN	Biochimie et biologie moléculaire
Mme Laëtitia <b>ROLLIN</b>	HCN	Médecine du Travail
Mr Mathieu <b>SALAUN</b>	HCN	Pneumologie
Mme Pascale <b>SAUGIER-VEBER</b>	HCN	Génétique
Mme Anne-Claire <b>TOBENAS-DUJARDIN</b>	HCN	Anatomie
Mr David <b>WALLON</b>	HCN	Neurologie

### **PROFESSEUR AGREGE OU CERTIFIE**

Mr Thierry <b>WABLE</b>	UFR	Communication
Mme Mélanie <b>AUVRAY-HAMEL</b>	UFR	Anglais

Par délibération en date du 03 mars 1967, la faculté a arrêté que les opinions émises dans les dissertations qui lui seront présentées doivent être considérées comme propres à leurs auteurs et qu'elle n'entend leur donner aucune approbation ni improbation.

## REMERCIEMENTS

Remerciements aux membres du jury :

**Monsieur le Professeur Jean François Gehanno**

Professeur universitaire, praticien hospitalier – CHU de Rouen

Pour votre grande disponibilité et l'accueil que vous nous avez réservé lors de notre passage dans votre service. Ce fut un réel plaisir et une expérience enrichissante de travailler dans votre service. Pour vos enseignements et votre implication dans la coordination de la spécialité. Veuillez trouver ici l'expression de mon plus grand respect.

**Monsieur le Professeur Luc Thiberville**

Professeur universitaire, praticien hospitalier – CHU de Rouen

Nous vous sommes reconnaissants d'apporter vos connaissances à la critique de ce travail.

**Madame le Docteur Laetitia Rollin**

Maitre de conférences universitaire, praticien hospitalier – CHU de Rouen

**Madame le Docteur Isabelle Le-Couteulx**

Médecin du Travail, CNPE de Paluel EDF

C'est un honneur que vous ayez accepté de siéger au jury d'évaluation de ce travail, soyez en tous remercié.

Je tiens à remercier :

**Toute l'équipe du service de santé au travail du CNPE de Paluel** pour l'accueil chaleureux au sein du service et l'aide à la réalisation de ce travail. Recevez tous et toutes ma plus grande gratitude.

**Monsieur le Docteur Bernard Landry**, pour les améliorations régulières apportées à l'outil de calcul utilisé pour ce travail.

**Madame le Docteur Agnès KIRBY** et **Madame le Docteur Michèle GONIN** pour nous avoir permis d'utiliser les données des examens radiotoxicologiques.

**Les Médecins du travail des CNPE**, pour avoir accepté de consacrer un peu de votre temps en répondant à nos demandes.



**Madame Véronique Carcaillon** pour son aide à la recherche bibliographique.

Je remercie infiniment les deux directrices de cette thèse :

**Madame le Docteur Isabelle Le-Couteulx**

Médecin du Travail, CNPE de Paluel EDF

Vos connaissances, votre précision dans le travail et votre pédagogie vous honorent. Vous m'avez fait l'honneur de me confier ce sujet de thèse et d'accepter de diriger et d'encadrer ce travail. Votre bienveillance et votre rigueur ont été d'une aide inestimable pour l'aboutissement de ce travail. Soyez remercié pour votre disponibilité, vos conseils précieux et votre soutien pendant la réalisation de cette thèse. J'ai particulièrement apprécié de travailler à vos côtés. Veuillez trouver ici l'expression de mes sincères remerciements et de mon plus profond respect.

**Madame le Docteur Laetitia Rollin**

Maitre de conférences universitaire, praticien hospitaliser – CHU de Rouen

Pour avoir accepté la direction de ce travail, pour votre disponibilité, votre gentillesse et vos précieux conseils. La pertinence de vos remarques et la justesse de vos corrections, sont pour moi un exemple de rigueur. Soyez en profondément remercié.

Enfin, je souhaiterais adresser un remerciement particulier,

A mes parents, pour m'avoir permis de réaliser les études que je souhaitais ;

Aux cinq V, pour m'avoir accueilli comme l'un des leurs ;

A ma famille, pour leur soutien ;

A mes amis, pour leurs encouragements ;

A ma femme, Jennifer, pour ton soutien quotidien, ta présence, tes nombreuses relectures, ton aide à la réalisation de ce projet, et pour les autres à venir...

*Guérir parfois, soulager souvent, écouter toujours.*

## SERMENT D'HIPPOCRATE

*« Au moment d'être admis(e) à exercer la médecine, je promets et je jure d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité. Mon premier souci sera de rétablir, de préserver ou de promouvoir la santé dans tous ses éléments, physiques et mentaux, individuels et sociaux.*

*Je respecterai toutes les personnes, leur autonomie et leur volonté, sans aucune discrimination selon leur état ou leurs convictions. J'interviendrai pour les protéger si elles sont affaiblies, vulnérables ou menacées dans leur intégrité ou leur dignité. Même sous la contrainte, je ne ferai pas usage de mes connaissances contre les lois de l'humanité. J'informerai les patients des décisions envisagées, de leurs raisons et de leurs conséquences.*

*Je ne tromperai jamais leur confiance et n'exploiterai pas le pouvoir hérité des circonstances pour forcer les consciences. Je donnerai mes soins à l'indigent et à quiconque me les demandera. Je ne me laisserai pas influencer par la soif du gain ou la recherche de la gloire.*

*Admis(e) dans l'intimité des personnes, je tairai les secrets qui me seront confiés. Reçu(e) à l'intérieur des maisons, je respecterai les secrets des foyers et ma conduite ne servira pas à corrompre les mœurs. Je ferai tout pour soulager les souffrances. Je ne prolongerai pas abusivement les agonies. Je ne provoquerai jamais la mort délibérément.*

*Je préserverai l'indépendance nécessaire à l'accomplissement de ma mission. Je n'entreprendrai rien qui dépasse mes compétences. Je les entretiendrai et les perfectionnerai pour assurer au mieux les services qui me seront demandés.*

*J'apporterai mon aide à mes confrères ainsi qu'à leurs familles dans l'adversité. Que les hommes et mes confrères m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses ; que je sois déshonoré(e) et méprisé(e) si j'y manque ».*

## RÉSUMÉ

**Titre : Étude de la cinétique anthropogammamétrique dans l'évaluation de la dose efficace engagée après contamination interne par radionucléides émetteurs Gamma en installation nucléaire de base.**

**Résumé :** Bien que les expositions internes en centrale nucléaire soient peu fréquentes et que l'impact dosimétrique associé soit faible, elles sont une source de préoccupation très forte pour les intervenants. Jusqu'alors, l'évaluation et l'enregistrement de la dose efficace engagée (DEE) ne se faisaient qu'à partir d'un niveau d'exposition suspecté à l'anthropogammamétrie (ATP) correspondant à une DEE de 0.5 mSv, ceci par l'analyse d'examens radiotoxicologiques (RTX) urines et selles. L'ATP ne servait alors que d'examen de suivi de la contamination interne à titre qualitatif. L'évolution réglementaire et sociétale se marque par un souhait des intervenants exposés au risque radiologique et de leur médecin du travail de pouvoir connaître le niveau de DEE à partir de 0.1 mSv tel qu'il est appliqué pour l'enregistrement des expositions externes. De plus, l'acceptation et l'observance des examens RTX par les salariés ne sont pas satisfaisantes. L'objectif de ce travail est donc de proposer une méthode d'évaluation de la DEE après exposition interne dès lors qu'elle est estimée *a minima* à 0,1 mSv, et ce, en utilisant uniquement les résultats des examens anthropogammamétriques successifs réalisés après l'évènement contaminant.

Une analyse de 149 cas de contamination interne survenus sur les sites nucléaires Français entre 2008 et 2015 a été menée en contrôle croisé, correspondant à plus de 1000 mesures corps entier. Ce travail a été réalisé conformément aux recommandations de la HAS et du guide IDEAS. 30 cas de contamination n'ont pu être analysés en raison d'un nombre insuffisant de mesures. Parmi les 119 cas restants, 21 correspondaient à l'inhalation de particules chaudes. Pour 66 cas, un modèle d'incorporation décrit par la CIPR et cohérent avec les recommandations a pu être déterminé. Pour les 32 cas restants, la détermination d'un modèle n'a pu être faite en raison d'une activité mesurée trop faible, d'un nombre de mesures insuffisantes ou d'une recontamination au cours du suivi.

A chaque fois qu'un modèle d'incorporation décrit par la Commission internationale de protection radiologique a pu être déterminé, il s'agissait dans 91% des cas d'un modèle par inhalation. Pour 46% d'entre eux, il s'agissait de composés de type S 5 $\mu$ m, pour 33% de composés type S 1 $\mu$ m et pour 12% de composés polydispersés. Par ailleurs, nous avons observé des modèles par ingestion pour 9% des cas. De manière isolée ou non, nous avons trouvé du Co<sup>58</sup> dans 55% des cas, du Co<sup>60</sup> dans 48% et de l'Ag<sup>110m</sup> dans 26%. Nous avons observé du Cs<sup>137</sup>, de Sb<sup>124</sup>, du Zn-Nb<sup>95</sup>, du Cr<sup>51</sup> et du Mn<sup>54</sup>.

En dehors des cas d'inhalation de particule chaude, l'évaluation de l'activité incorporée issue des mesures ATP était comparable à celle issue des analyses de selles dans la moitié des cas. Dans l'autre moitié, l'activité estimée à partir des examens de selles était très inférieure à celle évaluée par l'ATP.

Au final, 34/66 cas auraient entraîné une DEE supérieure à 0.1mSv mais inférieure à 0.5mSv. La cinétique des examens ATP permet d'identifier un modèle d'incorporation et ainsi d'évaluer une dose interne, dès lors que l'activité incorporée correspond à une DEE de 0.1mSv, sous réserve d'un temps de comptage et d'un nombre de mesures suffisant.

**Mots-clés :** médecine du travail, radioprotection, centrale nucléaire, contamination interne, anthropogammamétrie, dose efficace engagée.

## ABSTRACT

**Title:** Evaluation of internal exposure in French nuclear power plants based on whole body counting.

**Abstract:** At EDF, dose assessments for internal contamination were so far mainly done by biologists using *in vitro* measurements. Several factors lead to change this practice: French regulations which attribute this assessment to occupational physicians, accreditation of whole body measurements which legitimates the use of this type of analysis. The objective of this work was to estimate the interest of whole body measurements for internal contaminations.

An analysis of 149 cases of internal contamination occurred in French nuclear power plants between 2008 and 2015 was conducted. More than one thousand whole body counting spectrums were treated with double-checking. The analysis was led by using the recommendations of the HAS and the IDEAS guidelines. 30 cases could not be analysed because of an insufficient number of whole body measures.

Among 119 remaining cases, 21 cases corresponded to an inhalation model of hot particles where the assessment of activity needed another method. For 32 cases, the activity was too low or the number of measurements was insufficient. For the 66 remaining cases, we were able to exactly identify an incorporation model described by ICRP. RGP and Chi-squared test were valid in 79% of cases and RGP alone in remaining 21%. In a nutshell, we observed contaminations corresponding to an inhalation type S model for 91% of cases. In 46% of cases, it was 5 µm DAMA compounds, and in 33% it was 1µm DAMA compounds. We have also identified inhalation of polydisperse aerosol (DAMA 1 or 5 µm + hot particles) in 12% of cases. Furthermore, we observed contaminations corresponding to an ingestion model for 9% of cases. In an isolated way or not, we found Cobalt 58 in 55% of the cases, Cobalt 60 in 48% of the cases and Ag110m in 26% of the cases. We also observed Caesium 137, Antimony 124, Zirconium-Nobium 95, Chromium 51 and Manganese 54.

Except the cases of inhalation of hot particle, the evaluation of the incorporated activity by whole body measurements was comparable to faeces analysis in half of cases. In the other half, the estimated activity from faecal examinations was lower than activity estimated by the whole-body count.

Finally, 34 cases resulted in a committed effective dose superior to 0,1mSv but less than 0.5mSv. The whole-body measurements allowed to identify an incorporation model if the time of counting and the number of measure are sufficient.

**Key words:** Occupational medicine, radiation protection, nuclear power plant, internal contamination, whole body measurements, committed effective dose.

## GLOSSAIRE

<b>AT</b>	Arrêt de tranche
<b>ATP</b>	Anthropogammamétrie
<b>CADOR</b>	Calcul de Dose Réglementaire
<b>ALARA</b>	<i>As Low As Reasonably Achievable</i> , aussi bas que raisonnablement possible.
<b>CIPR</b>	Commission Internationale de Protection Radiologique
<b>CNPE</b>	Centrale Nucléaire de Production d'Electricité
<b>DAMA</b>	Diamètre Aérodynamique Médian en Activité
<b>DPUI</b>	Dose efficace engagée par Unité d'Incorporation
<b>EDF</b>	Électricité de France
<b>EURADOS</b>	European Radiation Dosimetry Group
<b>GV</b>	Générateur de Vapeur
<b>IAEA</b>	International Atomic Energy Agency
<b>ICRP</b>	International Commission on Radiological Protection
<b>INB</b>	Installation Nucléaire de Base
<b>IRSN</b>	Institut de Radioprotection et de Sûreté nucléaire
<b>LD</b>	Limite de Détection
<b>REP</b>	Réacteur à Eau sous Pression
<b>RCV</b>	Circuit de contrôle chimique et volumétrique
<b>RTX</b>	Radiotoxicologiques
<b>SISERI</b>	Système d'Information de la Surveillance de l'Exposition aux Rayonnements Ionisants
<b>S</b>	<i>Slow</i> , type d'absorption lent
<b>SF</b>	<i>Scattering factor</i> , il permet de calculer l'incertitude sur la mesure pour un intervalle de confiance à 95%.

# SOMMAIRE

<b>SOMMAIRE .....</b>	<b>12</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>16</b>
<b>PREMIERE PARTIE : CONNAISSANCES ACTUELLES : PHYSIQUES, CHIMIQUES ET BIOLOGIQUES SUR LA CONTAMINATION INTERNE.....</b>	<b>17</b>
<b>1 FONCTIONNEMENT D'UNE CENTRALE NUCLEAIRE .....</b>	<b>17</b>
1.1 LES DIFFERENTES CENTRALES EN FRANCE .....	17
1.2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT .....	18
1.3 LE CIRCUIT PRIMAIRE, ORIGINE DE LA CONTAMINATION.....	18
1.4 LE CIRCUIT SECONDAIRE .....	19
1.5 LE CIRCUIT DE REFROIDISSEMENT .....	20
1.6 MAINTENANCE DE LA CENTRALE (ARRET DE TRANCHE).....	20
<b>2 ORIGINE DE LA CONTAMINATION EN CENTRALE NUCLEAIRE .....</b>	<b>21</b>
2.1 PRODUITS D'ACTIVATION.....	21
2.1.1 <i>Formation des produits d'érosion, corrosion du circuit primaire</i> .....	21
2.1.2 <i>Activation des produits d'érosion, de corrosion du circuit primaire</i> .....	23
2.1.3 <i>Radionucléides retrouvés dans le circuit primaire</i> .....	23
2.2 PRODUITS DE FISSION .....	26
2.3 FORME PHYSICO CHIMIQUE ET GRANULOMETRIE DES RADIOCONTAMINANTS.....	27
2.3.1 <i>Forme chimique</i> .....	27
2.3.2 <i>Granulométrie</i> .....	28
2.4 MODALITES DE PURIFICATION DU CIRCUIT PRIMAIRE .....	28
2.4.1 <i>Le circuit de contrôle volumétrique et chimique (Système RCV)</i> .....	28
2.4.2 <i>Etape clé : la mise à l'arrêt à froid</i> .....	29
<b>3 NOTIONS ELEMENTAIRES DE PHYSIQUE NUCLEAIRE .....</b>	<b>31</b>
3.1 LES DIFFERENTS TYPES DE RAYONNEMENTS IONISANTS.....	31
3.1.1 <i>Les rayonnements directement ionisants</i> .....	31
3.1.2 <i>Les rayonnements indirectement ionisants</i> .....	31
3.2 PHYSIQUE NUCLEAIRE .....	32
3.2.1 <i>Notions de base</i> .....	32
3.2.2 <i>Unités de mesure utilisées en radioprotection</i> .....	33
3.2.3 <i>Modes d'exposition</i> .....	33
<b>4 EFFETS DES FAIBLES DOSES DE RAYONNEMENTS IONISANTS SUR L'HOMME.....</b>	<b>34</b>
4.1 RADIOBIOLOGIE DES FAIBLES DOSES.....	35
4.2 RADIOSENSIBILITE INDIVIDUELLE .....	36
4.3 RELATION DOSE-EFFET DES RAYONNEMENTS IONISANTS AUX FAIBLES DOSES .....	37
4.4 PROTECTION DES TRAVAILLEURS .....	38
<b>5 CHAINE DE SURVEILLANCE DE LA CONTAMINATION INTERNE .....</b>	<b>39</b>
5.1 ORGANISATION DE LA ZONE CONTROLEE.....	39
5.2 STATIONS DE SURVEILLANCE.....	40
5.3 PORTIQUES DE CONTROLE RADIOLOGIQUE .....	40

<b>6</b>	<b>L'ANTHROPOGAMMAMMETRIE.....</b>	<b>41</b>
6.1	PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT .....	41
6.2	MATERIELS.....	41
6.3	LA MESURE ATP.....	43
6.4	VALIDATION TECHNIQUE DE LA MESURE .....	43
6.4.1	<i>Spectre ATP normal</i> .....	43
6.4.2	<i>Spectre ATP anormal</i> .....	44
6.5	EVALUATION DE LA DOSE EFFICACE ENGAGEE LIEE A LA CONTAMINATION INTERNE.....	46
6.5.1	<i>Evaluation de l'activité incorporée</i> .....	46
6.5.2	<i>Utilisation des DPUI</i> .....	47
<b>7</b>	<b>CINETIQUE D'UNE CONTAMINATION INTERNE.....</b>	<b>47</b>
7.1	MODELES METABOLIQUES .....	48
7.2	MODELE PAR INHALATION .....	49
7.2.1	<i>Dépôt des aérosols</i> .....	50
7.2.2	<i>Translocation - Epuraton</i> .....	52
7.3	MODELE PAR INGESTION .....	54
7.4	COMPARAISON DES MODELES D'INCORPORATION.....	55
<b>8</b>	<b>EXAMENS RADIOTOXICOLOGIQUES .....</b>	<b>56</b>
8.1	NATURE DES EXAMENS RADIOTOXICOLOGIQUES .....	56
8.1.1	<i>Les selles</i> .....	56
8.1.2	<i>Les urines</i> .....	56
8.2	LES MODELES BIOCINETIQUES.....	57
<b>9</b>	<b>BILAN DES EXPOSITIONS INTERNES.....</b>	<b>59</b>
9.1	BILAN IRSN.....	59
9.2	BILAN EDF.....	59
<b>10</b>	<b>PRINCIPES ACTUELS D'EVALUATION DE LA DOSE INTERNE ET PERSPECTIVES FUTURES .....</b>	<b>60</b>
10.1	PROTOCOLE DE DETECTION ET DE PRISE EN CHARGE D'UNE CONTAMINATION .....	60
10.2	DECONTAMINATION AU SST .....	61
10.3	CONTROLE DE LA CONTAMINATION INTERNE .....	62
<b>DEUXIEME PARTIE : ELABORATION ET VALIDATION D'UNE METHODE D'EVALUATION DE LA DEE A PARTIR DU SUIVI ATP .....</b>		
<b>63</b>		
<b>1</b>	<b>OBJECTIF DE L'ETUDE .....</b>	<b>63</b>
<b>2</b>	<b>RECUEIL DES DONNEES .....</b>	<b>63</b>
2.1	RECENSEMENT DES CAS DE CONTAMINATION INTERNE.....	63
2.2	INTERPRETATION DES EXAMENS ATP .....	64
<b>3</b>	<b>METHODE .....</b>	<b>64</b>
3.1	APPLICATION DE LA RECOMMANDATION 61 DE LA HAS : TEST « RBP ».....	64
3.2	REALISATION DU TEST DU $\chi^2$ AVEC L'OUTIL CADOR.....	67
3.2.1.1	Le test du $\chi^2$ .....	67
3.2.1.2	Les incertitudes de mesures .....	69
3.3	ESTIMATION DE L'ACTIVITE INCORPOREE ET CALCUL DE LA DOSE EFFICACE ENGAGEE .....	71
<b>4</b>	<b>RESULTATS.....</b>	<b>72</b>

4.1	SYNTHESE DES RESULTATS.....	72
4.2	ILLUSTRATION DES DIFFERENTS MODELES D'INCORPORATIONS IDENTIFIES PAR L'ETUDE .....	76
4.2.1	<i>Contamination par inhalation</i> .....	76
4.2.1.1	Exemples de modèle Inhalation granulométrie 5 µm .....	76
4.2.1.2	Exemples de modèle Inhalation granulométrie 1 µm .....	80
4.2.1.3	Exemple de modèle mixte Inhalation 1/5 µm + particules chaudes.....	83
4.2.1.4	Série de contaminations .....	84
4.2.2	<i>Contamination par ingestion</i> .....	84
4.2.2.1	Exemple de modèle ingestion Co58 et Co60 .....	85
4.2.2.2	Exemple de modèle ingestion Ag110m .....	86
4.2.2.3	Série de contaminations .....	86
<b>5</b>	<b>DISCUSSION</b> .....	<b>86</b>
5.1	LE CAS DES PARTICULES CHAUDES.....	87
5.2	INFLUENCE DES JOURS DE MESURES .....	89
5.2.1	<i>Influence des mesures ATP réalisées à JO</i> .....	89
5.2.2	<i>Influence du nombre de mesures et de leur date de réalisation</i> .....	89
5.3	INFLUENCE DU TEMPS DE COMPTAGE .....	90
5.3.1	<i>Par rapport à la limite de détection</i> .....	90
5.3.1.1	Distinction des modèles ingestion et inhalation.....	90
5.3.1.2	Distinction des modèles ingestion et particule chaude .....	92
5.4	INFLUENCE DE LA FORME CHIMIQUE .....	92
5.5	DISCUSSION SUR LE CHOIX DE LA GRANULOMETRIE .....	92
5.6	EVALUATION DES DOSES SUPERIEURES A 0.1 MSV .....	96
5.7	PROPOSITION D'UN PROTOCOLE CLINIQUE DE SUIVI DES CONTAMINATIONS INTERNES .....	96
5.8	DISCUSSION DE L'INTERET COMPARE DES RESULTATS DE LA CINETIQUE ATP ET DES EXAMENS RADIOTOXICOLOGIQUES URINES ET SELLES POUR DETERMINER L'ACTIVITE INCORPOREE .....	98
5.8.1	<i>Détermination du modèle biocinétique d'incorporation</i> .....	98
5.8.2	<i>Comparaison des résultats d'activité incorporée évalués à partir des examens radiotoxicologiques et anthropogammamétriques</i> .....	101
5.8.2.1	Synthèse de la comparaison .....	102
5.8.2.2	Qualité des recueils .....	104
5.8.3	<i>Incertitudes sur les mesures radiotoxicologiques</i> .....	105
5.8.4	<i>Comparaison des limites de détections des examens radiotoxicologiques et ATP</i> .....	106
5.8.5	<i>Discussion sur les paramètres d'incorporation utilisés</i> .....	107
5.8.6	<i>Intérêt des examens radiotoxicologiques</i> .....	110
<b>6</b>	<b>CONCLUSION</b> .....	<b>111</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>112</b>
	<b>ANNEXES</b> .....	<b>117</b>
	<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>123</b>
	<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>126</b>



## **LISTE DES ANNEXES**

*Annexe 1 : Synthèse du suivi ATP des contaminations internes et les hypothèses d'incorporation retenues.*

*Annexe 2 : Exemple de compte-rendu d'examen ATP*

## INTRODUCTION

Bien que les expositions internes en centrale nucléaire soient peu fréquentes et que la dosimétrie associée soit faible, la contamination interne a toujours un impact psychologique très particulier et reste une source de préoccupation très forte pour les intervenants dès lors qu'elle est détectée, voire simplement suspectée.

Jusqu'à présent, lors de l'exposition interne d'un salarié, l'évaluation et l'enregistrement de la dose efficace engagée (DEE) ne se faisait qu'à partir d'un niveau d'exposition suspecté à l'anthropogammamétrie (ATP) correspondant à une DEE de 0.5 mSv ; en dessous, la contamination interne était considérée comme non significative. Elle nécessitait la réalisation et l'analyse d'examens radiotoxicologiques des urines et des selles pendant les 72h qui suivaient l'évènement contaminant. L'ATP ne servait alors que d'examen de suivi de la contamination interne à titre qualitatif.

L'évolution réglementaire récente impose, par l'arrêté du 17 juillet 2013 (Article R 4451-86 du code du Travail), la réalisation d'une évaluation de la DEE par le médecin du Travail dès qu'une contamination interne est suspectée, à des fins d'enregistrement exhaustif de toutes les expositions internes d'un salarié.

Ce travail s'inscrit alors dans l'un des principes fondamentaux de la radioprotection : le principe *ALARA*. L'objectif étant d'être le plus exhaustif possible sur l'enregistrement des expositions aux rayonnements ionisants. Il répond également à une pression sociale forte dont l'objectif final est d'améliorer les conditions d'hygiène et de sécurité au travail. En effet, l'évolution sociétale se marque par un souhait des intervenants exposés au risque radiologique et de leur médecin du travail de pouvoir connaître le niveau de DEE à partir de 0.1 mSv tel qu'il est appliqué pour l'enregistrement des expositions externes.

Les évolutions techniques et informatiques de l'anthropogammamétrie ainsi que les compétences métrologiques des personnels des services médicaux reconnus par le COFRAC, permettent une identification des radionucléides et une quantification de leur activité avec une limite de détection basse (300 Bq).

De plus, l'observance aléatoire des salariés à collecter leurs urines et leurs selles pendant 72h entraînant alors un risque de minimiser l'activité incorporée nous oriente vers la réalisation de mesures *in vivo*.

L'objectif de ce travail est donc d'étudier une méthode d'évaluation de la DEE après exposition interne dès lors qu'elle est estimée à minima à 0,1 mSv, et ce, en utilisant uniquement les résultats des examens anthropogammamétriques successifs réalisés après l'évènement contaminant.

# **Première Partie : Connaissances actuelles : physiques, chimiques et biologiques sur la contamination interne**

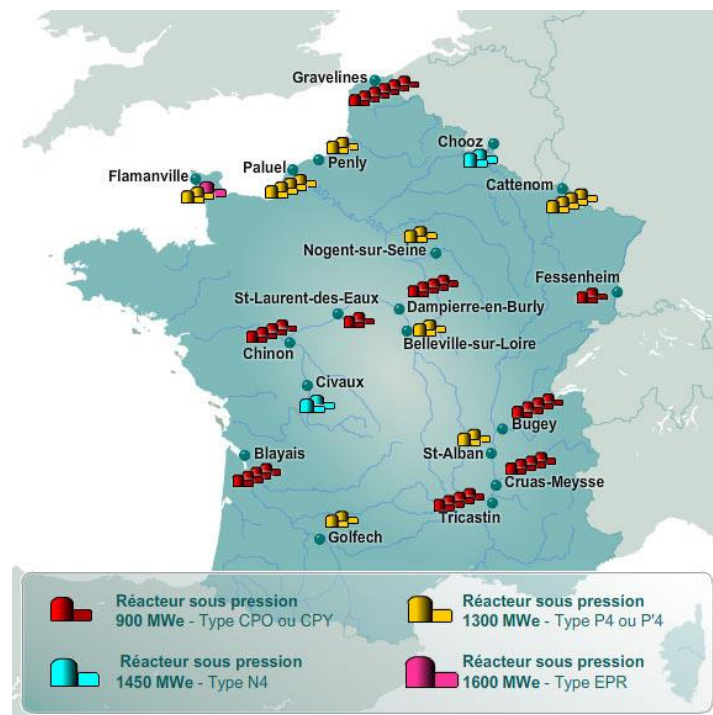
Après un rappel succinct du principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire, cette première partie va décrire l'origine de la contamination radioactive des installations, ainsi que les différents radionucléides qui peuvent être rencontrés. Ensuite, les notions fondamentales de physique nucléaire et les effets biologiques des faibles doses de rayonnements ionisants seront recensées. Enfin, les différents systèmes de mesures et les principes actuels d'évaluation de dose seront abordés.

## **1 Fonctionnement d'une centrale nucléaire**

### **1.1 Les différentes centrales en France**

Le parc nucléaire français est actuellement constitué de 59 réacteurs à eau sous pression répartis sur 19 sites permettant la production d'environ 70% de l'électricité produite en France. Ces installations ont une puissance allant de 900MWe à 1600MWe, utilisant l'eau sous pression pour transporter la chaleur produite par les réactions nucléaires.

Ces infrastructures sont constituées de six générations de réacteurs différents du fait de l'évolution technologique appelée « palier ». Ces différentes générations de réacteurs contribuent à expliquer les différences entre les sites nucléaires sur la nature et l'origine des radionucléides retrouvés en cas de contamination.



On retrouve donc les paliers :

- **CP0** : six réacteurs de 900 MégaWatts électriques (MWe) au Bugey et à Fessenheim ; ce sont les premiers réacteurs mis en service encore en activité ;
- **CPY** : vingt-huit réacteurs de 900 MWe au Blayais, à Chinon, à Cruas-Meysses, à Dampierre-en-Burly, à Gravelines, à Saint-Laurent-des-Eaux et au Tricastin ;
- **P4** : huit réacteurs de 1300 MWe à Flamanville, Paluel et Saint-Alban ;
- **P'4** : douze réacteurs de 1300 MWe à Belleville, Cattenom, Golfech, Nogent-sur-Seine et Penly ;
- **N4** : quatre réacteurs de 1450 MWe à Chooz et Civaux ;
- **EPR** : un réacteur de 1600 MWe en construction à Flamanville.

## 1.2 Principe de fonctionnement

Les réacteurs nucléaires utilisent la chaleur émise par la fission nucléaire engendrée par le flux neutronique au sein de la cuve du réacteur, transportée grâce à l'eau sous pression au sein des circuits primaires et secondaires afin d'actionner une turbine productrice d'électricité.

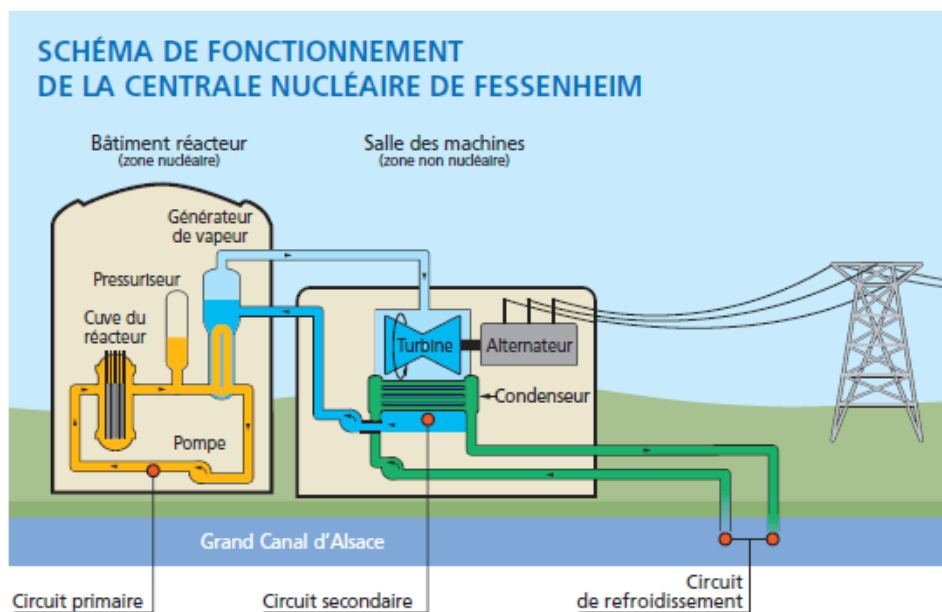


Figure 2 : Schéma d'une centrale à eau sous pression (source EDF)

## 1.3 Le circuit primaire, origine de la contamination

Trois circuits d'eau différents sont nécessaires afin d'éviter tout transfert d'éléments radioactifs. Un premier circuit constitué de quatre boucles, appelé circuit primaire, où l'eau est directement au contact des éléments combustibles. C'est un circuit « fermé » où l'eau est utilisée comme fluide caloporteur et également modérateur permettant le ralentissement des neutrons, favorisant ainsi la réaction en chaîne.

L'eau du circuit primaire est à 320°C en phase de fonctionnement et maintenue sous forme liquide à l'aide de pressuriseurs. Elle y est transportée au sein des différents générateurs de vapeurs à l'aide des GMPP (Groupe moto pompe primaire).

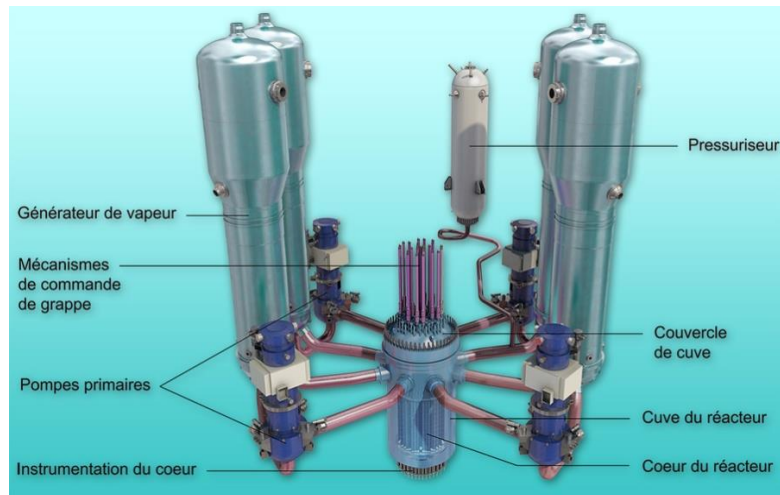


Figure 3 : Schéma du circuit primaire d'une centrale REP 1300 MWe (Source ASN)

Le cœur du réacteur est constitué de 193 assemblages de combustible (pour une puissance de 1300 MWe). Chaque assemblage est composé de 264 crayons constitués chacun de 272 pastilles de dioxydes d'uranium. La réaction de fission nucléaire se produit au sein de la cuve du circuit primaire. Elle est contrôlée grâce au mécanisme de commande de grappes et à la chimie du fluide primaire. La chaleur produite au sein du cœur est transmise au circuit secondaire par échange thermique au niveau des générateurs de vapeur. Il n'y a donc pas d'échange direct entre le circuit primaire et secondaire, la contamination radioactive des circuits est alors limitée au circuit primaire.

## 1.4 Le circuit secondaire

Le passage du fluide primaire se fait au niveau des faisceaux tubulaires en U (cf. Figure 4). L'eau du circuit secondaire passe alors sous forme vapeur au sein du générateur de vapeur, entraînant par la suite les turbines et l'alternateur.

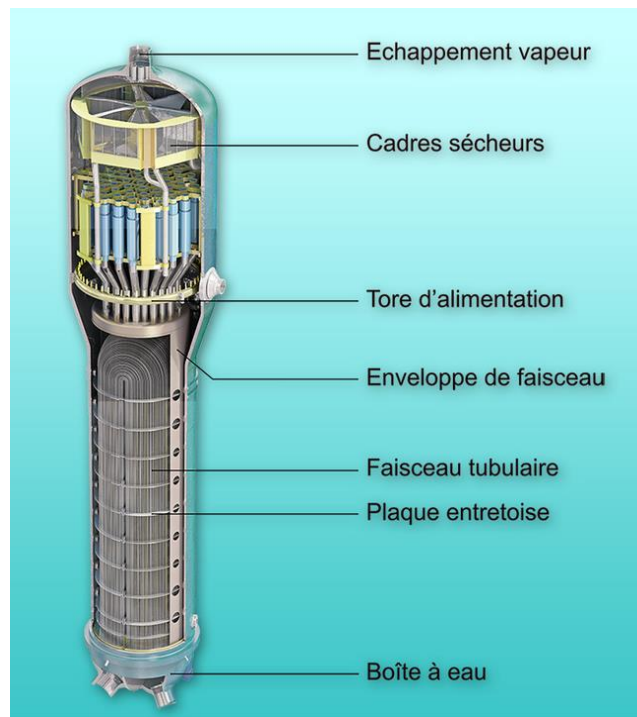


Figure 4 : Schéma du Générateur de Vapeur (Source ASN)

## 1.5 Le circuit de refroidissement

Après passage de la turbine, cette vapeur est ensuite à nouveau condensée par échange thermique au sein du condenseur dans lequel circule l'eau froide provenant de la mer, d'un fleuve. Il s'agit du seul circuit ouvert de la centrale.

En bordure de fleuve ou de rivière, la température de l'eau du circuit de refroidissement est abaissée à l'aide de grandes tours appelées aéroréfrigérants.

## 1.6 Maintenance de la centrale (arrêt de tranche)

Au cours de son exploitation, le réacteur nucléaire entre dans différentes phases de fonctionnement :

- le démarrage et fonctionnement normal,
- la mise à l'arrêt du réacteur (mise à l'arrêt à froid - MAF) permettant l'ouverture, l'entretien périodique des installations, le déchargement combustible usagé et le rechargement combustible neuf.
- le redémarrage.

Cette phase, du fonctionnement normal puis mise à l'arrêt jusqu'au redémarrage du réacteur, constitue un « cycle ». Il correspond à une période d'une année environ.

## 2 Origine de la contamination en centrale nucléaire

L'origine d'une éventuelle contamination interne des salariés travaillant en zone contrôlée résulte, soit de l'incorporation d'éléments activés provenant du circuit primaire, appelés produits d'activation ou alors de l'incorporation d'éléments habituellement confinés dans le combustible, appelés produits de fission. Il est donc important de comprendre comment se déroulent les processus de formation de cette contamination.

### 2.1 Produits d'activation

#### 2.1.1 Formation des produits d'érosion, corrosion du circuit primaire

Le circuit primaire est constitué de différents matériaux métalliques appelés alliages.

On y retrouve :

- des Aciers inoxydables constituant les tuyauteries et le revêtement de la cuve ;
- des Inconel, alliage à base de nickel que l'on trouve notamment dans les tubes du générateur de vapeur ;
- des Zircaloy, alliage à base de zirconium composant, entre autres, le gainage des assemblages combustibles ;
- des Stellites, alliage à base de Cobalt, utilisés pour les vannes et pompes.

L'altération des matériels est secondaire à trois principaux phénomènes : l'érosion, l'abrasion et la corrosion chimique.

- L'érosion est définie par une altération des surfaces en contact avec un fluide provoquée par la circulation à grande vitesse du fluide. C'est un phénomène mécanique.
- L'abrasion se caractérise par l'altération des surfaces provoquée par le frottement des matières en suspension présentes dans le fluide en contact. Il s'agit également d'un phénomène mécanique.
- La corrosion désigne l'altération d'un matériau par réaction chimique avec un oxydant. La corrosion des métaux est un phénomène naturel et courant. Par exemple, le fer se dissout naturellement dans l'eau.

On distingue habituellement les phénomènes de corrosion en trois groupes : la corrosion uniforme, la corrosion sous contrainte et la corrosion-usure.

- La corrosion uniforme se traduit par une diminution généralisée de l'épaisseur du matériau progressant à la même vitesse sur l'ensemble de la surface (2).
- La corrosion sous contrainte correspond à l'altération locale des propriétés protectrices de la couche passive. Elle peut être liée à une agression chimique (corrosion par piqûres) ou à une sollicitation mécanique importante (ex : changement de densité du combustible, apparition de gaz de fissions pour le gainage combustible).

- La corrosion usure appelée également « tribocorrosion » est définie comme un processus impliquant l'action conjuguée de la corrosion et du frottement entre deux surfaces glissantes en contact (2).

Le circuit primaire d'une centrale à eau sous pression est conditionné par trois éléments :

- l'acide borique ( $H_3BO_3$ )
- la lithine (LiOH)
- l'hydrogène ( $H_2$ ).

Les matériaux choisis pour la constitution du circuit primaire sont peu sensibles à la corrosion mais le contrôle du fonctionnement de l'installation nécessite l'emploi d'acide borique qui possède des propriétés neutrophagiques permettant de contrôler la réaction nucléaire en stabilisant la réaction en chaîne au sein de la cuve du réacteur. Or, l'acide borique a une action corrosive qui aggrave le processus naturel de corrosion des matériaux constituant les circuits primaires. La concentration en Bore utilisé va dépendre de l'activité du combustible présent au sein de la cuve. En effet, lorsque le combustible est neuf, la concentration en acide borique est maximale (2500ppm). Au cours de l'exploitation du réacteur, le combustible s'appauvrit en Uranium 235 (fissile) impliquant une diminution de la concentration d'acide borique au sein du circuit primaire par l'exploitant.

Afin de limiter l'action corrosive de l'acide borique, il est nécessaire de neutraliser son effet. Ceci est réalisé grâce à une espèce basique : la lithine. Elle permet le contrôle du pH du circuit primaire en se plaçant à un pH dit « de moindre corrosion » : pH de 7.2 à 300°C. La concentration en lithine va dépendre de la quantité d'acide borique présent au sein du fluide primaire, définie par le diagramme de Stutzmann (courbe illustrant la zone dite « de fonctionnement normal » du fluide primaire selon la concentration en lithine et en bore).

L'utilisation de l'hydrogène permet d'éviter la formation d'espèces oxydantes (oxygènes et peroxydes d'hydrogène) produites par la radiolyse de l'eau. Ces espèces aggraveraient la corrosion des matériaux du circuit primaire.

De façon générale, le contrôle des conditions chimiques au sein des installations va permettre :

- de garantir la durée de vie de la centrale en contrôlant le taux de disparition de matière dans les circuits ;
- de garantir la sûreté en participant à l'intégrité des circuits ;
- de limiter les débits de dose.

Le fluide primaire est donc conditionné pour se situer dans une gamme de pH et de potentiel redox qui permette de réduire au maximum la corrosion généralisée des matériaux. Il est cependant impossible de l'empêcher totalement.

En raison des surfaces importantes de tuyauteries utilisées, la quantité de produits de corrosion générée est importante (quelques dizaines de kilogrammes pour le Fer et le Nickel, une centaine de grammes pour le Cobalt et quelques centaines de grammes pour le Chrome pour une dizaine de cycles) (3).



### 2.1.2 Activation des produits d'érosion, de corrosion du circuit primaire

Après transfert des produits de corrosion dans la cuve du réacteur (zone sous le flux de neutrons), les éléments s'activent, formant alors des nucléides radioactifs instables. Ils se désintègreront en émettant des rayonnements (Gamma) ou des particules (Alpha, Beta). Ceci constitue la contamination radioactive qui peut se redéposer dans tout le circuit (= transfert de contamination).

Ce processus de contamination est lié à différents mécanismes : simple déposition de particules, précipitation et incorporation d'ions actifs, adsorption d'espèces ioniques ou colloïdales. Il est la cause du rayonnement persistant à l'arrêt du réacteur. Cette contamination constitue la source principale de la dose (85%) reçue par le personnel lors des opérations de maintenance et de rechargement (4).

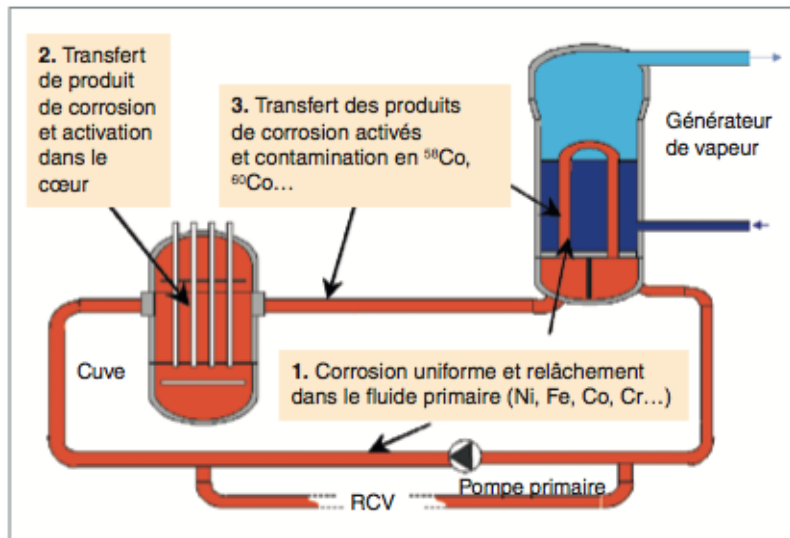


Figure 5 : Schéma illustrant les mécanismes de contamination du circuit primaire (2)

### 2.1.3 Radionucléides retrouvés dans le circuit primaire

Les principaux radionucléides présents dans le circuit primaire sont :  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{95}\text{Zr}$ - $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ,  $^{124}\text{Sb}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{59}\text{Fe}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ .

Principaux radionucléides générés dans un réacteur REP par l'activation des structures et/ou des produits de corrosion			
Nucléide	Père	Période	Origine principale
$^{60}\text{Co}$	$^{59}\text{Co}$	5,27 ans	Stellites (paliers de pompes, vannes, clapets, internes de cuves et MCG), impuretés des autres matériaux métalliques
$^{58}\text{Co}$	$^{58}\text{Ni}$	70,8 jours	Alliages base nickel (générateur de vapeur)
$^{54}\text{Mn}$	$^{54}\text{Fe}$	312,2 jours	Tous matériaux métalliques
$^{95}\text{Nb}$	$^{94}\text{Nb}$	35,1 jours	Alliages base zirconium (Gaine combustible, tubes guides, grilles d'assemblages)

$^{95}\text{Zr}$	$^{94}\text{Zr}$	64 jours	Alliages base zirconium
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	$^{109}\text{Ag}$	249,8 jours	Barres de contrôle du flux neutroniques en AIC (Argent-Indium-Cadmium), beurrage de joints (hélicoflex®), résines échangeuses d'ions
$^{124}\text{Sb}$	$^{123}\text{Sb}$	60,2 jours	Butées de graphites de certaines pompes à rotor noyé, grappes sources
$^{51}\text{Cr}$	$^{50}\text{Cr}$	27,7 jours	Matériaux fortement alliés (Inox)
$^{59}\text{Fe}$	$^{58}\text{Fe}$	44,5 jours	Tous matériaux métalliques
$^{95}\text{Zn}$	$^{94}\text{Zn}$	243,9 jours	Injection de Zinc

Tableau 1 : Origine principale des radionucléides impliqués dans la contamination des centrales REP(3)

### Cobalt 60

Le Cobalt 60 provient de l'activation de dépôts de  $\text{Co}^{59}$  formés à partir de Stellite (Alliage base Cobalt) utilisé comme alliage anti friction sur les paliers de pompe ou les mécanismes de grappe.

Le Cobalt 60 a une période radioactive de 5.27 ans et une activité massique de  $4,18 \cdot 10^{13} \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ . C'est un isotope radioactif instable du Cobalt se transformant dans un état excité de Nickel 60, par émission d'un rayonnement Beta (Electron). Celui-ci retrouve son état fondamental par l'émission simultanée de deux photons Gamma de 1173 keV et de 1332 keV.

Le Cobalt 60 possédant une demi-vie de 5.3 ans, il va s'accumuler à chaque cycle du réacteur. Nous retrouverons donc une contamination au  $\text{Co}^{60}$  plus importante dans les centrales nucléaires les plus anciennes.

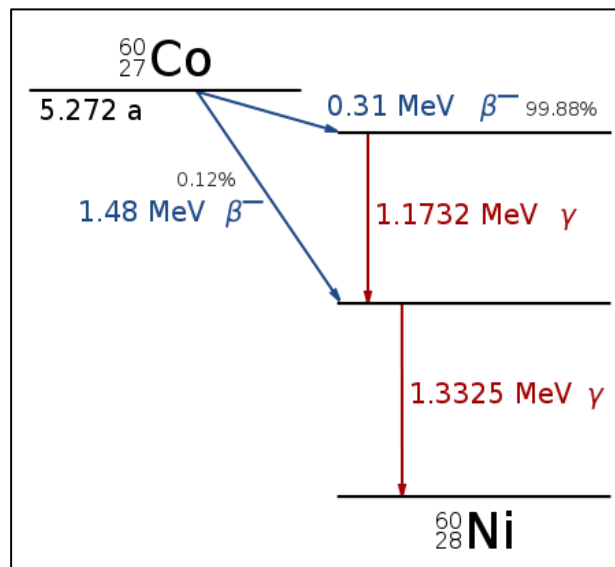


Figure 6 : Schéma de désintégration du Cobalt 60

### Cobalt 58

Le Cobalt 58 résulte de l'activation de dépôts formés à partir des Inconel (Alliage base Nickel) formant les tubes du générateur de vapeur. Les générateurs de vapeur neufs, ne possédant pas encore

de couche de passivation, sont donc à l'origine d'une forte contamination en Cobalt 58 des circuits primaires. Cinq cycles d'utilisation sont nécessaires à la passivation complète de ces générateurs (5).

Le  $\text{Co}^{58}$  a une période radioactive de 70,8 jours et une activité massique de  $1,18 \cdot 10^{15} \text{ Bq.g}^{-1}$ . Il se désintègre par émission Beta de 475 keV et Gamma de 511, 811 keV.

#### Manganèse 54

Le Manganèse 54 est issu de l'activation de dépôts formés à partir des aciers inoxydables contenant du Fer. Sa période radioactive est de 312 jours et son activité massique de  $2,87 \cdot 10^{14} \text{ Bq.g}^{-1}$ . C'est un élément radioactif retrouvant son état fondamental par émission Gamma de 5 et 835 keV.

#### Zirconium 95 -Niobium 95

Les alliages de Zircalloy sont utilisés pour les tubes guides, les grilles d'assemblage et le gainage du combustible. Il est soumis à d'importantes contraintes au sein de la cuve du réacteur (pression, température, rayonnement) à l'origine d'une corrosion importante. Il en résulte la formation d'oxydes appelé Zircone formant des dépôts blanchâtres (desquamation) au contact des assemblages combustibles. Les atomes peuvent passer à l'état ionique sous forme soluble dans le fluide du circuit primaire.

#### Argent 110m

L'Argent 110m se forme après l'activation de l' $\text{Ag}^{109}$  provenant de l'usure des grappes de contrôle AIC (Argent-Indium-Cadmium) sur les REP 900MWe. Il peut également provenir de joints HELICOFLEX® (joints métalliques d'étanchéité fréquemment utilisés dans l'industrie).

L' $\text{Ag}^{110m}$  est difficilement retenu par les systèmes de filtration du circuit primaire, de par la nature des résines échangeuses d'ions. Elles peuvent libérer l'Argent retenu après un « claquage » de résine et recontaminer les circuits.

Il a une période radioactive de 249,8 jours et une activité massique de  $1,76 \cdot 10^{14} \text{ Bq.g}^{-1}$ . Il se désintègre par émission Béta de 531 keV et Gamma de 658, 885 et 1505 keV.

#### Antimoine 122 et 124

L'Antimoine 122 et l'Antimoine 124 proviennent de l'activation de l'Antimoine 121 et 123 contenus dans les grappes sources secondaires du réacteur nucléaire. On les retrouve également au sein des butées de graphite des pompes Rüttschi® (pompes à rotor noyé) utilisées dans l'industrie nucléaire pour le pompage de fluides radioactifs.

L'Antimoine 122 a une période radioactive de 2,7 jours, on le retrouve donc peu lors des contaminations interne. Il se désintègre par émission Béta de 1417 et 1981 keV et Gamma de 564 keV.

L'Antimoine 124 a une période radioactive de 60,2 jours. Il se désintègre par émission Béta de 611 et 2302 keV et Gamma de 603 et 1691 keV.

### Chrome 51

Le Chrome 51 émane de l'activation de dépôts formés à partir des aciers inoxydables contenant du Chrome. Il a une période radioactive est de 27.7 jours et son activité massique de  $3,42 \cdot 10^{15} \text{ Bq.g}^{-1}$ . C'est un élément radioactif retrouvant son état fondamental par émission Gamma de 5 et 20 keV.

### Fer 59

Le Fer 59 résulte de l'activation du Fer 58 contenu dans l'ensemble des circuits métalliques de la centrale. La période radioactive du Fer 59 est de 44,5 jours et une activité massique de  $1,84 \cdot 10^{15} \text{ Bq.g}^{-1}$ . C'est un isotope radioactif instable retrouvant son état fondamental par émission Béta de 131, 273 et 466 keV et par émission Gamma de 1099 et 1292 keV.

### Zinc 65

Afin de diminuer le débit de dose ambiant, des injections de Zinc sont réalisées dans le circuit primaire. En effet, ces atomes de Zinc ont une plus grande affinité que les atomes de Cobalt 58 pour les noyaux octaédriques des réseaux spinelles en surface des parois des circuits contaminés. Ceci permet de libérer les atomes radioactifs « logés » dans la paroi du circuit, le gain estimé en termes de débit de dose est supérieur à 30%.

Ces atomes de Zinc sont également soumis à l'érosion et la corrosion, ils sont à l'origine de contamination au Zinc 65. Le Zinc 65 a une période radioactive de 243,9 jours et une activité massique de  $3,05 \cdot 10^{14} \text{ Bq.g}^{-1}$ . Il se désintègre par émission Béta de 330 keV et Gamma de 1116 keV.

## 2.2 Produits de fission

Après trois années d'utilisation du combustible, celui-ci contient environ 3% de produits de fission qui sont classés selon leur période radioactive :

- Produits de fission à vie courte (période  $\leq 30$  ans) : Il s'agit des gaz rares comme le Krypton<sup>85</sup> ou le Xenon<sup>133</sup>, de l'Iode<sup>131</sup> qui se trouve sous différentes formes (forme gazeuse, soluble ou aérosol) et des Césium <sup>134</sup> et <sup>137</sup> qui se trouvent sous forme soluble ou d'aérosol ;
- Produits de fission à vie longue (période  $\geq 30$  ans) : Iode<sup>129</sup>.

Ces radioéléments n'apparaissent dans le circuit primaire que s'il y a une rupture des gaines combustibles (événement très peu fréquent).

## 2.3 Forme physico chimique et granulométrie des radiocontaminants

Afin de pouvoir étudier la cinétique de décroissance d'une contamination interne, il est nécessaire de connaître la forme chimique des radiocontaminants et leur granulométrie. En effet, celles-ci influent sur le métabolisme des radionucléides incorporés.

### 2.3.1 Forme chimique

Les conditions physico-chimiques au sein du circuit primaire entraînent une oxydation des alliages. Ceci aboutit à la formation d'une couche de protection en surface des alliages composés :

- en superficie, d'une couche d'oxydes dite duplex formant des réseaux spinelles (noyaux octaédriques)
- d'une couche plus profonde continue et « protectrice », riche en Chrome, responsable de la passivation du métal.

La composition des différents oxydes va dépendre du type d'alliage et de la chimie du fluide primaire. La corrosion entraîne la libération d'ions métalliques dans l'eau du circuit primaire. Ces ions peuvent précipiter pour former des particules, et des dépôts solides en surface des parois. Ces dépôts peuvent s'éroder sous la vitesse du flux, et adhérer à d'autres parois du circuit. Ceux-ci peuvent également interagir avec le fluide primaire et redonner :

- des espèces ioniques par dissolution ;
- de nouvelles particules par un processus d'érosion-déposition.

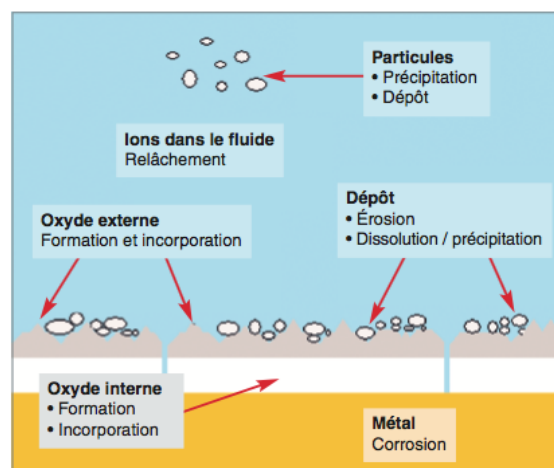


Figure 7 : Localisation des produits de corrosion en surface du circuit primaire (2)

### 2.3.2 Granulométrie

La contamination présente au sein des installations peut être transférée à l'ouverture des circuits. La formation d'aérosols est possible par mise en suspension d'un liquide contaminé par agitation mécanique, ultra-sons ou évaporation rapide (chaleur). Les radiocontaminants se trouvent le plus souvent sous forme d'aérosols de 1 ou 5  $\mu\text{m}$ , cependant ils peuvent également être présents sous forme de particule chaude.

Ces particules chaudes plus communément appelées « grattons » sont des particules insolubles fortement radioactives pouvant atteindre quelques centaines de kilo becquerels et dont le diamètre varie d'une dizaine de micromètres à un millimètre (6).

Les grattons sont responsables de nombreuses contaminations internes en centrale nucléaire (7). Leur formation diffère des autres radioéléments. Elle résulte de la dégradation des matériels en lien avec un défaut de maintenance :

- Un rodage de matériel. Par exemple, le polissage de portée de pompe formant des copeaux de métaux s'activant au passage dans la cuve du réacteur ;
- La présence de corps migrants dans le circuit primaire entraînant des arrachements de matières métalliques.

## 2.4 Modalités de purification du circuit primaire

La purification du fluide primaire à des fins de diminution de concentration d'éléments radioactifs est réalisée en continu lors du fonctionnement de la centrale grâce au circuit RCV et également lors des périodes d'arrêt de tranche (AT).

### 2.4.1 Le circuit de contrôle volumétrique et chimique (Système RCV)

Une partie du fluide primaire est ainsi dérivée sur le circuit RCV : le fluide circule successivement sur des cartouches filtrantes (noté RCV/REA 00. **FI** cf. *figure 9*) puis à travers des résines échangeuses d'ions (noté RCV 00. **DE** cf. *figure 9*). Les particules les plus petites (particules colloïdales, inférieures à 1  $\mu\text{m}$ ) ne sont pas retenues par ce système.

Ce système permet un gain de débit de dose ambiant estimé entre 10 et 20 %.

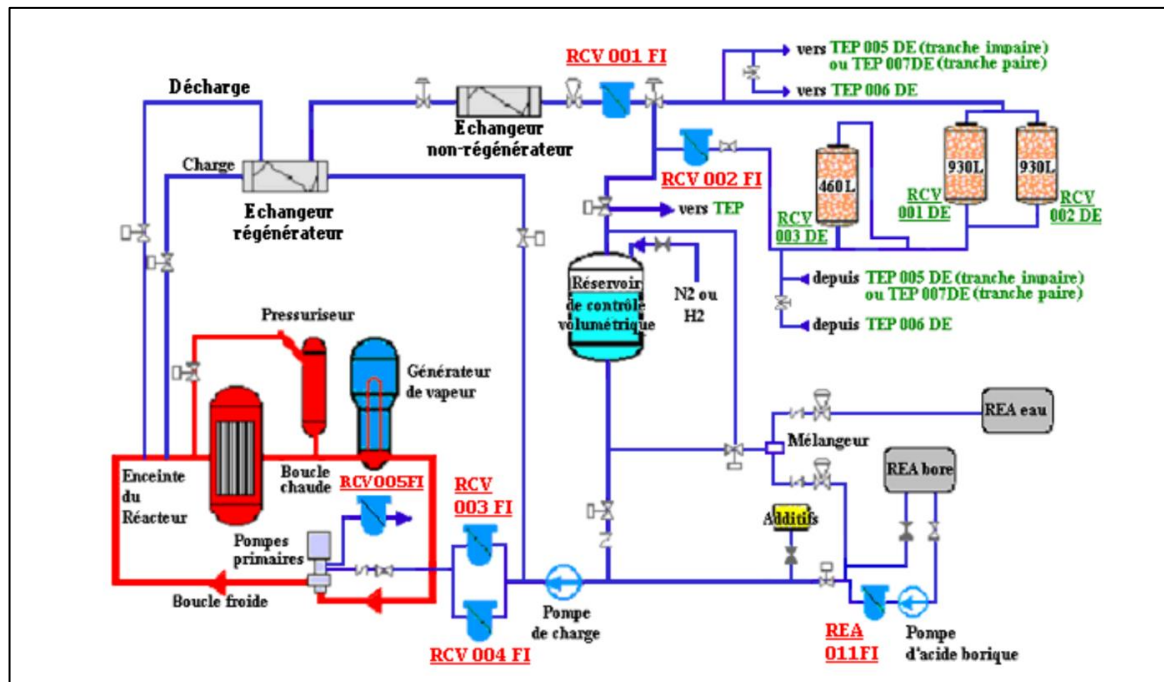


Figure 8 : Schéma du système RCV (8)



Figure 9 : Photo d'une Cartouche Filtrante RCV (8)

#### 2.4.2 Etape clé : la mise à l'arrêt à froid

Lors de la mise à l'arrêt du réacteur nucléaire, les conditions chimiques et physiques du fluide primaire sont modifiées. La solubilité, traduisant la capacité d'une espèce à passer en solution à partir d'une phase solide, va être augmentée. Les dépôts formés peuvent être dissous et relargués dans le fluide primaire.

La mise à l'arrêt à froid (MAF) correspond à la période entre l'état de convergence du réacteur et l'ouverture des circuits. C'est une étape clé sur le plan de la radioprotection. En effet, la maîtrise des différentes phases est indispensable afin de limiter la recontamination des circuits primaires situés hors flux.

Au cours de cette étape, on passe d'un milieu réducteur, avec un pH basique, une concentration en dihydrogène ( $H_2$ ) de  $35-50\text{cm}^3/\text{kg}$  et d'une température de  $300^\circ\text{C}$  à une température de  $25^\circ\text{C}$  et une concentration en oxygène de  $8\text{ppm}$  permettant l'ouverture des circuits.

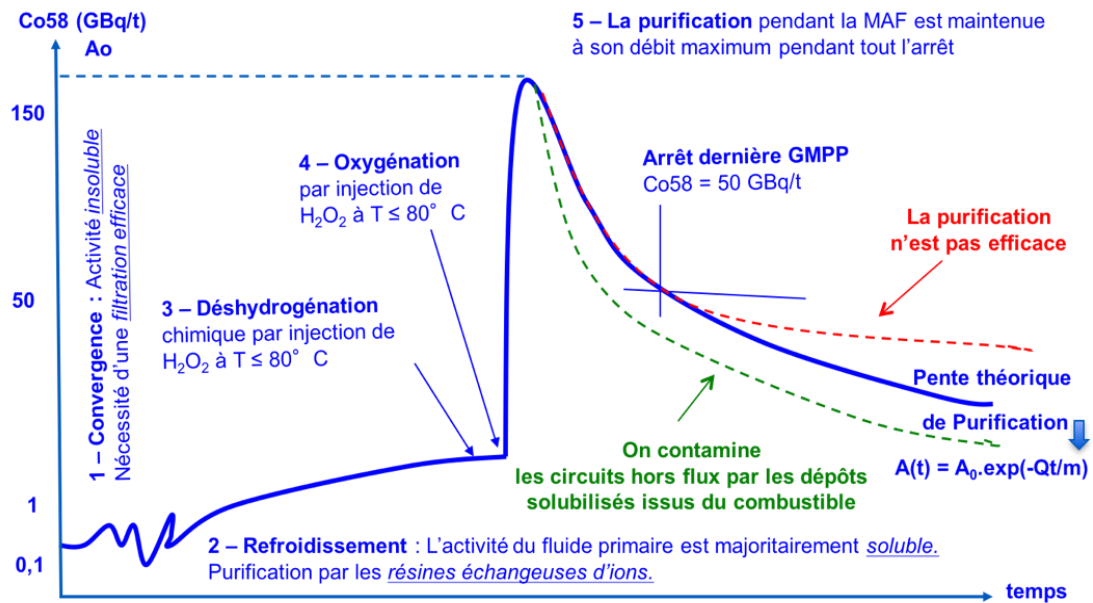


Figure 10 : Evolution de l'activité volumique en  $Co58$  du fluide primaire au cours des différentes phases de la mise à l'arrêt à froid (9)

- La convergence : correspond à la phase au cours de laquelle les températures des gaines combustibles et du fluide primaire s'équilibrent. Il en résulte un décrochement des dépôts fixés par la chaleur sur le combustible.
- Le refroidissement : c'est au cours de cette phase que le fluide primaire est refroidi entraînant à nouveau une augmentation de la solubilité des produits de corrosion et la libération des dépôts fixés sur les assemblages combustibles. L'utilisation des résines échangeuses d'ions permet de limiter l'augmentation du niveau d'activité volumique du fluide primaire.
- La déshydrogénation : cette phase consiste à éliminer l'hydrogène dissout dans le fluide primaire avant l'oxygénation.
- L'oxygénation : avant de pouvoir réaliser l'ouverture des circuits primaires, il est nécessaire de procéder à l'oxygénation du fluide primaire pour atteindre une concentration en oxygène dissoute supérieure à  $8\text{ ppm}$ . Ceci entraîne une importante solubilisation des dépôts activés au contact des assemblages combustibles générant une très forte augmentation de l'activité du fluide primaire.
- La purification : la dernière phase consiste à filtrer le fluide primaire à l'aide d'un système d'épuration (circuit RCV) constitué de filtres et résines échangeuses d'ions. La maîtrise de



cette phase est primordiale. En effet, elle permet de piéger les produits de corrosion activés au sein de filtres à cartouches et résines. Des mesures d'activité du fluide primaire sont réalisées au cours de cette étape afin de vérifier que la courbe de décroissance de l'activité du fluide primaire corresponde à la « pente » théorique de purification (Cf. *Figure 10*).

Des difficultés techniques (saturation de filtres) nécessitent parfois de devoir « shunter » le système de filtration entraînant une recontamination des circuits. Un « claquage » de résines peut également survenir entraînant la libération des radioéléments dans le circuit primaire.

## 3 Notions élémentaires de physique nucléaire

### 3.1 Les différents types de rayonnements ionisants

Un rayonnement est un flux de particules en mouvement rapide, de nature et d'énergie cinétique variée. Les rayonnements dits ionisants ont une énergie suffisante pour arracher des électrons aux atomes du milieu traversé. Ce phénomène d'ionisation est à la base de tous les systèmes de détection des rayonnements.

Les rayonnements ionisants peuvent être classés en deux catégories : les rayonnements directement ionisants car chargés électriquement et les rayonnements indirectement ionisants, non chargés électriquement.

Le pouvoir d'ionisation d'un rayonnement va dépendre :

- du type de rayonnement,
- du mode d'exposition,
- des énergies de chacune de ces émissions.

#### 3.1.1 Les rayonnements directement ionisants

Les rayonnements Alpha ( $\alpha$ ) sont des noyaux d'hélium, eux même constitués de deux protons et de deux neutrons. Les noyaux émetteurs Alpha sont appelés « noyaux lourds ».

Exemple de noyau émetteur Alpha : le Radium, le Polonium, l'Uranium, le Plutonium.

Les rayonnements Béta ( $\beta$ ) sont des électrons porteurs d'une charge électrique négative ( $\beta^-$ ) ou d'une charge positive (positons,  $\beta^+$ ).

#### 3.1.2 Les rayonnements indirectement ionisants

Les rayonnements corpusculaires tels que les neutrons sont produits lors de réactions nucléaires comme la fission.

Les rayonnements électromagnétiques : les photons X et les photons  $\gamma$ . Un photon est un grain d'énergie sans masse se déplaçant en ligne droite à la vitesse de la lumière. Les photons X et  $\gamma$  de même énergie sont identiques, ils ont les mêmes propriétés. Cependant, ils diffèrent par leur origine ; les rayonnements  $\gamma$  ont une origine nucléaire alors que les rayonnements X ont une origine extranucléaire.

Ce sont les photons  $\gamma$ , émis par les noyaux radioactifs incorporés par les travailleurs en cas de contamination interne, que l'on détecte par les différents systèmes de mesures corps entier.

## 3.2 Physique nucléaire

### 3.2.1 Notions de base

La matière est constituée d'atomes. Chaque atome est formé d'un noyau, lui-même constitué de neutrons et de protons, entouré d'un cortège d'électrons.

On appelle « éléments », l'ensemble des atomes possédant le même nombre d'électrons. Ils ont donc les mêmes propriétés chimiques. La classification périodique des éléments de « Mendeleïev » les organise selon leur propriété chimique.

Pour un même élément, on trouve des noyaux qui comportent un nombre de neutrons différent (par exemple un noyau d'oxygène peut comporter 8, 9 ou 10 neutrons). Les nucléides d'un même élément sont appelés « isotopes ». Certains de ces nucléides peuvent se désintégrer spontanément : on les appelle « nucléides instables ».

Il existe environ 300 nucléides dans la nature dont une cinquantaine sont instables. Par exemple, un homme de 70 kg a une activité d'environ 6000 Bq de potassium radioactif. Il est également possible d'en fabriquer ; ce sont des nucléides dits « artificiels » qui sont tous instables.

La radioactivité est un phénomène naturel, le noyau retrouve un état de stabilité après émission de rayonnements. On parle de désintégration radioactive d'un nucléide. Les énergies qui sont libérées lors d'une réaction nucléaire se mesurent en électron volt : eV.

$$1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ joule}$$

La période radioactive correspond au temps nécessaire au bout duquel la moitié des noyaux « Père » de l'isotope radioactif initialement présent est désintégrée naturellement. Cette période est variable selon le radionucléide considéré (Cf. *tableau 1*).

### 3.2.2 Unités de mesure utilisées en radioprotection

L'activité d'une source radioactive correspond au nombre de désintégrations se produisant pendant une seconde. L'activité est proportionnelle au nombre de noyaux « Père » contenus dans la source radioactive. Elle décroît au cours du temps de manière variable selon le radionucléide considéré.

Le Becquerel (Bq) est l'unité permettant de définir l'activité d'une certaine quantité de matière radioactive. Elle correspond au nombre de désintégrations qui s'y produisent au cours d'une seconde.

La dose absorbée correspond à l'énergie déposée par unité de masse de matière par un rayonnement. Elle permet de quantifier l'énergie qui est déposée dans un tissu biologique. L'unité de mesure de la dose absorbée est le Gray (Gy). Elle se rapporte à l'énergie nécessaire pour transmettre une énergie d'un joule à un milieu homogène d'une masse d'un kilogramme.

La dose équivalente ( $H$ ) permet de tenir compte de l'effet biologique relatif des différents types de rayonnement. Elle est équivalente à la dose absorbée corrigée d'un facteur de pondération ( $W_R$ ) défini par le type de rayonnement ionisant. Son unité de mesure est le Sievert (Sv).

$$H = \sum_R W_R \cdot D_R$$

La dose efficace ( $E$ ) permet également de mesurer l'impact du rayonnement ionisant sur les tissus biologiques. Elle correspond à la dose absorbée pondérée d'un facteur ( $W_R$ ) (défini par le type de rayonnement) et d'un facteur ( $W_T$ ) défini par la sensibilité aux rayonnements du tissu irradié. L'unité de dose efficace est le Sievert (Sv).

$$E = \sum_T W_T \cdot H$$

La dose efficace reçue par un individu est la somme des doses efficaces résultant des expositions externes et internes aux rayonnements ionisants. La dose efficace est une grandeur utilisée en radioprotection permettant de prédire les risques stochastiques d'une irradiation.

Le caractère prolongé de l'exposition aux rayonnements ionisants en cas de contamination interne a introduit la notion de dose engagée. Elle se définit par la dose efficace accumulée au cours des 50 ans suivant une incorporation de matière radioactive.

### 3.2.3 Modes d'exposition

Il existe trois types d'exposition aux rayonnements ionisants :

- soit la source radioactive se trouve à distance de l'organisme, il s'agit alors d'une exposition externe.

- soit la source est au contact du corps, il y a alors contamination. Celle-ci peut être au contact de la peau en cas de contamination externe ou alors elle peut être inhalée, ingérée ou franchir la barrière cutanée en cas de blessure. Il y a alors contamination interne.

## 4 Effets des faibles doses de rayonnements ionisants sur l'homme

La rétention de radionucléides dans l'organisme entraîne une irradiation des tissus mais les doses impliquées sont le plus souvent faibles.

De ce fait, seuls les effets des faibles doses des rayonnements ionisants seront abordés. Ce sont des effets nature stochastique et ils sont liés à la transformation cellulaire. Ils surviennent donc plusieurs années ou dizaines d'années après l'exposition, sans seuil caractérisé, de manière aléatoire chez les individus exposés. La gravité des effets est indépendante de la dose reçue, mais la fréquence d'apparition est proportionnelle à la dose.

L'évaluation des risques à long terme des faibles doses d'irradiation est un sujet de controverse entre les différentes spécialités scientifiques. De nombreuses avancées ont permis une meilleure compréhension des mécanismes d'action des rayonnements sur la cellule. Cependant, il persiste encore de nombreuses incertitudes sur les effets des faibles doses alimentées par des constats épidémiologiques et biologiques différents.

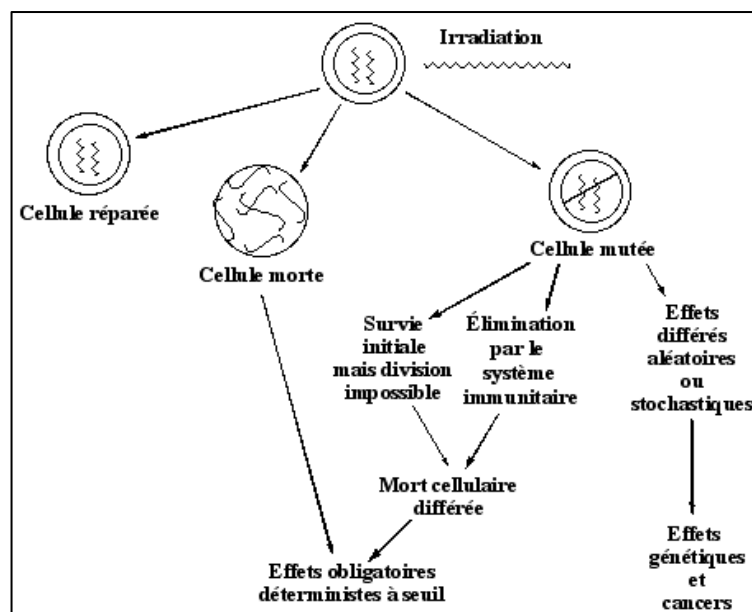


Figure 11 : Effets des rayonnements ionisants sur la cellule et l'organisme (Effets stochastiques vs effets déterministes)

## 4.1 Radiobiologie des faibles doses

Les altérations de la molécule d'ADN (cassure double brins) ont pu être mises en évidence grâce aux techniques d'immunofluorescence (marquage fluorescent d'anticorps anti histone) pour de faibles doses de rayonnements ionisants(10).

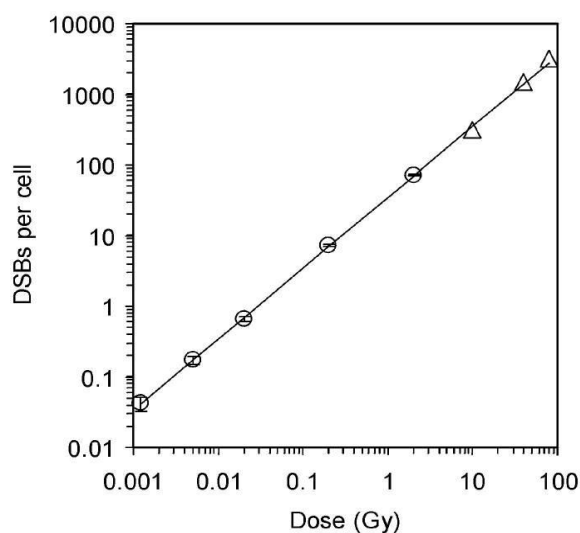


Figure 12 : Illustration du nombre de cassure double brins de l'ADN par cellule en fonction de la dose (10)

D'après cette observation, toute dose pourrait donc être responsable de lésions de notre génome et à terme de cancérisation. Ceci est en faveur du modèle linéaire sans seuil des effets des faibles doses de rayonnements. (Cf. figure 15)

Les lésions doubles brins de l'ADN semblent être les plus toxiques et génératrices de mutations pour nos cellules. Cependant, elles peuvent être également générées par le simple métabolisme oxydatif cellulaire à des taux très élevés. Elles ne sont donc pas spécifiques des rayonnements ionisants.

Plusieurs études scientifiques ont pu mettre en évidence un phénomène d'hyper-radiosensibilité cellulaires aux faibles doses de rayonnements ionisants (100/300 mGy)(11)(12)(13)(14).

De récentes études ont permis de mettre en évidence une augmentation du temps nécessaire à la réparation de l'ADN lors de l'exposition à de faibles doses (10mGy) par rapport à de plus fortes doses (1Gy) de rayonnements ionisants (15).

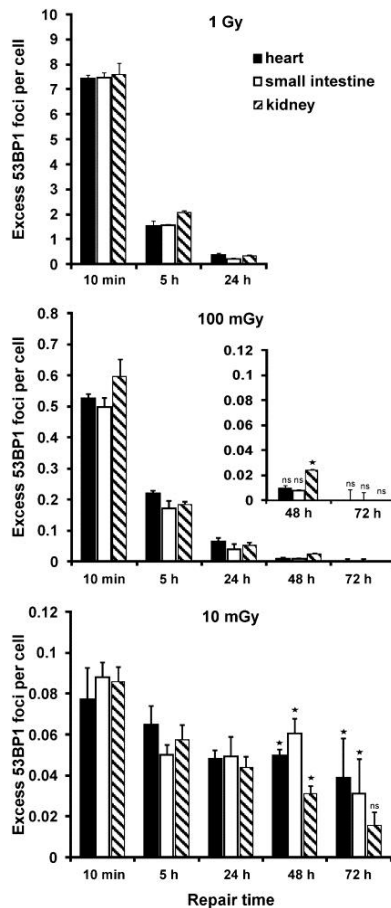


Figure 13 : Temps de réparation de l'ADN en fonction de la dose de RI (15)

La protéine 53BP1 témoin de la réparation de l'ADN a été retrouvée de manière plus prolongée dans la cellule lorsque celle-ci était irradiée à de plus faibles doses.

## 4.2 Radiosensibilité individuelle

La littérature actuelle suggère l'existence de différences interindividuelles dans la réponse aux rayonnements ionisants. Trois groupes de population ont ainsi été définis(16)(17). Un premier groupe concernerait 65-75% de la population et serait caractérisé par une radiorésistance et une faible instabilité génomique. Un second groupe serait plutôt marqué par une radiosensibilité intermédiaire et une instabilité génomique, il représente lui entre 10 et 20% de la population. Le dernier groupe aurait la plus grande radiosensibilité et concernerait seulement 5% de la population.

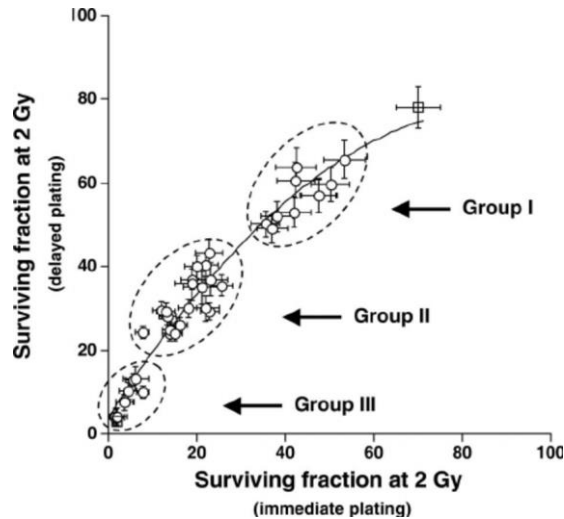


Figure 14 : Survie cellulaire selon les groupes de radiosensibilité (16)

### 4.3 Relation dose-effet des rayonnements ionisants aux faibles doses

Actuellement, les études épidémiologiques ne permettent pas de conclure de manière significative à l'existence d'un risque, c'est pourquoi différentes relations dose-effet traduisant les effets des faibles doses de rayonnements ionisants ont été décrites.

La relation linéaire sans seuil est une extrapolation issue des observations expérimentales et des enquêtes épidémiologiques aux doses élevées, qui semble être remise en cause par les récentes données de la radiobiologie(18)(19). Néanmoins, cette relation a été retenue pour les besoins de la radioprotection par la CIPR. Cependant, la relation non linéaire sans seuil, semble être la plus plausible chez l'homme.

Une hypothèse possible mais non établie d'un effet bénéfique des faibles doses appelée « Hormésis » a également été décrite.

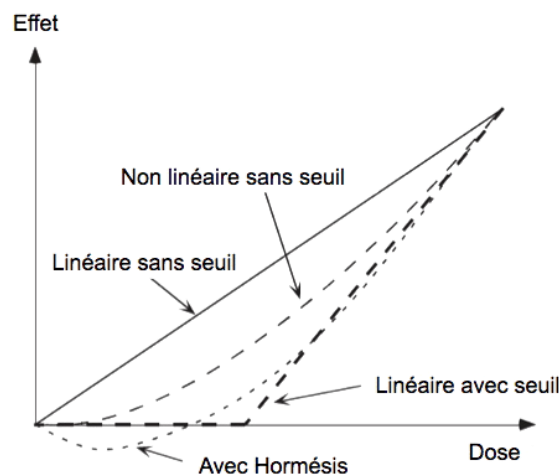


Figure 15 : Relation dose-effets des rayonnements ionisants

## 4.4 Protection des travailleurs

Fondée sur l'hypothèse qu'une faible dose peut produire un effet, la réglementation a pour objectif :

- d'empêcher toute survenue d'effets déterministes ;
- de limiter les effets stochastiques à un niveau acceptable.

Actuellement, la publication 60 de la CIPR(20) estime par prudence à 5% le risque de cancers mortels pour une population exposée par Sievert de dose efficace reçue.

L'objectif de la radioprotection est de protéger l'Homme des expositions aux rayonnements ionisants soit par irradiation externe ou par contamination interne. Elle vise à :

- protéger la santé des travailleurs aussi bien en situation normale qu'en situation accidentelle ;
- protéger la santé du public ;
- surveiller et protéger l'environnement.

Les pratiques de la radioprotection sont basées sur une réglementation nationale issue de directives européennes, elles-mêmes inspirées des recommandations de la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR).

Elles reposent sur le respect de trois principes fondamentaux :

- 1. La Justification des pratiques :** l'utilisation des rayonnements ionisants doit être nécessaire, il ne doit pas y avoir d'alternative possible ;
- 2. L'Optimisation :** les expositions doivent être les plus faibles possibles. Elle correspond au principe ALARA (acronyme de l'expression "As Low as Reasonably Achievable"). C'est un principe visant à mettre en place toutes les dispositions nécessaires et raisonnablement possibles afin de limiter les expositions aux rayonnements ionisants au niveau le plus faible ;
- 3. La Limitation :** les doses individuelles annuelles d'exposition doivent être inférieures aux limites réglementaires. Cela permet d'exclure les effets déterministes et de limiter les effets stochastiques.

Pour l'exposition aux rayonnements ionisants, la CIPR recommande une limite de dose efficace de 100 mSv pour une période de 5 ans. Cela correspond à une valeur moyenne de 20 mSv par an. La limite annuelle doit s'appliquer à la somme de dose efficace due à l'exposition externe et également aux incorporations survenues au cours de l'année (21).



EXPOSITION	TRAVAILLEURS		PUBLIC
	CAT A	CAT B	
		12 mois	12 mois
<b>Globale ou corps entier</b>	20 mSv	6 mSv	1 mSv
<b>Cristallin</b>	150 mSv*	50 mSv**	15 mSv
<b>Peau</b>	500 mSv	150 mSv	50 mSv
<b>Mains, avant-bras, pieds et chevilles</b>	500 mSv	150 mSv	-----
<b>Grossesse (entre la déclaration et l'accouchement)</b>	1mSv		
<b>Dose pour l'enfant à naître</b>			
<b>Femme allaitante</b>	Exclue des travaux à risque d'exposition interne		

\* 20mSv/an ou 100 mSv sur 5 années consécutives (directive européenne 2013)

\*\* 15mSv/an (directive européenne 2013)

Tableau 2 : Valeurs réglementaires d'exposition aux rayonnements ionisants

## 5 Chaîne de surveillance de la contamination interne

Dans cette partie nous allons aborder les différents systèmes de surveillance répartis dans les installations nucléaires visant à limiter la contamination radioactive des intervenants en la détectant au plus tôt.

### 5.1 Organisation de la zone contrôlée

La zone contrôlée est organisée de manière à limiter le risque de contaminations interne et externe. En effet, il s'agit d'une zone dont l'accès et le séjour sont soumis à une réglementation spéciale pour des raisons de protection contre les rayonnements ionisants et de confinement de la contamination radioactive.

L'accès en zone contrôlée se fait par un portique d'accès spécifique après avoir revêtu une tenue de circulation complète dite « universelle » comprenant chaussettes, tee-shirt, calot, gants en coton, chaussures de sécurité de zone, protections oculaires et casque. Il est également obligatoire de porter un dosimètre à lecture immédiate en plus du dosimètre passif à lecture différée.

L'accomplissement des besoins physiologiques (repas, élimination) ne peut donc être réalisé en ZC.

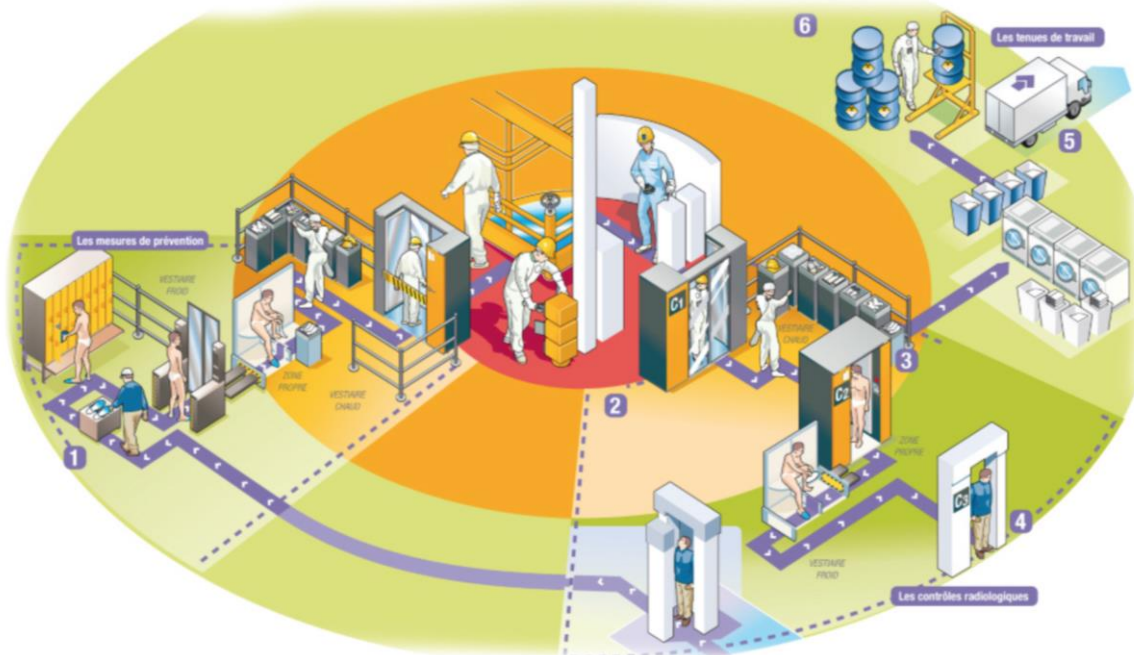


Figure 16 : Organisation de la zone contrôlée avec les portiques de contrôle C1, C2 et C3 et l'ATP

## 5.2 Stations de surveillance

Des systèmes de mesure appelés balises sont utilisées pour le contrôle en continu :

- de la contamination atmosphérique de l'air par des poussières radioactives (balises aérosols, iodes, tritium mobiles ou fixes),
- du niveau de radioactivité (balises Gamma, neutrons).

Ces balises permettent la détection en temps réel d'un fonctionnement anormal d'une installation. Le déclenchement de celles-ci entraîne l'évacuation des zones concernées et le passage au service médical pour contrôle ATP.

## 5.3 Portiques de contrôle radiologique

La circulation des intervenants dans une centrale nucléaire est organisée de façon à ce que les personnes quittant une zone à risque de contamination passent obligatoirement par trois portiques successifs de détection de la radioactivité, nommés C1 (contrôle en tenue de travail), C2 (contrôle en sous-vêtements) et puis C3 (contrôle en sortie de site).



Figure 17 : Portique de sortie de zone contrôlée C2

## 6 L'anthropogammamétrie

### 6.1 Principe de fonctionnement

La contamination interne par des substances radioactives est la seconde cause d'exposition aux rayonnements ionisants après l'irradiation externe. Sur chaque site nucléaire, c'est le médecin du travail EDF qui a la responsabilité de l'évaluation de la contamination interne et de la surveillance de son élimination.

Contrairement à l'exposition externe, il n'existe pas d'appareil permettant de mesurer directement la dose due à une source interne. La surveillance des salariés exposés est nécessaire afin de quantifier et d'enregistrer les expositions. Elle est réalisée à l'aide d'Anthropogammamètre (ATP) dont le principe de fonctionnement repose sur la détection des rayonnements Gamma émis par les radionucléides incorporés par l'organisme. L'ATP permet de détecter une éventuelle contamination interne, d'identifier les radionucléides incorporés et de mesurer l'activité présente dans l'organisme.

Cet examen vient en complément de la chaîne de contrôles radiologiques de sortie de zone contrôlée (portique C1, C2, C3).

### 6.2 Matériels

Le système de mesure est composé :

- d'une enceinte de mesure blindée, nécessaire afin de se prémunir du bruit de fond environnant,

- de deux compteurs à scintillations de grande dimension (un détecteur haut et un détecteur bas),
- d'une électronique de détection,
- d'un poste de pilotage équipé d'un logiciel identique pour toutes les unités de mesure ATP.

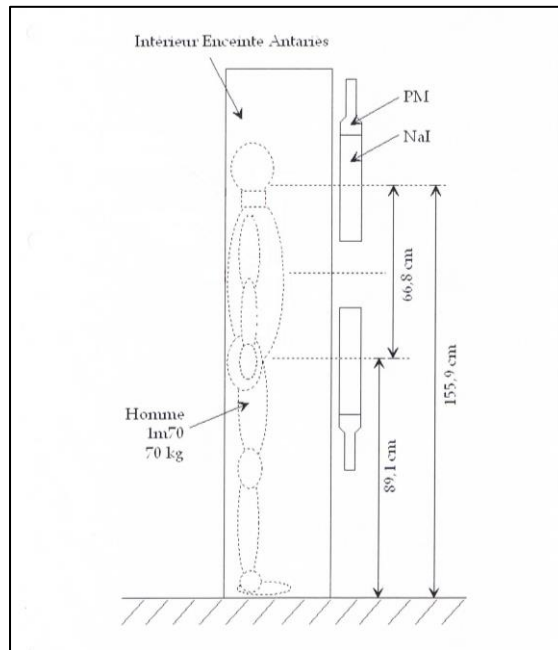


Figure 18 : Enceinte de mesure corps entier (source EDF)

Chaque détecteur à scintillations est constitué d'un cristal d'iodure de sodium (NaI) activé au thallium. Les rayonnements Gamma excitent le cristal, celui-ci produit alors une impulsion lumineuse qui interagit avec une photocathode. Les électrons produits par la photocathode sont amplifiés par une série de dynodes au sein du photomultiplicateur. Il en résulte un signal électrique secondairement interprété.

La charge électrique totale des électrons collectés est proportionnelle au nombre de photons.

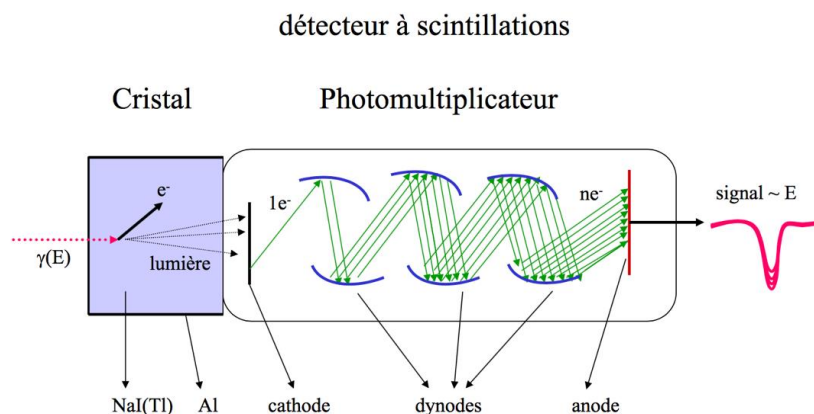


Figure 19 : Principe de fonctionnement d'un détecteur à scintillations

Les détecteurs à scintillations sont associés à une électronique de détection : un préamplificateur, un amplificateur, un analyseur multicanal permettant de connaître l'énergie du photon qui a interagi avec le détecteur ainsi que l'activité présente.

### 6.3 La mesure ATP

L'anthropogammamétrie est réalisée en respectant la Norme NF EN ISO/CEI 17025. Elle est également soumise à un programme de confirmation et de suivi métrologique permettant de s'assurer que les équipements de mesures répondent aux exigences d'utilisation. Les équipements de mesure et la méthode utilisée pour sa réalisation ont été validés par le COFRAC (Comité Français d'Accréditation).

L'examen est réalisé debout, dos contre la paroi postérieure de l'appareil, en tenue de travail après avoir éliminé toute contamination externe. La mesure est réalisée pendant 60 secondes.

La surveillance et l'évaluation de l'exposition interne sur un site nucléaire concernent tous les travailleurs (agents EDF, prestataires, salariés indépendants) pouvant intervenir en zone nucléaire.

L'ATP est réalisée *a minima* annuellement pour ces salariés et :

- avant de quitter un site nucléaire pour les salariés prestataires,
- pour tous les salariés ayant travaillé sur un chantier identifié à risque de contamination, pour tous les salariés après évacuation du personnel présent dans le Bâtiment Réacteur ou Bâtiment Combustible,
- après détection d'une contamination aux portiques,
- à la demande du salarié.

En cas de contamination interne, un suivi ATP est réalisé jusqu'à élimination complète de la contamination.

### 6.4 Validation technique de la mesure

Les résultats sont confidentiels et sont transmis après validation par le médecin responsable de la mesure sous forme de compte-rendu (*Cf. annexe 2*) au médecin du travail du salarié.

La dose efficace engagée évaluée est enregistrée dans le cumul dosimétrique de la personne concernée. Les résultats des mesures sont intégrés dans l'application informatique SISERI de l'IRSN (Système d'Information de la Surveillance des Expositions aux Rayonnements Ionisants). Elle s'ajoute à la dose externe organisme entier pour le mois concerné.

#### 6.4.1 Spectre ATP normal

La mesure ATP corps entier appelée également spectre somme résulte de l'association des mesures des détecteurs haut et bas de l'appareil réalisées simultanément.

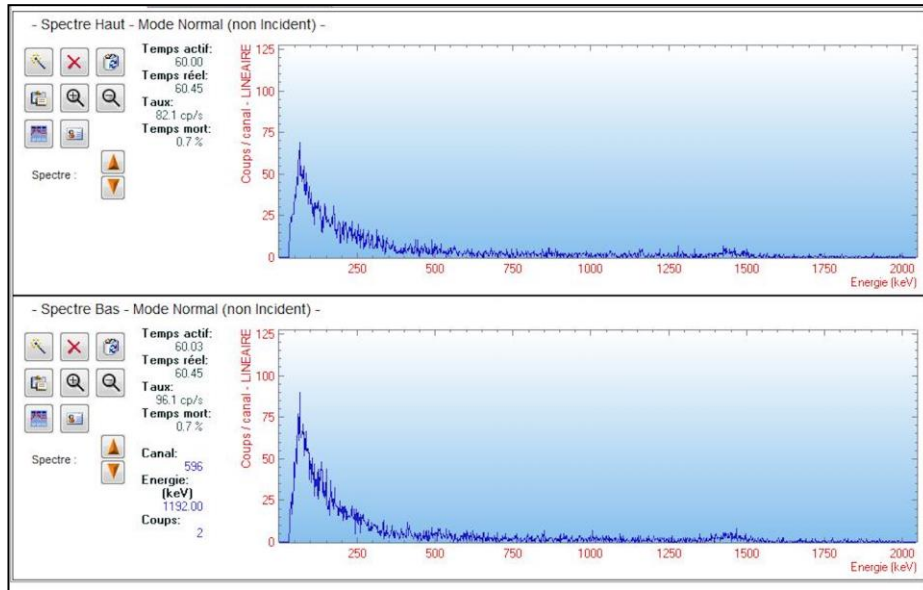


Figure 20 : Spectres haut et bas de mesure Anthropogammamétrie

Une mesure corps entier normale comprend un premier « pic », situé entre 50 et 300 keV d'énergie, correspondant à la mesure du bruit de fond environnant. Un second pic d'énergie à 1450 keV correspond à l'activité du potassium 40 ( $K^{40}$ ) contenu dans l'organisme. La radioactivité liée au  $K^{40}$  est constante et elle équivaut globalement à 6000 désintégrations d'atomes par seconde pour un homme de 70kg.

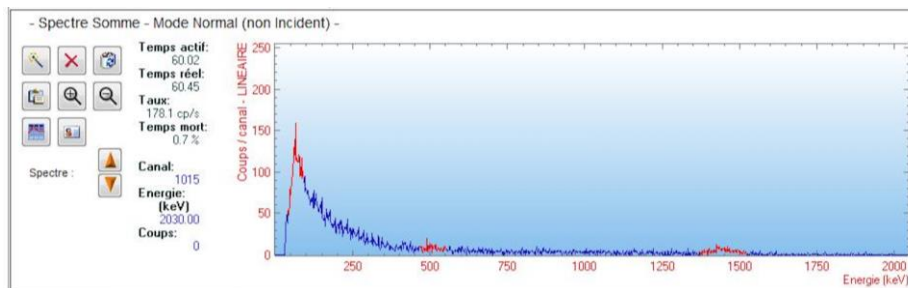


Figure 21 : Spectre somme de mesure Anthropogammamétrie

### 6.4.2 Spectre ATP anormal

Un spectre est anormal lorsque l'on repère visuellement des pics supplémentaires. S'en suit alors une première étape d'identification des radionucléides à l'origine de ces pics grâce à l'analyse en abscisse de leur énergie comme illustré ci-dessous (Cf. figure 23).

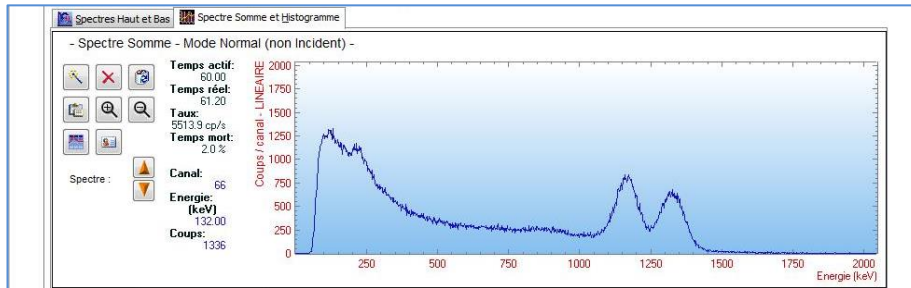


Figure 22 : Spectre ATP corps entier illustrant une contamination au Cobalt 60

Certains radionucléides partagent une proximité dans leurs énergies d'émission. Ils peuvent alors être distingués les uns des autres par l'analyse des seconds ou troisièmes pics présentant un pourcentage d'émission plus faible.

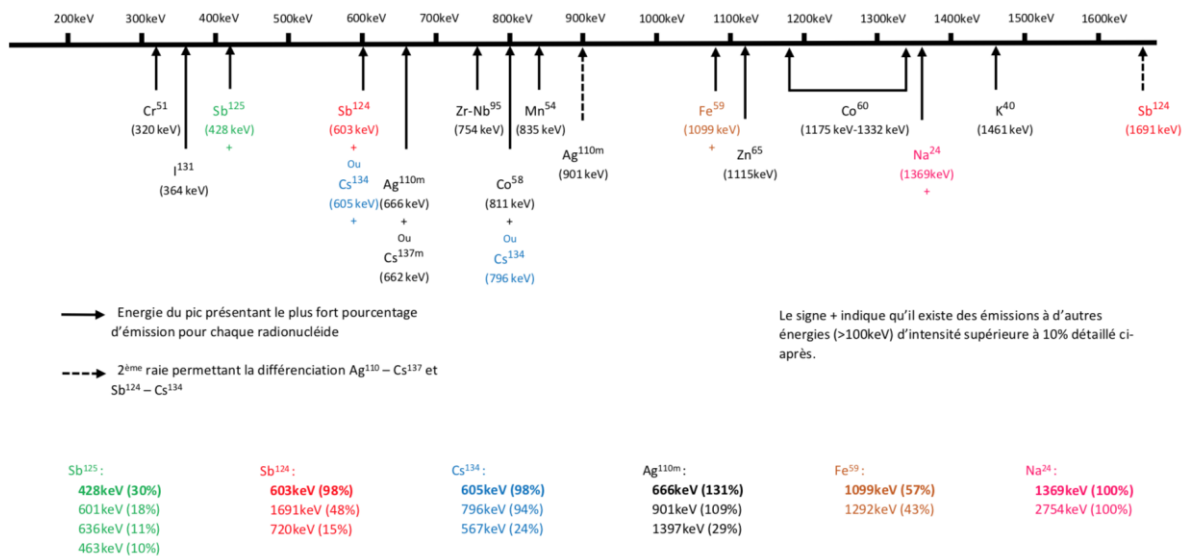


Figure 23 : Table des principaux radionucléides rencontrés lors d'une contamination interne positionnés selon leur(s) énergie(s) d'émission Gamma

La deuxième étape concerne la déconvolution manuelle des pics afin d'en déduire la surface nette. La détermination de la surface nette du pic est réalisée manuellement selon la norme NF S 92-501 (22), aucun algorithme n'étant actuellement suffisamment performant pour le faire de manière automatique.

Des règles de déconvolution doivent être suivies afin de garantir la justesse et la reproductibilité des résultats :

- le début et la fin du pic doivent être correctement identifiés (utilisation de l'outil loupe du logiciel InterWinner) ;
- la courbe de déconvolution (courbe blanche) doit être au plus près de la courbe spectrale (en rouge) ;
- la ligne de base du pic (courbe blanche) doit être « souple » ;
- la résolution doit être acceptable.

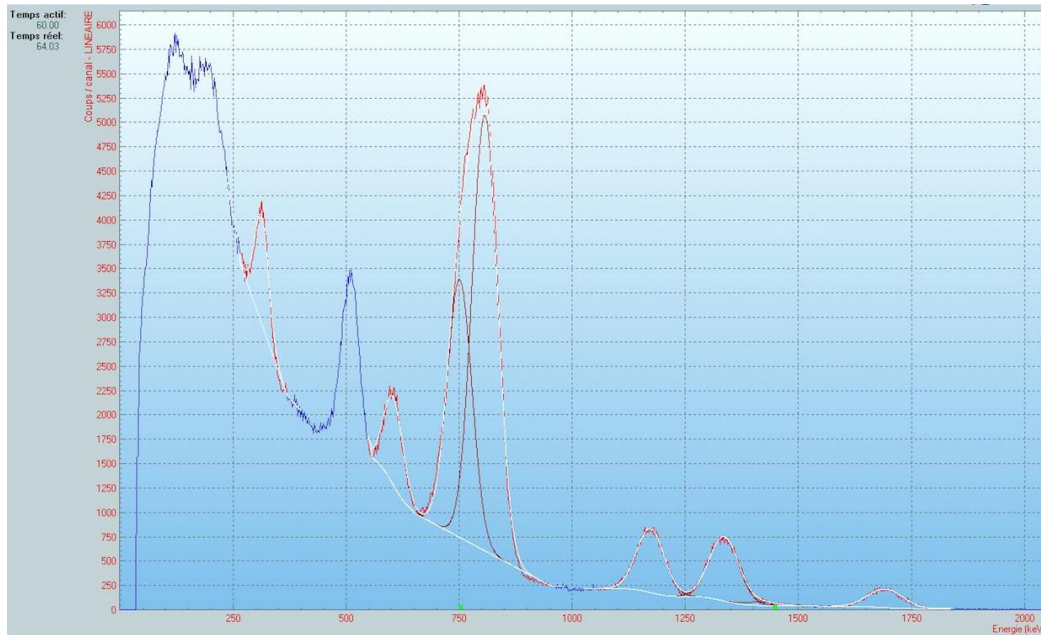


Figure 24 : Exemple de spectre déconvolué (Cas n°1 CNPE N)

La troisième étape concerne l'évaluation de l'activité du radionucléide. Elle se fait grâce à l'utilisation du logiciel de traitement InterWinner® qui permet à partir de l'identification du radionucléide, de l'évaluation de la surface nette du pic, de la connaissance de la courbe d'efficacité de l'appareil d'évaluer l'activité de chaque radionucléide.

## 6.5 Evaluation de la dose efficace engagée liée à la contamination interne

### 6.5.1 Evaluation de l'activité incorporée

On évalue, à partir des mesures individuelles corps entier (ATP), la quantité de radioactivité (en Bq) qui a été incorporée initialement.

L'estimation de l'activité incorporée  $A_i$  est réalisée à partir des résultats des mesures ATP corps entier selon la formule suivante :

$$A_i = \frac{m(t)}{f(t)} \text{ où}$$

$m(t)$  : activité mesurée au temps  $t$  depuis l'incorporation.

$f(t)$  : valeur de la fonction de rétention au temps  $t$  définie par la CIPR.



### 6.5.2 Utilisation des DPUI

L'estimation de la dose efficace engagée  $E_{50}$  est faite à partir de l'estimation de l'activité incorporée.

$$E_{50} = A_{i,inh} \times h(g)_{inh} \text{ où}$$

$h(g)$  : dose par unité d'incorporation (DPUI) définie par la CIPR, exprimée en Sv/Bq.

Les valeurs de DPUI sont fixées par la réglementation française, arrêté du 1<sup>er</sup> Septembre 2003(23) selon le mode d'incorporation, la granulométrie, le radionucléide et sa forme chimique.

Dans le tableau suivant, sont listées les valeurs de DPUI pour un mode d'incorporation par inhalation 5/1 $\mu$ m. Cela permet d'illustrer le niveau de radio toxicité des différents radionucléides rencontrés en cas de contamination interne.

En colonne de droite, les valeurs d'activité en Becquerel mesurée par l'ATP à J1 après l'incorporation correspondant à un niveau de dose interne de 0.1 mSv sont présentées pour quelques radionucléides.

Nucléide	Période physique	Type	DPUI Inhalation 1 $\mu$ m (Sv.Bq-1)	DPUI Inhalation 5 $\mu$ m (Sv.Bq-1)	Activité inhalée (Bq)	Activité mesurée (Bq)
Co <sup>60</sup>	5,271 ans	S	2,90E-08	1,70E-08	5882	2941
I <sup>131</sup>	8,04 jours	F	7,60E-09	1,10E-08	9091	4545
Cs <sup>134</sup>	2,06 ans	F	6,80E-09	9,60E-09	10417	5208
Ag <sup>110m</sup>	250 jours	S	1,20E-08	7,30E-09	13699	6849
I <sup>125</sup>	60,1 jours	F	5,30E-09	7,30E-09	13699	6849
Cs <sup>137</sup>	30 ans	F	4,80E-09	6,70E-09	14925	7463
Sb <sup>124</sup>	60,2 jours	M	6,10E-09	4,70E-09	21277	10638
Zr <sup>95</sup>	64 jours	S	5,50E-09	4,20E-09	23810	11905
Sb <sup>125</sup>	2,77 ans	M	4,50E-09	3,30E-09	30303	15152
Fe <sup>59</sup>	44,5 jours	M	3,50E-09	3,20E-09	31250	15625
Zn <sup>65</sup>	244 jours	S	2,90E-09	2,80E-09	35714	17857
Sn <sup>117M</sup>	13,6 jours	M	2,30E-09	2,20E-09	45455	22727
Sn <sup>113</sup>	115 jours	M	2,50E-09	1,90E-09	52632	26316
Co <sup>58</sup>	70,8 jours	S	2,00E-09	1,70E-09	58824	29412
Zr-Nb95					59223	29611
Nb <sup>95</sup>	35,1 jours	S	1,40E-09	1,30E-09	76923	38462
Mn <sup>54</sup>	312 jours	M	1,50E-09	1,20E-09	83333	41667
Co <sup>57</sup>	271 jours	S	9,40E-10	6,00E-10	166667	83333
Cr <sup>51</sup>	27,7 jours	S	3,60E-11	3,60E-11	277778	138889

Tableau 3 : Valeurs d'activité inhalée (en Becquerel) et mesurée à l'ATP à J1, en fonction des radionucléides, susceptibles de donner une dose de 0.1 mSv

## 7 Cinétique d'une contamination interne

Le principe de base de la surveillance d'une contamination interne repose sur la réalisation de mesures de rétention (ATP) et d'excrétion (RTX). L'interprétation en terme dosimétrique ne peut être réalisée qu'en utilisant des modèles mathématiques simulant le devenir dans l'organisme de l'activité incorporée.

## 7.1 Modèles métaboliques

La connaissance du comportement des substances radioactives au sein de l'organisme est essentielle pour interpréter les mesures d'activité. Des modèles théoriques permettant de connaître le comportement des radionucléides incorporés ont été décrits par la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR(20)) :

- un modèle par ingestion ;
- un modèle par inhalation ;
- un modèle par injection (utilisé en cas de blessure que nous n'aborderons pas dans ce travail).

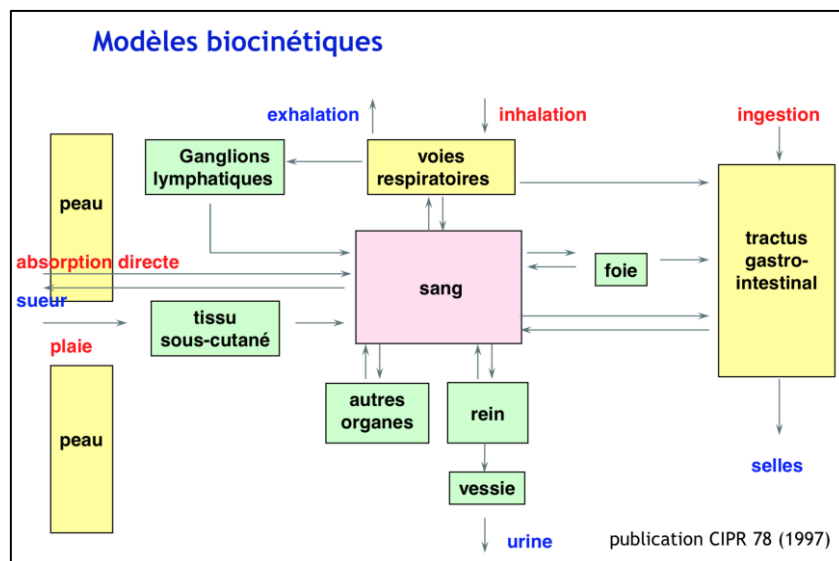


Figure 25 : Modèles biocinétiques des différentes voies d'incorporation des radionucléides (source CIPR(21))

Ces modèles permettent de calculer l'activité contenue dans l'organisme à différents temps après l'incorporation. Ils vont varier selon :

- le radionucléide impliqué dans la contamination,
- la forme physique et chimique des radionucléides,
- la taille des particules (granulométrie).

Pour l'inhalation de radionucléides par les travailleurs, la CIPR a défini l'individu de référence : adulte mâle, respirant par le nez, exerçant une activité légère. Des variations individuelles en termes de masses corporelles ou d'âges peuvent donc être à l'origine d'une variabilité des résultats. (21)

La biocinétique des radionucléides est donc décrite selon des modèles mathématiques compartimentaux avec des niveaux constants de transferts entre les compartiments. Ces compartiments peuvent correspondre à des organes, des tissus ou des ensembles d'organes. Ces coefficients de transfert ont été estimés à partir de données expérimentales animales et de mesures réalisées chez l'Homme.

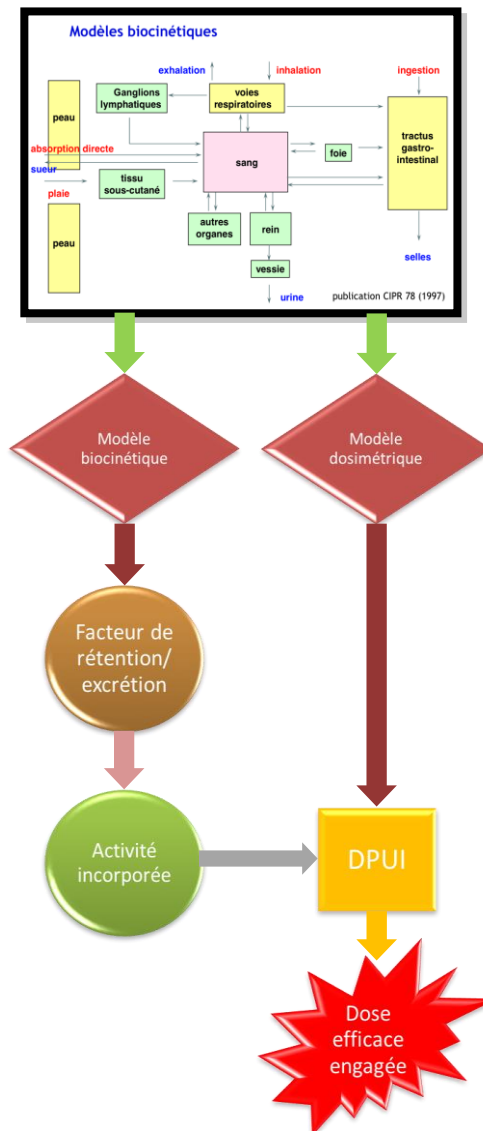


Figure 26 : Processus permettant d'obtenir l'estimation de la dose efficace engagée

## 7.2 Modèle par inhalation

Le modèle par inhalation a été décrit initialement dans la publication 66(24) de la CIPR. Les voies respiratoires comportent cinq régions :

- La région extra thoracique qui est divisée en deux parties : ET1 (passage nasal antérieur) et ET2 (passage nasal postérieur et buccal, le larynx et pharynx) ;
- La région thoracique, divisée en trois parties : la région bronchique (BB : trachées et bronches), bronchiolaire (bb) et alvéolo-interstitielle (AI).

On retrouve en parallèle le système lymphatique représenté par des compartiments associés à ces précédentes régions :  $LN_{ET}$  (ganglions lymphatiques extra thoraciques) et  $LN_{TH}$  (ganglions lymphatiques thoraciques).

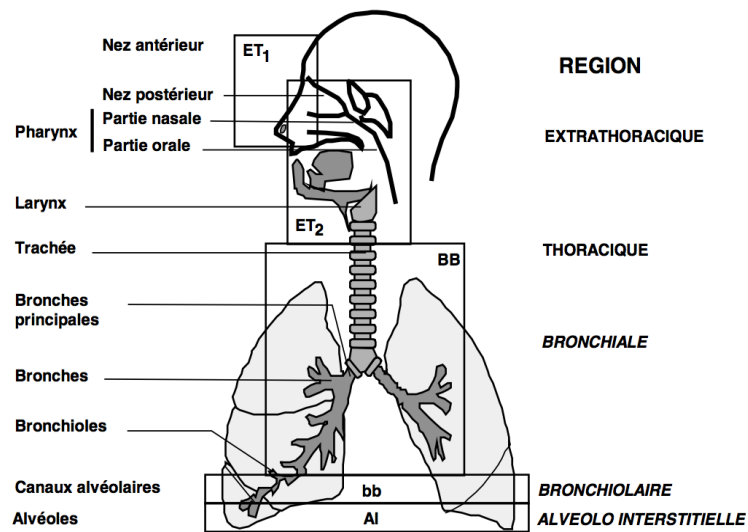


Figure 27 : Représentation des différentes régions du modèle respiratoire de la CIPR

### 7.2.1 Dépôt des aérosols

Les aérosols correspondent à l'ensemble des particules solides ou liquides en suspension dans un milieu gazeux présentant une vitesse de chute négligeable.

Les particules sont des petits éléments de matière solide ou liquide en suspension dans l'air ou déposées sur une surface et qui sont susceptibles de se mettre en suspension. Elles n'ont généralement pas une forme sphérique, elles sont donc définies par rapport à leur propriété dynamique (vitesse de sédimentation d'une particule sphérique équivalente).

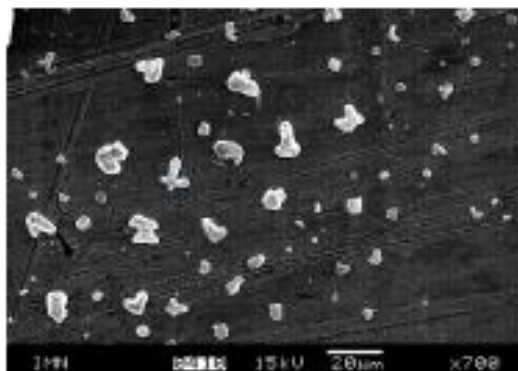


Figure 28 : Aérosols vu en microscopie électronique

Les aérosols atmosphériques, radioactifs ou non, présentent des spectres granulométriques polydispersés, c'est-à-dire qu'ils sont constitués d'un grand nombre de particules de tailles différentes.

On parle alors de DAMA (Diamètre Aérodynamique Médian en Activité) ou granulométrie pour caractériser la dispersion d'un aérosol.

Deux paramètres permettent de définir la granulométrie d'un aérosol :

- le diamètre médian correspondant à la valeur du diamètre aérodynamique de sorte que la moitié de l'activité de l'aérosol soit associée à des particules plus petites et que l'autre moitié soit liée à des particules plus grosses ;
- l'écart type géométrique qui représente la dispersion en diamètre de l'aérosol.

Lors d'une inhalation d'un aérosol radioactif, une partie de l'aérosol est directement exhalée (entre 18% ( $5\mu\text{m}$ ) et 48% ( $1\mu\text{m}$ ) selon la granulométrie). Le reste se dépose dans les voies aériennes soit par impactation, diffusion ou sédimentation.

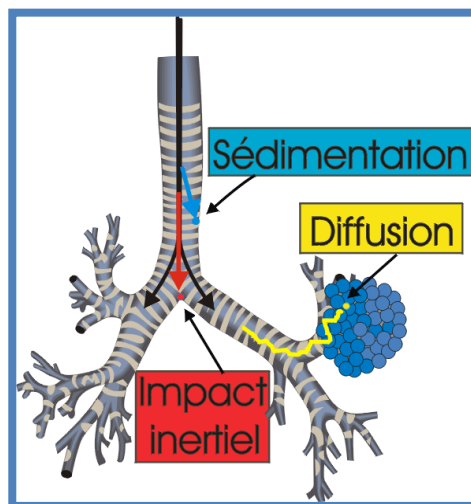


Figure 29 : Processus régissant le comportement des aérosols

Les proportions de particules déposées et leurs répartitions sont dépendantes des caractéristiques de l'aérosol mais également du mode respiratoire du travailleur (respiration nasale ou buccale) et de la physiologie pulmonaire (Cf. figure 30).

Les aérosols de faible granulométrie vont atteindre les régions « profondes » des poumons. Les mécanismes de remontées muco-ciliaires y étant plus faibles, la rétention pulmonaire est donc plus importante pour ces aérosols. La cinétique d'évolution dans l'organisme est donc fonction de la granulométrie.

Le Diamètre Aérodynamique Médian en Activité (DAMA) recommandé pour les travailleurs est de  $5\mu\text{m}$  selon la publication 78 de la CIPR(21). Cette valeur est considérée comme étant plus représentative des aérosols présents dans les lieux de travail que celle de  $1\mu\text{m}$  utilisé par défaut dans la publication 30 de la CIPR(25).

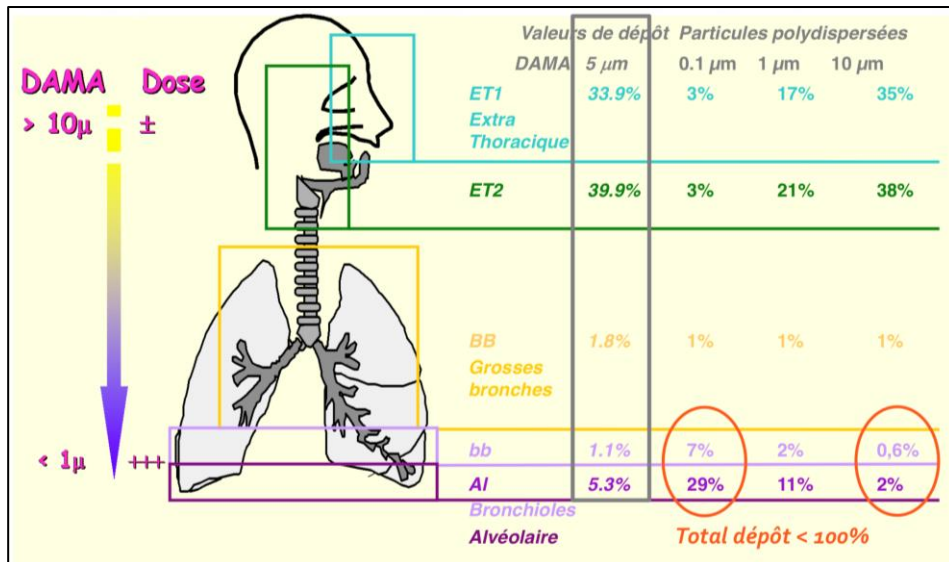


Figure 30 : Dépôt régional des aérosols inhalés chez le travailleur de référence (en pourcentage de l'activité inhalée)(21)

La prise en charge d'un intervenant contaminé nécessite tout d'abord la réalisation d'une épreuve de mouchage, les aérosols déposés en région ET1 sont alors éliminés de l'organisme. L'activité visible à l'anthropogammamétrie ne représente alors plus que 48,1% (5µm) ou 35% (1µm) de l'activité incorporée initialement.

### 7.2.2 Translocation - Epuration

L'épuration des autres compartiments de l'appareil respiratoire, correspondant au mouvement du radionucléide du site de dépôt vers d'autres sites en vue de son utilisation, de son stockage ou de son élimination se fait par des mécanismes de transport mécanique à partir des surfaces des voies aériennes et par l'absorption sanguine (solubilisation) qui est plus ou moins rapide.

Le transport des radioéléments est défini par le modèle décrit par la CIPR selon la figure suivante.

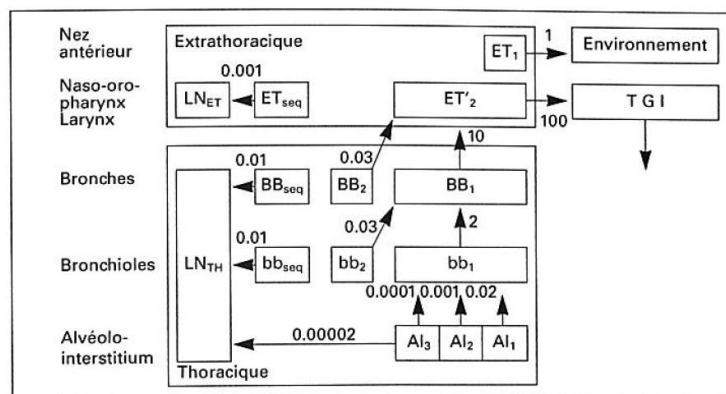


Figure 31 : Modélisation du transport des particules par épuration muco-ciliaire et drainage lymphatique (24)

Résultant de l'action combinée du mucus et des cellules ciliées tapissant le tractus respiratoire de la trachée jusqu'aux bronchioles terminales, la remontée muco-ciliaire permet l'élimination de particules radioactives inhalées. L'ensemble rejoint ensuite le tractus digestif par l'intermédiaire de l'œsophage.

Les macrophages participent également au transport des particules radioactives déposées dans la région alvéolo-interstitielle de deux manières possibles, soit en les transportant vers les ganglions lymphatiques ou en les éliminant via la remontée muco-ciliaire. La vitesse de transport est identique pour toutes les particules.

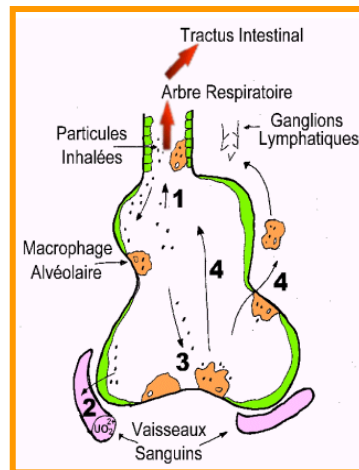


Figure 32 : Mécanisme d'épuration des voies respiratoires (26)

La translocation des autres compartiments de l'appareil respiratoire, correspondant au mouvement du radionucléide du site de dépôt vers d'autres sites en vue de son utilisation, de son stockage ou de son élimination dont l'importance est fonction de la forme physico-chimique du radionucléide.

Trois formes physico chimiques ont été décrites pour caractériser les radioéléments incorporés :

- substances de type F (« Fast ») : substances déposées rapidement absorbées dans les fluides de l'organisme à partir des voies respiratoires. Cas du Césium, de l'Iode et du Tritium expliquant également le passage transcutané rapide ;
- substances de type M (« Moderate ») : substances qui ont une vitesse d'absorption intermédiaire dans les fluides de l'organisme à partir des voies respiratoires ;
- substances de type S (« Slow ») : substances qui sont relativement insolubles dans les voies respiratoires. Exemple : les oxydes de Cobalt.

En centrale nucléaire, les radiocontaminants sont réputés être le plus souvent sous la forme d'oxydes en dehors des produits de fissions.

### 7.3 Modèle par ingestion

Un second modèle d'incorporation a été décrit par la CIPR, il s'agit d'un modèle par ingestion. Dans ce modèle, les substances radioactives atteignent directement le tractus gastro-intestinal (mains contaminées portées à la bouche, ...) ou indirectement par épuration muco-ciliaire des voies respiratoires.

Le modèle gastro-intestinal est constitué de quatre compartiments successifs : l'estomac (ST), l'intestin grêle (SI), le colon supérieur (ULI) et inférieur (LLI). Les taux de transfert  $\lambda$  correspondent aux différents transferts entre les compartiments.

Le facteur  $f_1$  correspond à la partie absorbée dans le sang de l'activité ingérée. Le passage de la barrière digestive dépend avant tout de la solubilité du radiocontaminant. L'absorption  $f_1$  vers le sang est donc variable selon la forme physico-chimique du composé radioactif.

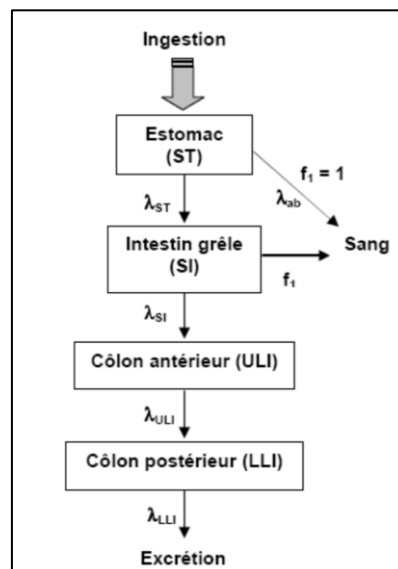


Figure 33 : Modèle gastro-intestinal décrit par la CIPR(25)

	$f_1$
Transfert total $f_1 = 1$	H, C, F, Na, S, Cl, K, Br, Rb, I, Cs, Hg (organique), Mo, At, Fr P, Se Mg, Zn, Tc, As, Cu, Po Ca, Sr, W
Transfert Très faible (< 1%)	Ba, Pb, Ra, Sn, Hg (inorganique) Al, Fe, Co, Mn, Cr, Au, Sb Cd, Bi, Ag, Ni, Ru U, Sn Ti, V, Nb, Os, Ir, Pt Be actinides (sauf U), lanthanides

Figure 34: Valeurs du  $f_1$  selon les radioéléments définis par la CIPR



Le modèle gastro-intestinal a été amélioré et remplacé par un modèle alimentaire(27) décrivant le tractus digestif avec une plus grande précision. Dans ce modèle, l'absorption sanguine des radioéléments est possible depuis l'estomac, l'intestin grêle, le colon supérieur et inférieur ainsi que le recto sigmoïde. De plus, la rétention d'activité est possible dans la bouche ainsi que dans les parois du tube digestif.

Ces différents modèles sont utilisés pour calculer les coefficients de dose après l'incorporation de radionucléides. Ces coefficients sont mis à jour au fil de l'évolution des modèles. L'ensemble des calculs de doses efficaces effectués dans ce travail, ont été réalisés à partir des valeurs issues des tables de doses efficaces engagées par unité d'incorporation (DPUI) par inhalation et par ingestion applicable aux travailleurs issus de la réglementation française (tableau 3.1 de l'arrêté du 1<sup>er</sup> septembre 2003(23)). Cependant, les dernières données scientifiques(28)-(29) sont en faveur d'une majoration des coefficients de DPUI, notamment pour le Cobalt 60.

## 7.4 Comparaison des modèles d'incorporation

Les mesures à J1, J2, J3 sont respectivement des mesures réalisées à environ 24, 48 et 72h de l'évènement de contamination. La mesure J0 correspond à la mesure réalisée au plus près de la contamination.

L'étude de la cinétique de décroissance permet alors d'identifier le mode d'incorporation correspondant à notre cas de contamination. Nous avons étudié dans ce travail l'application de ces modèles théoriques à des contaminations en situation réelle de travail.

Le graphique suivant représente l'activité contenue dans l'organisme au cours du temps selon les modèles théoriques d'incorporation définis par la CIPR. Il permet d'apprécier les variations de cinétique de décroissance entre les modes d'incorporation.

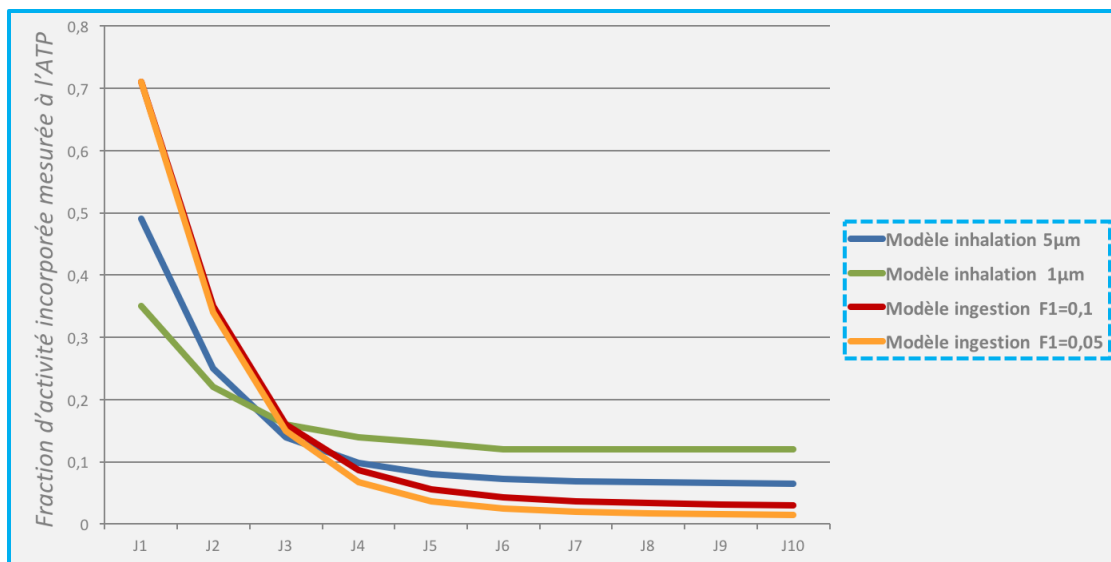


Figure 35 : Evolution de l'activité mesurée pour 1Bq de Cobalt 60 incorporée (types S) selon le modèle biocinétique au cours des dix premiers jours (Données CIPR(21))

## 8 Examens radiotoxicologiques

### 8.1 Nature des examens radiotoxicologiques

L'analyse des examens radiotoxicologiques correspond à la mesure de l'activité excrétée dans les urines ou les selles pendant une période donnée. Elle est réalisée chez EDF en cas de contamination interne où la DEE estimée à partir de l'ATP dépasse les 0,5mSv. L'ensemble des recueils sont réalisés par le salarié pendant 72h après la contamination.

#### 8.1.1 Les selles

On procède tout d'abord à la calcination des prélèvements pendant 48h, les cendres sont ensuite analysées à l'aide d'un spectromètre  $\gamma$ -X, doté de détecteurs au Germanium, à la recherche de produits de fission ou d'activation (Cf. figure 37). Ensuite, une spectrométrie  $\alpha$  est réalisée pendant 48h, après une étape de purification radiochimique de 4 jours, à la recherche d'actinides.

#### 8.1.2 Les urines

Une première mesure à l'aide d'un compteur à scintillation liquide est réalisée à la recherche de Tritium. Ensuite, une recherche de produits d'activation et de fission est menée à l'aide d'un spectromètre  $\gamma$ -X.



Figure 36 : Mesures des recueils urinaires par spectrométrie  $\gamma$ -X

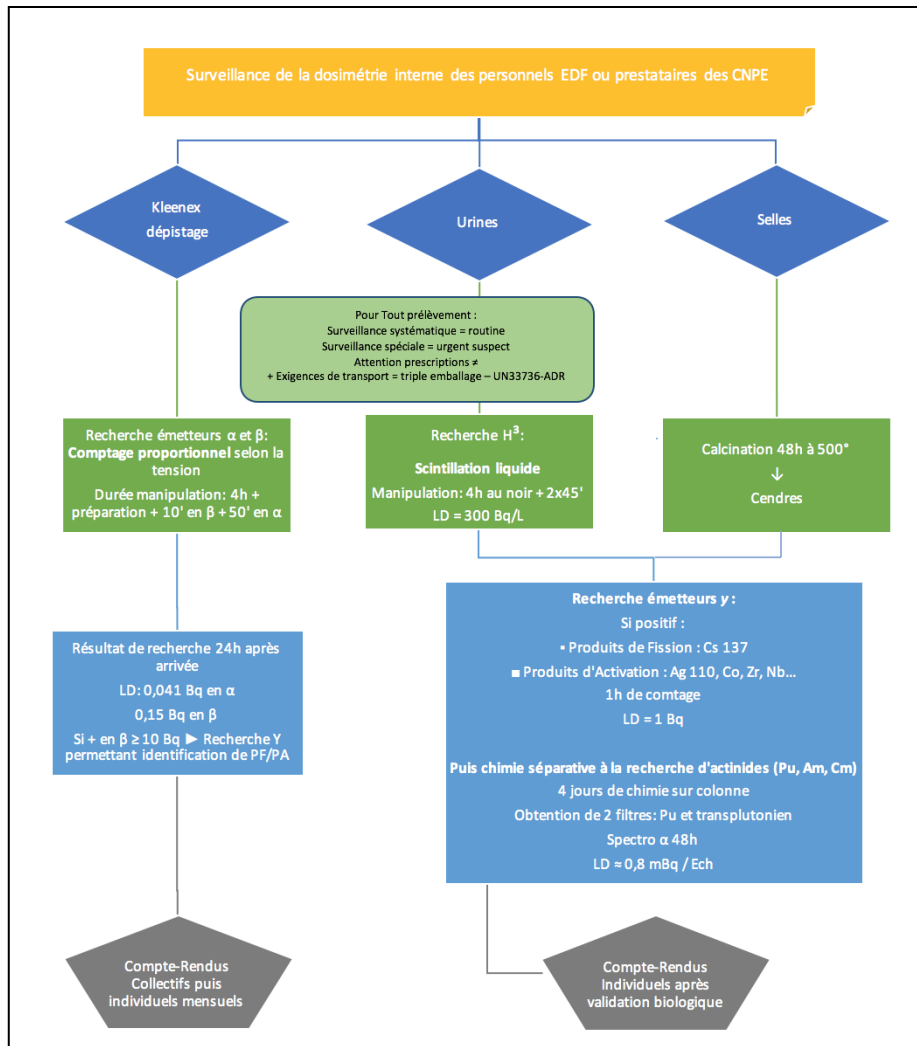


Figure 37 : Protocole de réalisation des examens radiotoxicologiques au LBM d'EDF et indication sur la durée des étapes successives

## 8.2 Les modèles biocinétiques

Des modèles mathématiques décrivant la cinétique d'évolution des radionucléides entre les différents organes jusqu'à leur élimination par excrétion fécale ou urinaire ont été définis de manière spécifique par la CIPR(21).

L'estimation de l'activité incorporée initiale est donc possible à partir des coefficients d'excrétions urines et selles correspondants aux jours des recueils.

Par exemple, le modèle biocinétique du Cobalt 60 défini par la CIPR est présenté sur la figure suivante.

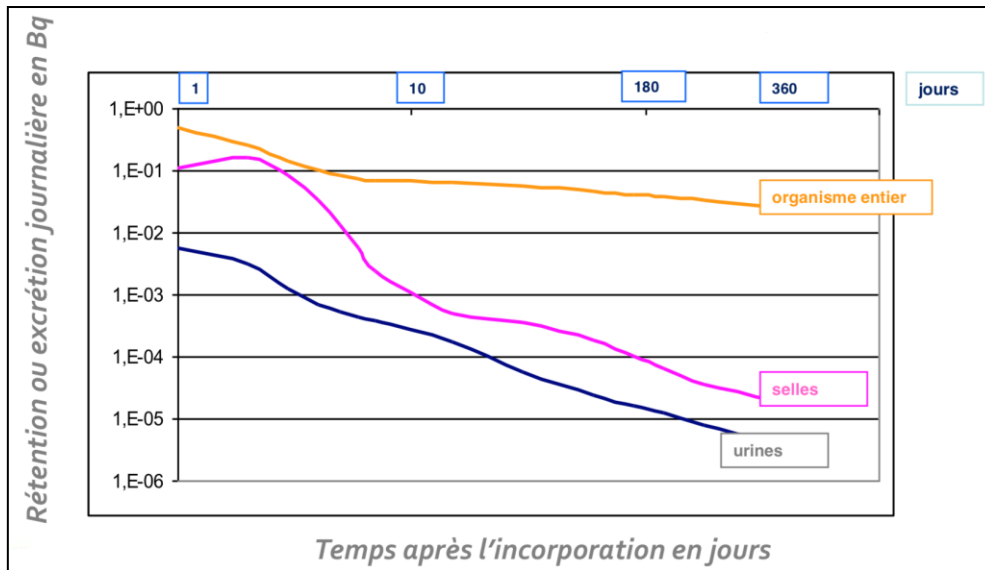


Figure 38 : Fraction d'activité incorporée et excrétée de Cobalt 60 exprimée en Becquerel jusqu'à un an après l'incorporation (modèle inhalation 5 $\mu$ m Type S)(21)

L'utilisation des fonctions d'excrétion issues des modèles biocinétiques de la CIPR permet d'estimer l'activité initiale incorporée  $A_i$  après contamination interne. Elle est réalisée à partir des résultats des mesures RTX selon la formule suivante :

$$A_i = \frac{m(t)}{f(t)} \text{ où}$$

$m(t)$  : activité mesurée à un temps (t) donné suivant l'incorporation.

$f(t)$  : valeur de la fonction d'excrétion à un temps (t) donné suivant l'incorporation.

## 9 Bilan des expositions internes

### 9.1 Bilan IRSN

En 2016, 275659 examens de surveillance de routine ont été effectués, dont 246794 dans le secteur du nucléaire. 1185 sont revenus positifs, ce qui représente 0,4%.

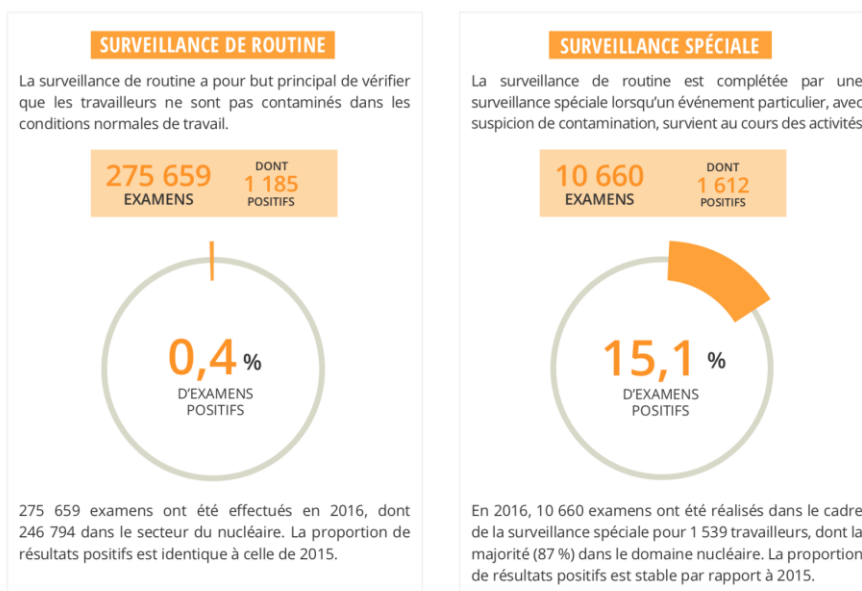


Figure 39 : Bilan des expositions internes source IRSN (30)

### 9.2 Bilan EDF

En 2014, plus de 49000 personnes sont entrées au moins une fois dans l'îlot nucléaire sur l'ensemble des CNPE français. Environ 130000 examens anthropogammamétriques ont été réalisés par les services médicaux.

En tout, ce sont environ 3000 personnes qui ont été prises en charge par les équipes médicales pour décontamination corporelle, associée pour 439 d'entre eux à un suivi d'exposition interne (31). Aucune dose efficace engagée supérieure à 0.5 mSv n'a été enregistrée.

Pour les centrales en exploitation :

- entre 1983 et 2003 : 45 travailleurs ont eu un enregistrement de dose efficace engagée supérieure à 0.5mSv, pour un total de 132 mSv dont une dose maximale de 47 mSv en 1984 ;
- entre 2004 et 2014 : une dose supérieure à 0,5mSv a été enregistrée pour 5 travailleurs, pour un total de 3 mSv et une dose maximale de 1 mSv.

Pour les centrales en démantèlement :

- entre 1983 et 2003 : 84 travailleurs ont eu un enregistrement de dose supérieure à 0.5mSv, représentant en totalité 192 mSv et une dose maximale évaluée à 20mSv en 1988.
- entre 2004 et 2014 : on recense 8 travailleurs qui ont eu un enregistrement de dose supérieur à 0.5 mSv, soit 11mSv au total et une dose maximale de 2 mSv.

## **10 Principes actuels d'évaluation de la dose interne et perspectives futures**

Actuellement, lors d'une exposition interne d'un salarié, l'évaluation et l'enregistrement de la dose efficace ne se fait qu'à partir d'un niveau d'exposition suspecté à l'anthropogammamétrie (ATP) correspondant à une dose efficace (DE) de 0.5 mSv. En dessous, la contamination interne était considérée comme non significative. Cette évaluation de dose nécessitait la réalisation et l'analyse d'examen radiotoxicologiques des urines et des selles pendant les 72h suivant l'évènement contaminant. Les ATP réalisés les jours suivants l'incident de contamination servaient surtout d'examen de suivi de la contamination interne à titre qualitatif. Les calculs de dose étaient principalement réalisés par le laboratoire de biologie médicale (LBM) d'EDF à partir des analyses radiotoxicologiques.

Cependant, plusieurs facteurs conduisent à revoir cette pratique :

- la réglementation (arrêté du 17 juillet 2013) qui indique que le médecin du travail détermine la dose efficace engagée « dès lors que les résultats des mesures de l'exposition interne sont non nuls ».
- l'accréditation des mesures ATP par le COFRAC depuis 2008 qui légitimise l'utilisation de ce type d'analyse pour le calcul de dose.

### **10.1 Protocole de détection et de prise en charge d'une contamination**

La présence de portiques de contrôle en sortie de zone contrôlée va permettre la détection rapide des intervenants contaminés. En effet, la décontamination doit être réalisée le plus tôt possible en évitant le passage d'une contamination externe en contamination interne.

La contamination de la tête est toujours prise en charge par le service de santé au travail du CNPE. La contamination hors tête est recontrôlée sur place après lavage de l'intervenant.

La prise en charge d'un contaminé est illustrée par le schéma suivant.

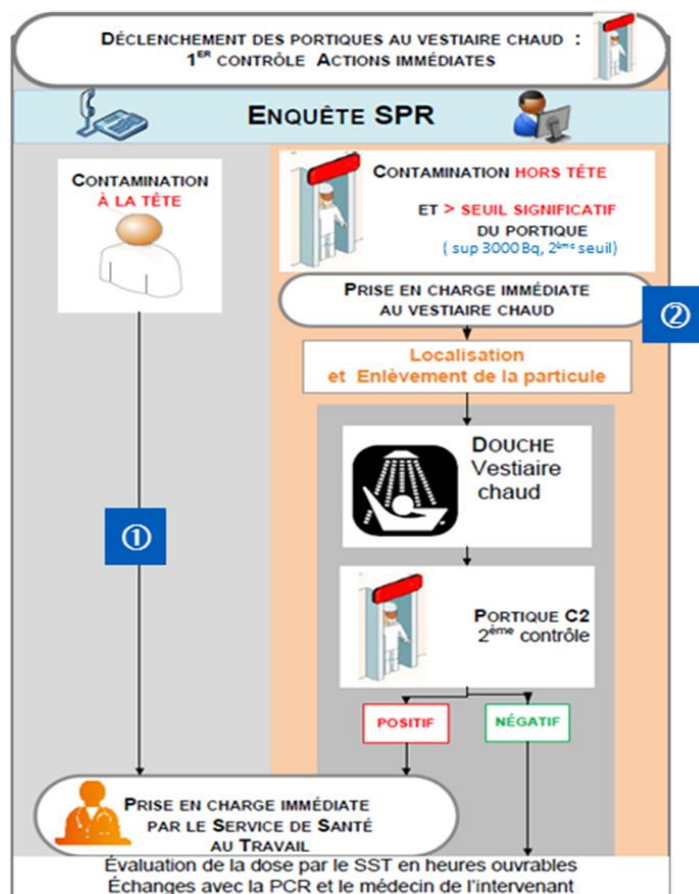


Figure 40 : Protocole de prise en charge d'une contamination en CNPE

## 10.2 Décontamination au SST

Dans un premier temps, il est important de réaliser un mouchage. Celui-ci va permettre l'élimination des « grosses » particules impactées dans les voies nasales (région ET1).

La localisation de la contamination est réalisée à l'aide d'un contrôleur à main (COMO 170E). On procède ensuite à la décontamination des mains, et du visage en protégeant les orifices (yeux, oreilles, nez, bouche) afin d'éviter tout transfert de contamination externe en contamination interne.

La décontamination corporelle est ensuite réalisée par le salarié (douche) à l'aide de savon et ce, jusqu'à la négativation des contrôles cutanés au COMO.



*Figure 41 : Contrôleur à main COMO 170E*

### **10.3 Contrôle de la contamination interne**

La dernière étape consiste à réaliser une mesure anthropogammamétrique corps entier. L'éventuelle présence de radioéléments à l'examen ATP est liée à la contamination interne de l'intervenant. Si le spectre somme ATP est anormal (*cf. partie 1 chapitre 6.4.1*) cela signifie la présence de contamination interne.



## **Deuxième Partie : Elaboration et validation d'une méthode d'évaluation de la DEE à partir du suivi ATP**

Dans cette seconde partie, nous allons présenter l'objectif et la méthode utilisée pour réaliser ce travail de thèse. Ensuite, seront détaillés l'ensemble des résultats obtenus.

### **1 Objectif de l'étude**

Jusqu'alors, l'évaluation de la dose était faite par l'analyse experte des examens radiotoxicologiques des urines et des selles à partir d'un seuil de contamination estimé à l'ATP de 0.5mSv. La législation a évolué, demandant au médecin du travail de déterminer la DEE dès lors que les résultats des mesures de l'exposition interne sont non nuls et à communiquer à SISERI dès lors qu'il la juge significative.

De plus, l'évolution récente autant technique qu'informatique de l'ATP, accompagnée d'un accroissement des compétences métrologiques du personnel des services médicaux reconnu par l'accréditation COFRAC, autorise l'identification des radionucléides et une quantification de leur activité avec une limite de détection basse. Par exemple, la limite de détection pour le  $\text{Co}^{60}$  est de 300 Bq (pour un examen d'une minute) alors que l'activité incorporée à l'origine d'une dose interne de 0.1 mSv est de 3000Bq environ (*Cf. tableau 3*).

Par analogie avec la dosimétrie externe pour laquelle le seuil d'enregistrement est fixé par la loi à 0.1mSv au maximum, l'objectif de ce travail était donc d'étudier la possibilité d'évaluer une DEE à partir de 0.1mSv et ce, uniquement à partir des mesures ATP successives réalisées après l'évènement contaminant.

### **2 Recueil des données**

#### **2.1 Recensement des cas de contamination interne**

Pour réaliser cette étude, nous avons dans un premier temps analysé l'ensemble des incidents de contaminations internes survenus sur le Centre Nucléaire de Production d'Electricité (CNPE) de Paluel (Normandie) entre 2008 et 2016. Dans l'objectif d'analyser la cinétique de décroissance des examens anthropogammamétriques (ATP), seuls les cas de contamination pour lesquels au moins trois examens ATP successifs étaient disponibles après le jour de contamination (J0), ont été retenus.

Dans un second temps, nous avons étendu l'analyse aux autres CNPE français. Chaque site a été sollicité afin d'obtenir les spectres de cas de contamination interne où au moins trois examens ATP avaient été réalisés après l'évènement contaminant.

## 2.2 Interprétation des examens ATP

Chaque spectre ATP a été déconvolué manuellement à l'aide d'un programme d'analyse de spectres ATP (InterWinner®) selon la norme ATP NF S92 50 et non automatiquement afin de garantir la justesse et la reproductibilité des résultats selon la méthode décrite en première partie.

A partir de chaque pic ainsi déconvolué et de la connaissance de la courbe d'efficacité de l'appareil de mesure anthropogammamétrique utilisé, l'activité d'un radionucléide donné présent dans l'organisme lors de la mesure était évalué. L'analyse de plusieurs examens ATP réalisés à des jours différents après l'évènement de contamination permettait d'obtenir une courbe de décroissance.

Chaque spectre a été déconvolué manuellement par l'auteur, interne en médecine du travail et un contrôle des analyses spectrales a été réalisé par un médecin du travail expert en radioprotection.

## 3 Méthode

Pour chaque cas de contamination interne retenu dans notre étude, il s'agissait d'étudier la possibilité d'identifier un modèle d'incorporation à partir des valeurs d'activité mesurées par les ATP les jours suivant l'incident de contamination.

De la détermination du modèle d'incorporation (Inhalation d'un aérosol de granulométrie de 5 µm, Inhalation d'un aérosol de granulométrie 1 µm, ingestion) dépendent en effet l'évaluation de l'activité incorporée (*cf. partie 1 chapitre 6.5.1*) et l'évaluation de la DEE (*cf. partie 1 chapitre 6.5.2*).

Dans le but d'identifier un modèle d'incorporation correspondant à la contamination interne, deux étapes détaillées au chapitre *ad hoc*, ont été successivement appliquées pour chaque cas retenu dans notre étude :

- l'application d'une recommandation française, la recommandation n°61 de la Haute Autorité de Santé, issue du guide des recommandations de bonne pratique concernant la surveillance médico-professionnelle de l'exposition interne aux radionucléides : appelé test « RBP » dans ce travail.
- l'application d'une méthode préconisée par des experts européens (guide IDEAS(32) : la réalisation du test du  $k_{hi}^2$  facilité par l'utilisation de l'outil informatique CADOR(33).

Pour chacune de ces étapes ces trois hypothèses d'incorporations (Inhalation d'un aérosol de granulométrie de 5 µm, Inhalation d'un aérosol de granulométrie 1 µm, ingestion) ont été testés.

### 3.1 Application de la recommandation 61 de la HAS : test « RBP »

L'utilisation des facteurs de rétention décrits par la publication 78 de la CIPR (21) permet de calculer l'activité incorporée à partir de chacune des mesures réalisées les jours suivant l'évènement contaminant. Selon la recommandation n°61(34), la cohérence de l'estimation de l'activité incorporée obtenue à partir de chaque résultat d'analyse est estimée comme acceptable s'il n'existe pas plus d'un facteur 3 entre les différentes estimations.

Prenons l'exemple du cas de contamination interne n°4 survenu sur le CNPE I :

Dans ce premier tableau, sont décrits les dates de mesures ATP, les radionucléides présents et l'activité mesurée en Becquerel après déconvolution des spectres ATP.

Date	Jour	Heure	Radionucléide	Activité (Bq)
29/12/2016	J0	14h30	Co-60	6050
30/12/2016	J1	08h37	Co-60	2650
30/12/2016	J1	16h36	Co-60	1660
31/12/2016	J2	10h28	Co-60	1680
03/01/2017	J5	08h48	Co-60	930
24/01/2017	J26	08h38	Co-60	1000
06/02/2017	J39	13h20	Co-60	860
10/02/2017	J43	14h44	Co-60	775
17/02/2017	J50	10h11	Co-60	600

Tableau 4 : Suivi anthropogammamétrique du Cas n°4 CNPE I, contamination interne au Co-60

Dans le tableau suivant, sont présentés pour ce cas :

- les trois hypothèses d'incorporation possibles en cas de contamination interne (Inhalation 1 µm ou 5 µm ou Ingestion) ;
- les facteurs de retentions associés au modèle d'incorporation définis par la CIPR, permettant de connaître à partir de chacune des mesures ATP l'activité incorporée initialement ;
- l'estimation de l'activité incorporée définie, pour chacune des mesures réalisées et pour chaque modèle d'incorporation.

Jour	Modèle Inhalation 1 µm			Modèle Inhalation 5µm			Modèle Ingestion		
	facteur de rétention corps entier	activité corps entier(Bq)	activité incorporée correspondante (Bq)	facteur de rétention corps entier	activité corps entier(Bq)	activité incorporée correspondante (Bq)	facteur de rétention corps entier	activité corps entier(Bq)	activité incorporée correspondante (Bq)
J1	0,350	2650	7571	0,490	2650	5408	0,7100	2650	3732
J2	0,220	1680	7636	0,250	1680	6720	0,3400	1680	4941
J3	0,160			0,140			0,1500		
J4	0,140			0,098			0,0680		
J5	0,130	930	7154	0,080	930	11625	0,0370	930	25135
J6	0,120			0,073			0,0250		
J7	0,120			0,069			0,0020		
J8	0,120			0,068			0,0170		
J9	0,120			0,066			0,0160		
J10	0,120			0,065			0,0150		
J20	0,110			0,058			0,0110		
J30	0,099	1000	10101	0,054	1000	18519	0,0089	1000	112360
J40	0,093	860	9247	0,050	860	17200	0,0081	860	106173
J50	0,088	600	6818	0,047	600	12766	0,0076	600	78947
	Moyenne géométrique		8006			10944			27542

Tableau 5 : Activité incorporée correspondant au cas n°4 CNPE I estimée selon les différents modèles d'incorporation

En comparant les écarts entre l'estimation d'activité incorporée la plus basse et la plus élevée on obtient :

- pour le modèle par inhalation 1µm :  $10101/6818 = 1,48$ .

- pour le modèle par inhalation 5µm :  $18519/5408 = 3,42$ . Ce modèle ne peut donc être retenu car l'écart est supérieur à 3.

- pour le modèle par ingestion :  $112360/3732 = 30,1$ . Ce modèle ne peut donc être retenu car l'écart est supérieur à 3.

Dans cet exemple, seule une hypothèse d'incorporation par inhalation 1µm peut être retenue au vu des résultats au test « RBP ».

Le calcul de l'écart entre les différentes estimations peut être réalisé avec la dernière version de la feuille de calcul CADOR. Une représentation graphique du test des recommandations de bonnes pratiques est possible via la sélection « RBP ».

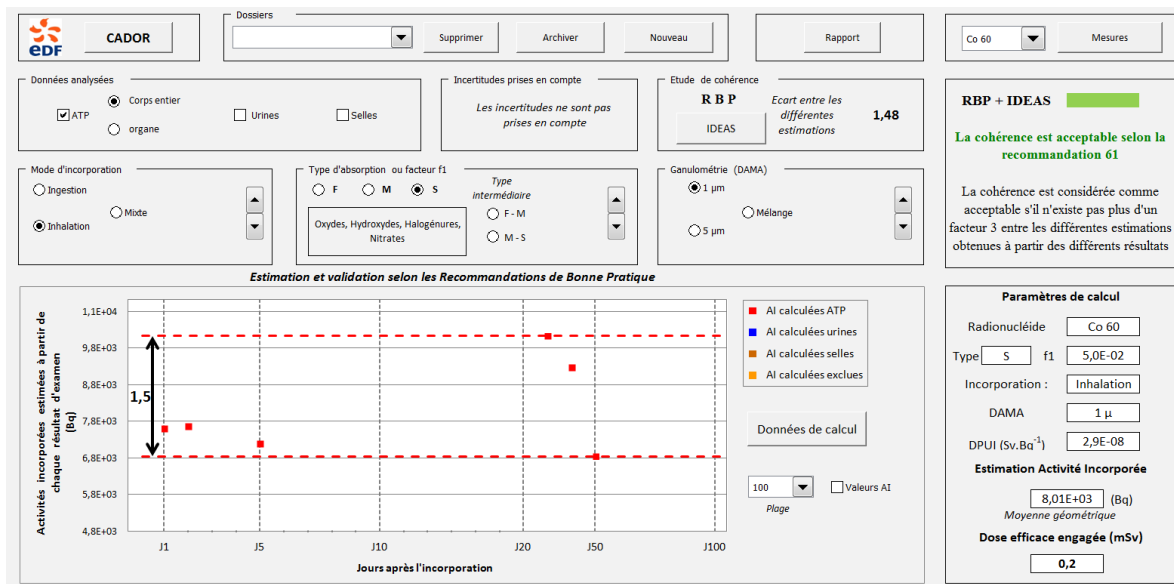


Figure 42 : Valeur et représentation graphique du test RBP pour le modèle Inhalation 1µm correspondant au cas n°4 CNPE I

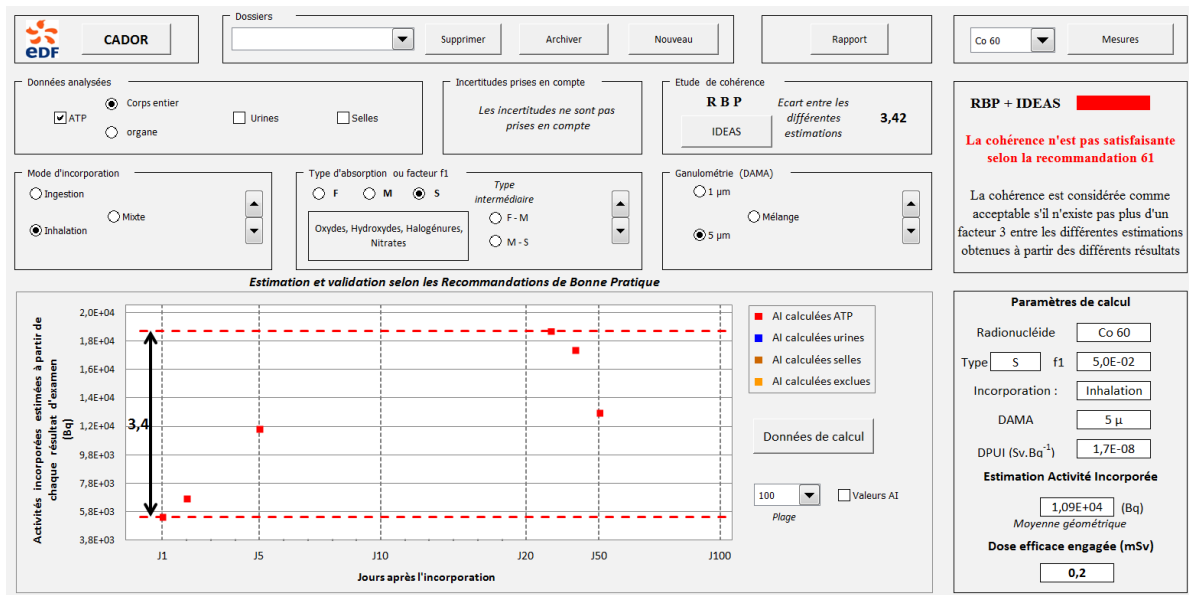


Figure 43 : Valeur et représentation graphique du test RBP pour le modèle Inhalation 5µm correspondant au cas n°4 CNPE I

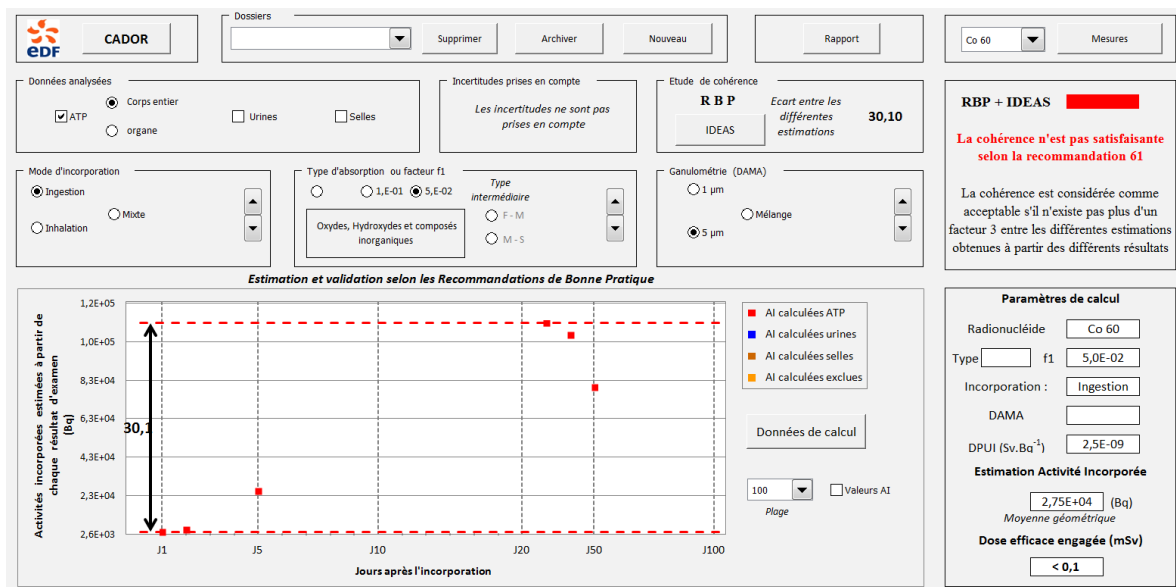


Figure 44 : Valeur et représentation graphique du test RBP pour le modèle Ingestion correspondant au cas n°4 CNPE I

## 3.2 Réalisation du test du Khi<sup>2</sup> avec l'outil CADOR

### 3.2.1.1 Le test du khi<sup>2</sup>

Le logiciel de calcul baptisé « CADOR »(33) construit à partir d'une feuille de calcul Excel® permet une analyse des mesures corps entiers réalisées dans les 1000 jours suivant la contamination interne en

fonction du radionucléide et des paramètres d'exposition (mode d'incorporation, type d'absorption, granulométrie, forme physico-chimique).

Le test du « Khi<sup>2</sup> » consiste à vérifier que les activités mesurées ne s'écartent pas trop des valeurs prévues par le modèle théorique d'incorporation testé compte tenu des incertitudes de mesures. En effet, plus les écarts entre les valeurs mesurées et les valeurs données par le modèle sont importants, moins il y a de chance que le modèle corresponde à la série de mesures.

La valeur du Khi<sup>2</sup> calculé correspond à la somme des écarts observés entre les mesures expérimentales et les valeurs théoriques prévues par le modèle d'incorporation testé. Chaque écart est divisé par l'incertitude associée à la mesure.

$$\text{Formule du Khi}^2 : \chi_o^2 = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\ln(M_i) - \ln [I \cdot m(t_i)]}{\ln(SF_i)} \right)^2$$

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

Sur la figure suivante, le Khi<sup>2</sup> calculé est représenté par les barres verticales colorées en vert.

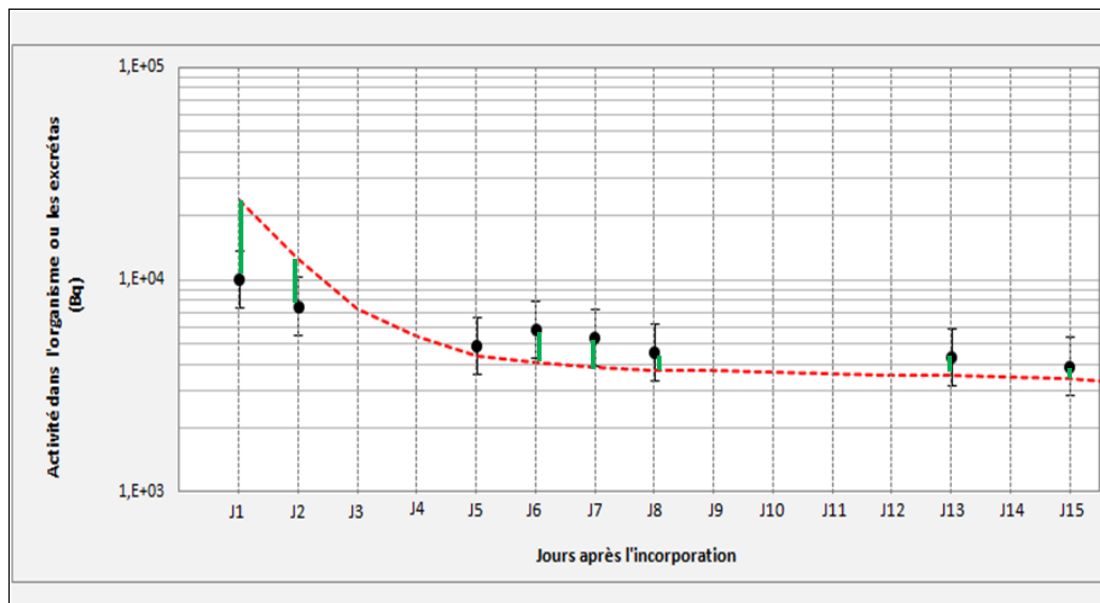


Figure 45 : Représentation du Khi<sup>2</sup> calculé (en noir : l'incertitude associée à la mesure, en vert : l'écart entre la mesure réelle et la valeur théorique prévue par le modèle testé)

Soit  $H_0$ , l'hypothèse nulle où l'on suppose que la courbe expérimentale se superpose parfaitement à la courbe théorique.

Soit  $H_1$ , l'hypothèse alternative où l'on suppose que la courbe expérimentale est différente de la courbe théorique.

D'après la loi du Khi<sup>2</sup> en choisissant un risque Alpha de 0.05, le risque de conclure que  $H_1$  est vraie alors que c'est  $H_0$  qui l'est, est de 5%.

Les tables statistiques du test du  $\chi^2$  donnent une valeur théorique représentant la valeur maximale des écarts entre les mesures et les valeurs théoriques du modèle testé. La valeur du  $\chi^2$  théorique dépend du nombre de degrés de liberté (nombre de valeurs expérimentales moins une) et du risque Alpha que l'on choisit.

Lorsque le  $\chi^2$  calculé  $>$   $\chi^2$  théorique, alors nous pouvons affirmer qu'il existe une différence entre la courbe théorique prévue par le modèle et les points expérimentaux avec un risque de 5%. (Si on choisit un risque alpha de 0,05)

Lorsque que le  $\chi^2$  calculé  $<$   $\chi^2$  théorique, alors on peut seulement dire que nous n'avons pas mis en évidence de différence significative entre le modèle expérimental et le modèle théorique. Dans ce cas, les valeurs expérimentales sont compatibles avec le modèle théorique testé.

### 3.2.1.2 Les incertitudes de mesures

La formule de calcul du  $\chi^2$  nécessite d'évaluer les incertitudes de mesure. Ces dernières tiennent compte d'une incertitude fixée par défaut appelée facteur de dispersion SF « *scattering factor* ». Le facteur de dispersion représente la dispersion habituellement observée sur les résultats de mesure. Il est supposé recouvrir l'ensemble des sources d'incertitude.

Il tient compte des variations :

- liées aux statistiques de comptage,
- liées à la position des détecteurs,
- de bruits de fond,
- de dimensions corporelles,
- de morphologie,
- de la répartition de l'activité,
- de la calibration de l'appareil et
- de l'effet opérateur pour l'évaluation du spectre.

Les recommandations du guide IDEAS(32) ont fixé le facteur de dispersion SF=1,2 pour les mesures anthropogammamétriques de radionucléides émetteurs Gamma d'énergie supérieure à 100 keV.

Le modèle biocinétique théorique testé est considéré comme cohérent avec les mesures observées lorsque le  $\chi^2$  calculé est inférieur au  $\chi^2$  théorique. Il est alors possible d'estimer l'activité initiale et la dose efficace engagée correspondante.

Dans notre exemple (Cas n°4 CNPE I), pour un modèle testé d'incorporation par inhalation de  $5\mu\text{m}$ , le  $\chi^2$  calculé est de 51.56. Il est très supérieur au  $\chi^2$  théorique (11.07). L'hypothèse  $H_0$  est fautive avec un risque alpha de 5%, les deux modèles sont significativement différents.

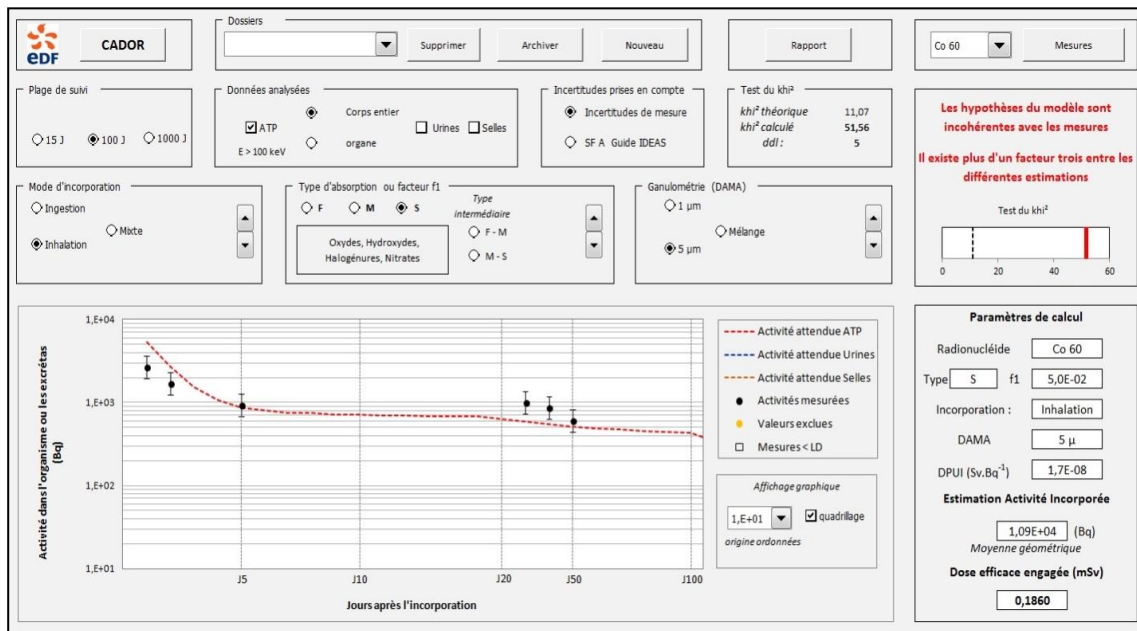


Figure 46 : Feuille de calcul CADOR présentant la cinétique de décroissance et le test du  $Khi^2$  pour un DAMA de  $5\mu m$  du cas n°4 CNPE I

Pour un modèle d'incorporation par inhalation  $1\mu m$ , le  $Khi^2$  calculé est de 4.92. Il est inférieur au  $Khi^2$  théorique (11.07). Dans ce cas, l'hypothèse  $H_0$  est retenue, nous n'avons pas mis en évidence de différence significative entre le modèle théorique et le modèle expérimental. L'utilisation du logiciel de calcul permet dans ce cas de retenir un modèle d'incorporation par inhalation avec une granulométrie d' $1\mu m$ . Dans notre exemple (Cas n°4 CNPE I), le test du  $Khi^2$  permet de confirmer les résultats obtenus grâce au test RBP.

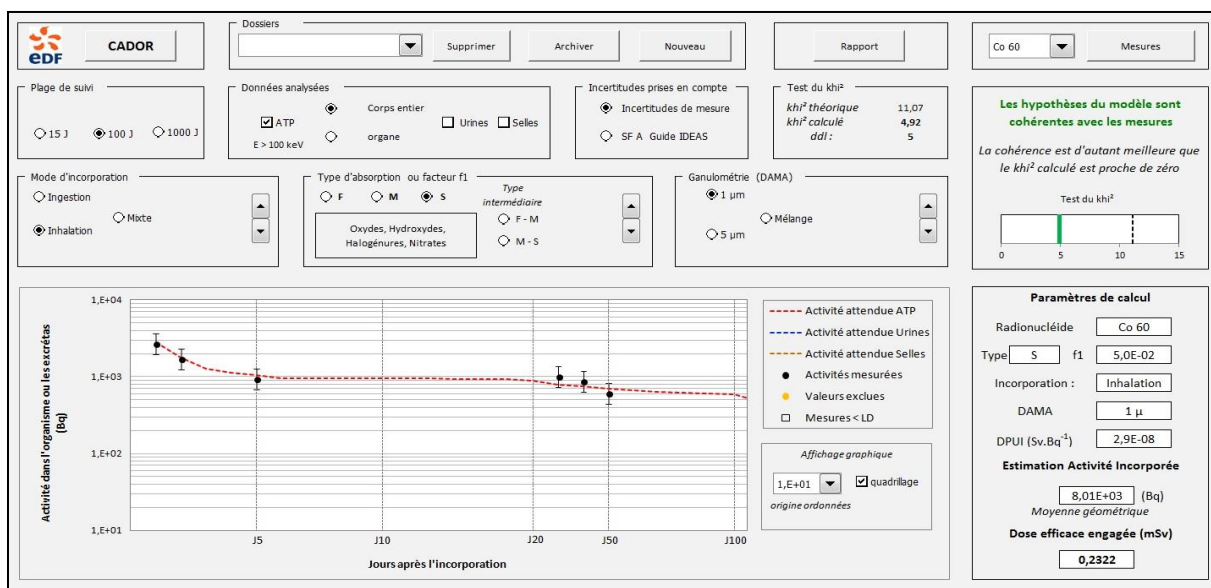


Figure 47 : Feuille de calcul CADOR présentant la cinétique de décroissance et le test du  $Khi^2$  pour un DAMA d' $1\mu m$  du cas n°4 CNPE I



### 3.3 Estimation de l'activité incorporée et calcul de la dose efficace engagée

Une fois le modèle d'incorporation retenu grâce à la mise en œuvre des deux étapes précédentes, on peut alors estimer l'activité incorporée.

Selon la recommandation n°52(34), pour un même évènement de contamination, la valeur de l'activité incorporée est égale à la moyenne géométrique des activités incorporées estimées à partir de chaque résultat d'examen.

$$\text{Moyenne géométrique} = \sqrt[n]{A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n}$$

Dans le cas n°4 CNPE I, l'activité incorporée retenue serait donc :

- selon le modèle par inhalation 1 µm : 8006 Bq ;

Le logiciel de calcul CADOR permet également de réaliser une estimation de l'activité incorporée selon la recommandation n°52 du guide de bonne pratique de la HAS.

L'Article 15 de l'arrêté du 17 juillet 2013 précise que c'est le médecin du travail qui détermine la dose efficace engagée résultant de l'exposition interne du travailleur selon les modalités précisées par l'arrêté du 01 septembre 2003.

Selon la recommandation n° 48(34) du guide de bonne pratique de la HAS, le calcul de la dose efficace engagée  $E_{interne}$  ( $E_{50}$ ) exprimée en Sievert, est donnée par la formule suivante :

$$E_{interne} = \sum_j A_{j,inh} \times h(g)_{j,inh} + \sum_j A_{j,ing} \times h(g)_{j,ing} \text{ où}$$

A = activité incorporée par inhalation ou ingestion du radionucléide exprimée en Bq et

$h(g)$  = dose efficace engagée par unité d'incorporation du radionucléide exprimée en Sv.Bq<sup>-1</sup> (dénommée DPUI - Dose par Unité d'Incorporation par la CIPR).

La détermination du modèle d'incorporation, de la granulométrie confirmés par CADOR nous permet de choisir la valeur de  $h(g)$  à appliquer. La valeur de  $h(g)$  correspondante figure au *tableau 3*.

Dans le cas n°4 CNPE I :

- le coefficient de dose  $h(g)$  à appliquer pour le Co60 pour un modèle d'incorporation par inhalation 1µm est de  $2,9^{E-8}$ .
- la DEE retenue sera donc de :

$$DEE = 8006 \times 2,9^{E-8} = 0,2 \text{ mSv}$$

## 4 Résultats

Dans cette partie, nous allons aborder l'ensemble des résultats obtenus. Ils sont présentés sous la forme d'un tableau synthétique figurant en *annexe 1*. Des exemples détaillés illustrant les différents modèles observés seront également présentés.

### 4.1 Synthèse des résultats

Nous avons analysé en double contrôle plus de 1000 spectres anthropogammamétriques (ATP) provenant de quinze sites nucléaires producteurs d'électricité.

Le tableau figurant en *annexe 1* regroupe les cas de contamination interne correspondant aux critères d'inclusions :

- au moins trois mesures ATP différentes au-delà de JO,
- activité suffisante pour déterminer un modèle d'incorporation.

Ce tableau permet d'identifier le lieu, la date, le ou les radionucléides impliqués et les cas de contamination groupés identifiés en violet (c'est à dire plusieurs salariés contaminés sur un même chantier). Les différentes hypothèses d'incorporation sont ensuite présentées : le mode d'incorporation (ingestion ou inhalation), les paramètres du modèle (forme physico chimique des radionucléides, granulométrie, coefficient d'absorption intestinal f). L'hypothèse d'incorporation retenue est identifiable par une surbrillance jaune (inhalation) ou bleu (ingestion).

Les colonnes suivantes présentent les résultats des tests RBP et  $Khi^2$ . Le test RBP est considéré comme valide lorsque l'écart entre les différentes estimations d'activité incorporée est inférieur à 3 (Recommandation 61(34)). Le test du  $Khi^2$  est valide lorsque le  $Khi^2$  calculé est inférieur au  $Khi^2$  théorique. La colonne RBP + IDEAS permet une lecture rapide des résultats des tests statistiques par un affichage couleur (rouge, orange, vert) :

- si la cohérence d'un modèle pour une contamination est jugée non satisfaisante, alors les hypothèses du modèle sélectionné ne peuvent être retenues. La case RBP + IDEAS est alors identifiée en rouge ;
- la couleur orange permet d'identifier les cas pour lesquels la cohérence est considérée comme acceptable au test RBP mais non validée au test du  $Khi^2$  ;
- enfin, si la cohérence est acceptable au test RBP et les hypothèses validées au test du  $Khi^2$ , alors les hypothèses concernant le modèle d'incorporation peuvent être retenues. Ces cas sont distingués en vert.

Les deux dernières colonnes du tableau présentent l'activité incorporée retenue selon l'hypothèse sélectionnée et la dose efficace engagée correspondante. Certains cas peuvent associer différents radionucléides, les doses efficaces calculées doivent donc être additionnées. Une police rouge est utilisée pour l'affichage des doses  $> 0.1\text{mSv}$ .

Au total, nous avons recueillis 36 cas de contaminations sur le CNPE de Paluel pour lesquels plus de 200 examens ATP ont été analysés. 113 cas de contaminations supplémentaires ont été analysés provenant de 14 sites nucléaires et pour lesquels plus de 800 examens corps entier avaient été réalisés.

Plus de 1000 spectres corps entier (ATP) ont été analysés en contrôle croisé permettant d'identifier 119 cas de contamination interne avec au moins trois mesures ATP au-delà de J0. Parmi ceux-ci, 31 cas n'ont pu être interprétés en raison d'une activité trop faible à l'anthropogammamétrie et/ou d'un nombre insuffisant de mesures. Une recontamination au cours du suivi a pu être observé pour un cas. Nous avons également distingué 21 cas de contamination interne par des particules chaudes (grattons). La cinétique d'évolution de ce type d'incorporation n'ayant pas été décrite par la CIPR, une autre méthode d'évaluation de dose devrait être appliquée (35).

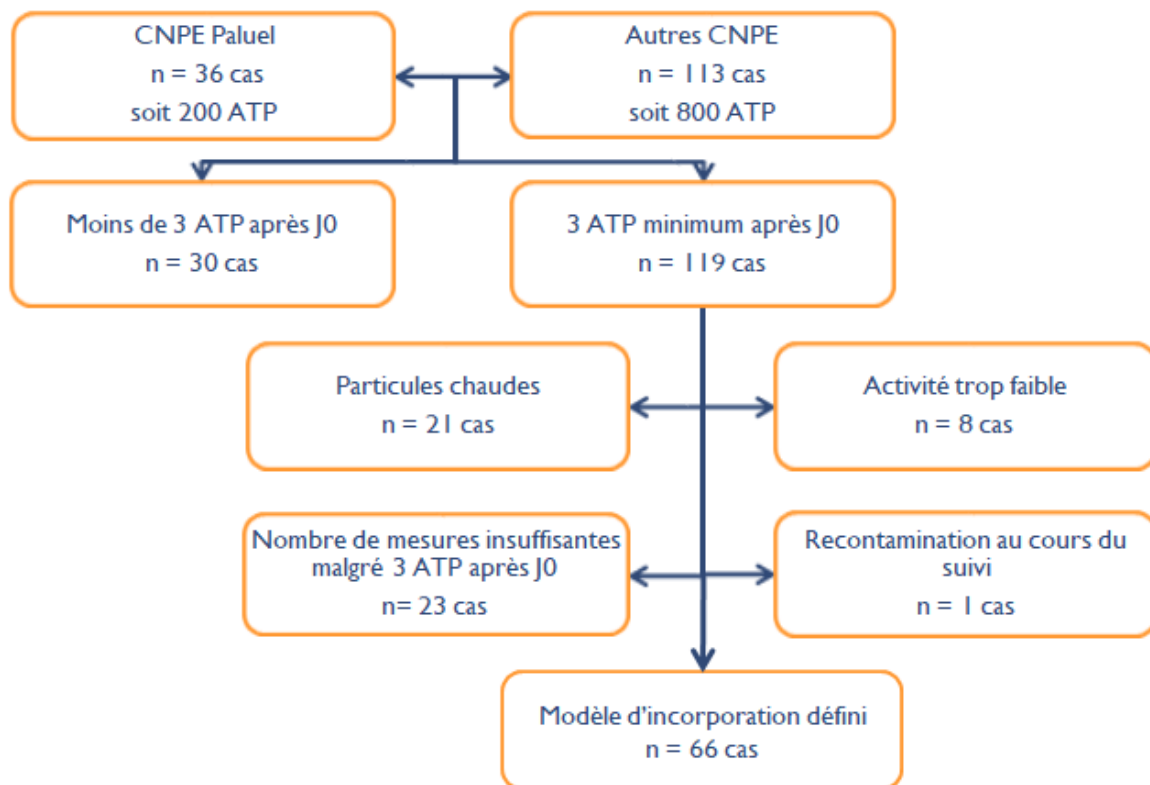


Figure 48 : Logigramme présentant les cas étudiés

Pour les 66 cas restants, un modèle d'incorporation décrit par la CIPR a pu être identifié avec l'outil CADOR. Le test RBP et le test du  $\chi^2$  étaient valides dans 79,8% des cas, seul le test RBP était valide pour les 20,2% restants. Les résultats sont détaillés dans le tableau ci-dessous.

		RBP + Khi2 valides		RBP valide			
Co58	Inhalation 5 µm	15	Inhalation 5 µm	4	55%	36/66 =	
	Inhalation 1 µm + gratton	1	Inhalation 1 µm + gratton	0			
	Inhalation 1 µm	10	Inhalation 1 µm	2			
	Ingestion f=0,05	2	Ingestion f=0,05	1			
	Ingestion f=0,1	1	Ingestion f=0,1	0			
	<b>Total</b>	<b>29</b>	<b>Total</b>	<b>7</b>			
Co60	Inhalation 5 µm	10	Inhalation 5 µm	2	48%	32/66 =	
	Inhalation 5 µm + gratton	3	Inhalation 5 µm + gratton	0			
	Inhalation 1 µm	3	Inhalation 1 µm	5			
	Inhalation 1 µm + gratton	6	Inhalation 1 µm + gratton	0			
	Ingestion f=0,05	2	Ingestion f=0,05	0			
	Ingestion f=0,1	1	Ingestion f=0,1	0			
	<b>Total</b>	<b>25</b>	<b>Total</b>	<b>7</b>			
Ag110	Inhalation 5 µm	5	Inhalation 5 µm	2	26%	17/66=	
	Inhalation 1 µm	8	Inhalation 1 µm	1			
	Ingestion f=0,05	1	Ingestion f=0,05	0			
	<b>Total</b>	<b>14</b>	<b>Total</b>	<b>3</b>			
Cs137	Inhalation 5 µm	2	Inhalation 5 µm	0	3%	2/66=	
	Inhalation 1 µm	0	Inhalation 1 µm	0			
	Ingestion f=1	0	Ingestion f=1	0			
	<b>Total</b>	<b>2</b>	<b>Total</b>	<b>0</b>			
Sb124	Inhalation 5 µm	0	Inhalation 5 µm	1	3%	2/66 =	
	Inhalation 5 µm + gratton	0	Inhalation 5 µm + gratton	0			
	<b>Total</b>	<b>0</b>	<b>Total</b>	<b>1</b>			
Zr-Nb95	Inhalation 5 µm + gratton	1	Inhalation 5 µm + gratton	0	2%	1/66 =	
	<b>Total</b>	<b>1</b>	<b>Total</b>	<b>0</b>			
<b>Total RBP + Khi2</b>		<b>71</b>	<b>Total RBP</b>		<b>18</b>		
		<b>79,78%</b>			<b>20,22%</b>		

Tableau 6 : Mode d'incorporation retenus par radionucléide et cohérence aux tests RBP et Khi<sup>2</sup>  
(\*certains cas de contamination comportent plusieurs radionucléides)

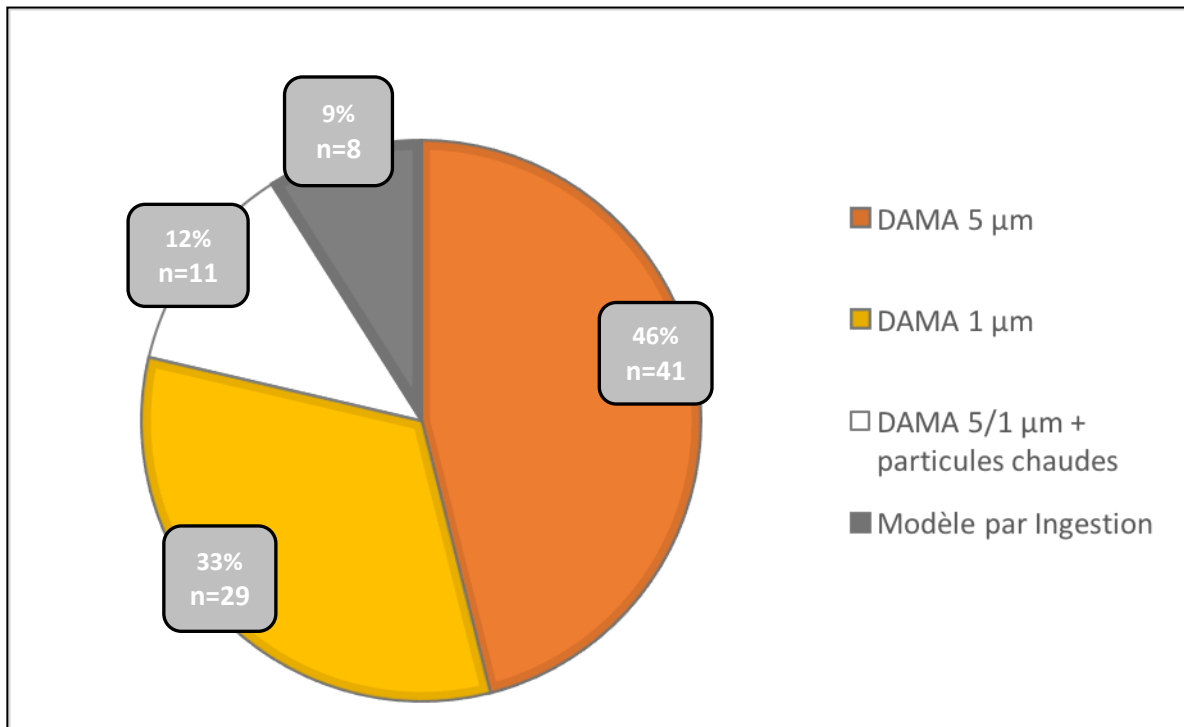


Figure 49 : Diagramme présentant les différents modes d'incorporation observés et leur fréquence d'après l'analyse des examens ATP

En résumé, nous avons observé des contaminations répondant à un modèle par inhalation dans 91% des cas. Il s'agissait pour 46% de composés Type S de DAMA 5µm et pour 33% de composés Type S de DAMA 1 µm. De plus, nous avons identifié des modèles par inhalation d'aérosols polydispersés type S de DAMA 1/5 µm associés à une ou plusieurs particules chaudes, dans 12% des cas.

Par ailleurs, nous avons également observé des contaminations correspondant à des modèles par ingestion dans 9% des cas avec  $f_1=0.05$  pour 6,7% et  $f_1=0.1$  pour 2,2%.

De manière isolée ou non, nous avons retrouvé du Cobalt 58 dans 55% des cas, du Cobalt 60 dans 48% des cas et de l'Argent 110m dans 26% des cas. De plus, nous avons également retrouvé du Césium 137, de l'Antimoine 124, du Zirconium-Niobium 95, du Chrome 51 et du Manganèse 54.

Finalement, 51% des cas auraient entraîné une dose efficace engagée supérieure à 0.1mSv mais inférieure à 0.5mSv.

La cinétique des examens corps entier *in vivo* permet donc d'identifier un modèle d'incorporation de manière précise à condition de réaliser plusieurs mesures ATP successives après l'évènement contaminant et donc d'estimer une dose efficace engagée.

## 4.2 Illustration des différents modèles d'incorporations identifiés par l'étude

### 4.2.1 Contamination par inhalation

L'analyse des examens ATP sur la majorité des centres nucléaires français étudiés montrent que la voie d'incorporation par inhalation est la plus fréquemment observée, elle représente 91% des cas de contamination étudiés. Ceci est en accord avec les données de la CIPR(21) et le référentiel AIEA(36) qui précise que le mode d'incorporation par inhalation est la principale voie d'exposition professionnelle.

Dans 46% des cas, il s'agissait d'une incorporation de composés de 5  $\mu\text{m}$ . Cependant, nous avons également observé une incorporation de composés de 1  $\mu\text{m}$  dans 33% des cas.

De plus, nous avons pu mettre en évidence des incorporations de composés dit « polydispersés » correspondant à l'incorporation d'un aérosol radioactif constitué de particules chaudes et de particules plus fines de 1/5  $\mu\text{m}$ . Ce modèle d'incorporation correspond à 12% des cas de contamination observés.

Pour illustrer ceci, nous allons développer des exemples de cas de contaminations correspondants aux différents modèles d'incorporations observés.

#### 4.2.1.1 Exemples de modèle Inhalation granulométrie 5 $\mu\text{m}$

Le modèle d'incorporation par inhalation de composés de granulométrie de 5 $\mu\text{m}$  a été identifié dans 46% des cas de contamination.

#### Contamination mixte au Cobalt 60 et Cobalt 58 (types S)

Nous avons observé des cas de contamination suivant une décroissance compatible avec un modèle d'incorporation par inhalation 5  $\mu\text{m}$  au Cobalt 60 et Cobalt 58 sur différents CNPE français.

Exemple : Cas n°7 CNPE F

Le tableau suivant illustre une contamination interne comprenant deux radionucléides, le Cobalt 58 et le Cobalt 60. Dans cet exemple, l'activité initiale incorporée estimée à partir de l'ensemble des mesures est de 5230 Bq de Co-60 et de 8210 Bq de Co-58. Seul un modèle d'incorporation par inhalation associé à une granulométrie de 5  $\mu\text{m}$  permet d'obtenir un  $\text{Khi}^2$  calculé <  $\text{Khi}^2$  théorique.

La dose efficace engagée retenue dans ce cas serait de 0.1 mSv (0.088 mSv (Co-60) + 0.014 mSv (Co-58)). Dans cet exemple, les deux radionucléides suivent des modes d'incorporation identiques avec une même granulométrie.

Date	Jour	Heure	Radionucléide	Activité (Bq)
21/04/2015	J0	06h21	Co-58	7390
			Co-60	4550
21/04/2015	J0	15h35	Co-58	7280
			Co-60	4040
22/04/2015	J1	08h43	Co-58	5550
			Co-60	2540
23/04/2015	J2	08h58	Co-58	2150
			Co-60	1660
24/04/2015	J3	08h25	Co-58	880
			Co-60	700
27/04/2015	J6	08h22	Co-58	596
			Co-60	450
28/04/2015	J7	15h20	Co-58	470
			Co-60	300
29/04/2015	J8	11h44	Co-58	494
			Co-60	300

Tableau 7 : Suivi anthropogammamétrique du cas n°7 CNPE F, contamination interne au Co-58/Co-60

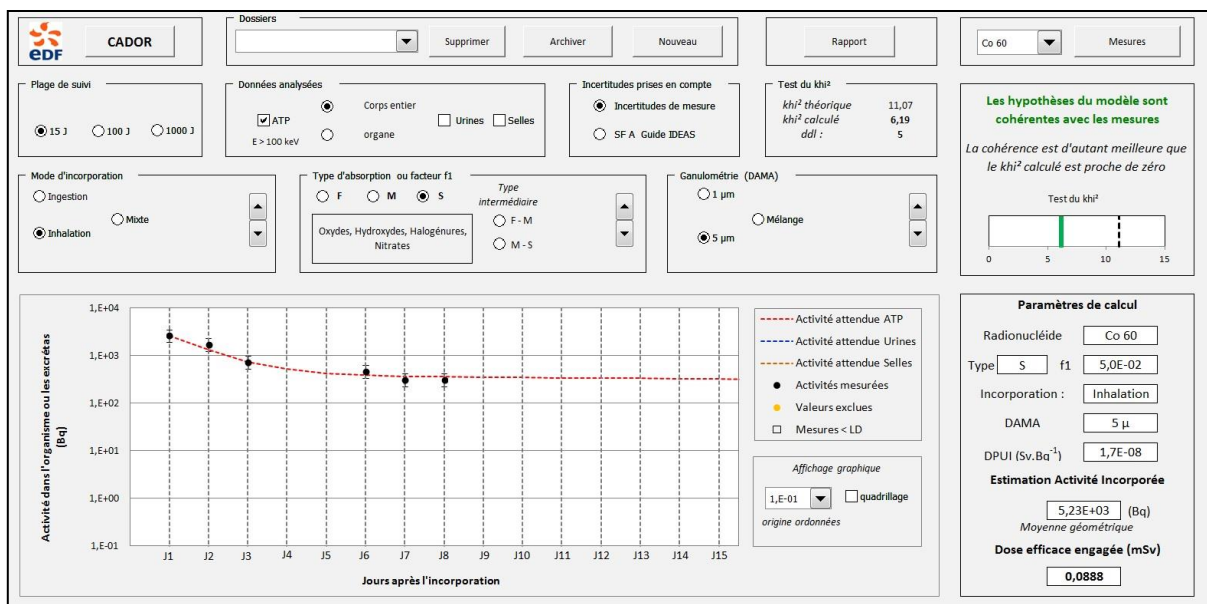


Figure 50 : Feuille de calcul CADOR présentant la cinétique de décroissance du Co-60 et le test Khi² du cas n°7 CNPE F

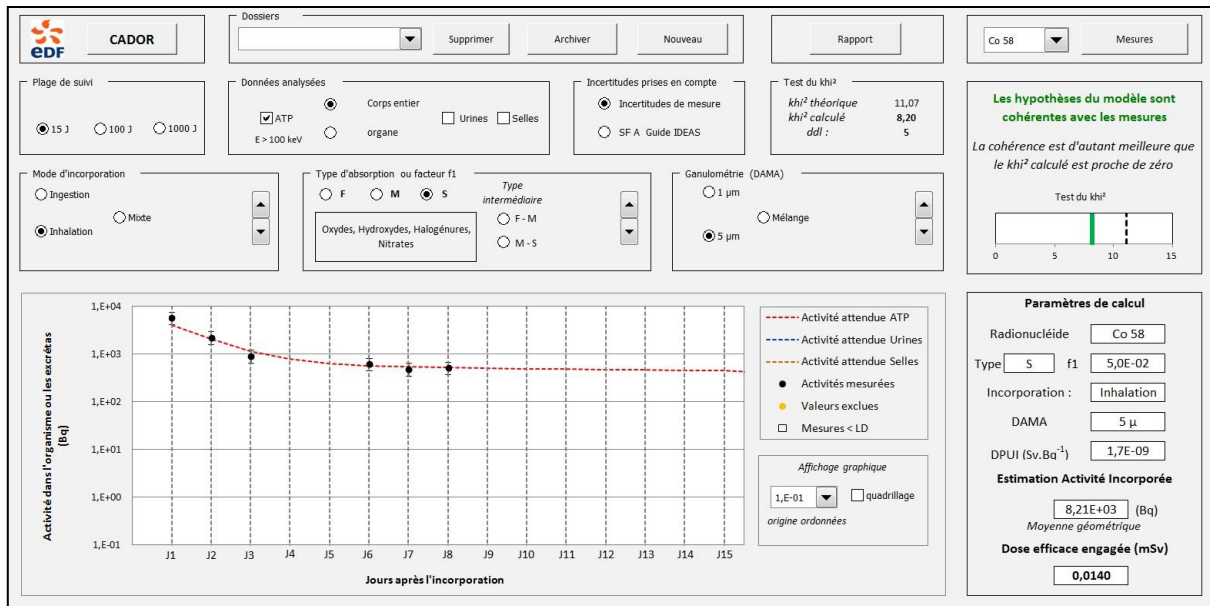


Figure 51 : Feuille de calcul CADOR présentant la cinétique de décroissance du Co-58 et le test  $\chi^2$  du cas n°7 CNPE F

### Contamination mixte Argent 110m et Cobalt 60 (type S)

L'Argent a été retrouvé de façon isolée ou non dans 26% des cas de contamination (17/66).

Le modèle inhalation de DAMA 5µm a été retenu pour des contaminations à l'Argent 110m et au Cobalt 60.

Exemple : cas n° 21 CNPE K

Dans cet exemple, les deux radionucléides suivent le même modèle d'incorporation (inhalation) et la même granulométrie (5µm). La dose efficace engagée liée à cette contamination serait de 0.1mSv [0.06mSv (Co<sup>60</sup>) et 0.04 (Ag<sup>110m</sup>)].

Date ATP	Jour	Heure	Radionucléides	Activité (Bq)
07/10/2016	J0	13h24	Co60	12050
			Ag110m	6575
08/10/2016	J1	13h01	Co60	1880
			Ag110m	2620
10/10/2016	J3	09h03	Co60	330
			Ag110m	756
11/10/2016	J4	09h06	Co60	350
			Ag110m	690
13/10/2016	J6	09h13	Co60	230
			Ag110m	566
14/10/2016	J7	09h17	Co60	200
			Ag110m	440



17/10/2016	J10	09h19	Co60	240
			Ag110m	360
18/10/2016	J11	09h33	Co60	220
			Ag110m	300

Tableau 8 : Suivi anthropogammamétrique du cas n°21 CNPE K, contamination interne au Co-60 et à l'Ag-110m

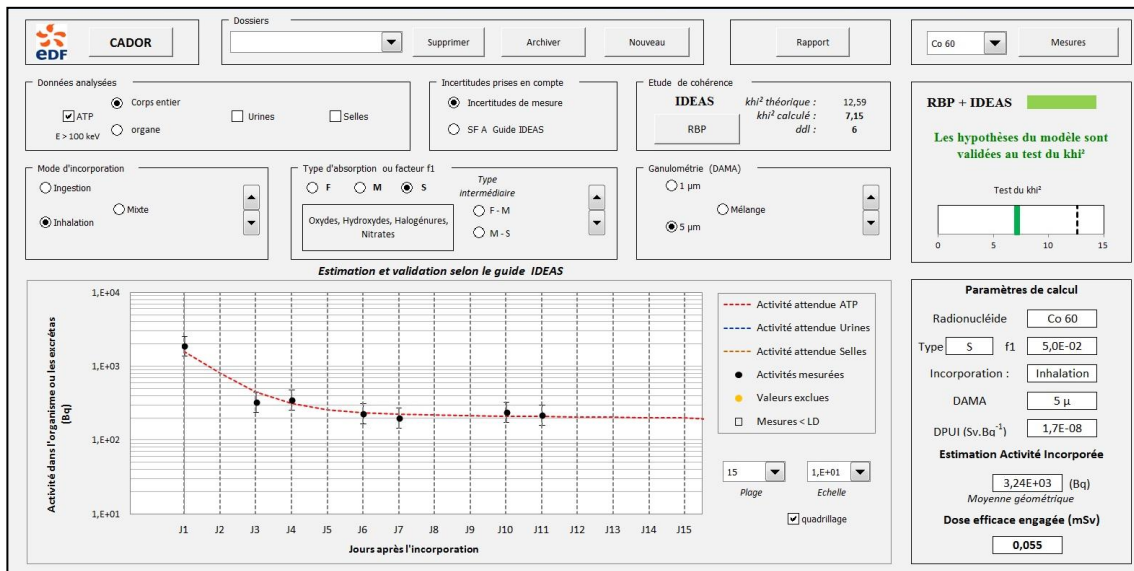


Figure 52 : Feuille de calcul CADOR présentant la cinétique de décroissance du Co-60 et le test  $Khi^2$  du cas n°21 CNPE K

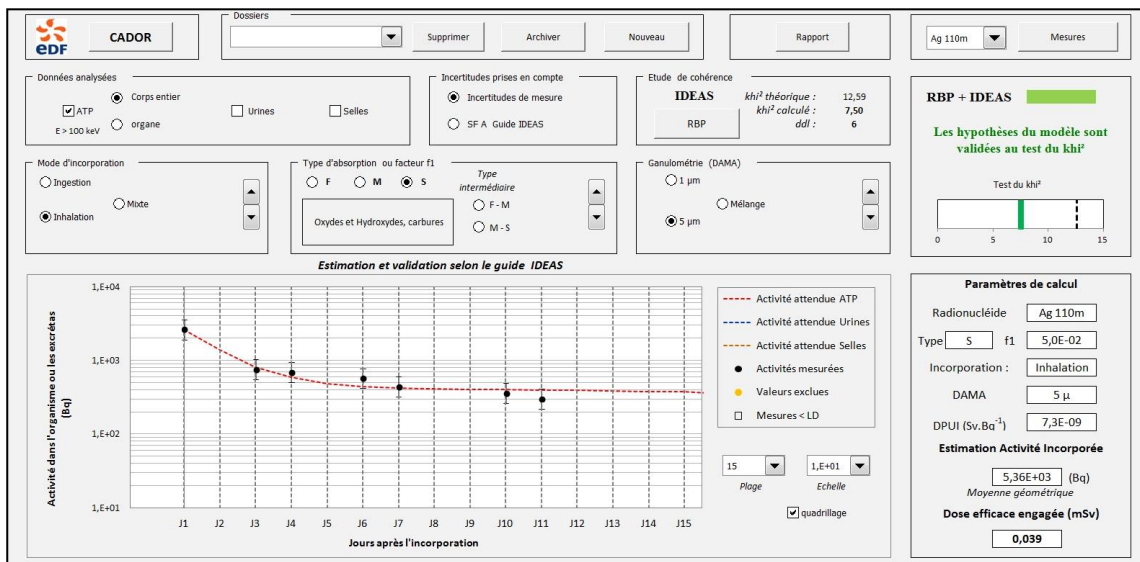


Figure 53 : Feuille de calcul CADOR présentant la cinétique de décroissance de l'Ag-110m et le test  $Khi^2$  du cas n°21 CNPE K

#### 4.2.1.2 Exemples de modèle Inhalation granulométrie 1 µm

Le modèle d'incorporation par inhalation de composés de DAMA 1 µm a été observé dans 33% des cas de contamination.

#### Cobalt 60

Nous avons observé des cas de contamination au Cobalt 60 suivant une décroissance compatible avec un modèle d'incorporation par inhalation 1 µm. Le Cobalt 60 a été retrouvé dans 48% des cas (32/66 cas) de manière isolée ou non.

#### Exemple : Cas n°5 CNPE G

Le tableau suivant illustre une contamination interne au Cobalt 60. L'activité initiale incorporée estimée à partir de l'ensemble des mesures est de 4360 Bq. Seul un modèle d'incorporation par inhalation de composé de type S associé à une granulométrie de 1 µm permet de valider le test RBP et d'obtenir un  $K_{hi}^2$  calculé <  $K_{hi}^2$  Théorique.

Date	Jour	Heure	Radionucléides	Activité (Bq)
02/11/2016	J0	17h32	Co-60	1746
04/11/2016	J2	15h18	Co-60	956
04/11/2016	J2	15h27	Co-60	530
05/11/2016	J3	11h08	Co-60	630
06/11/2016	J4	10h57	Co-60	560
07/11/2016	J5	10h16	Co-60	510
08/11/2016	J6	09h03	Co-60	640
09/11/2016	J7	08h42	Co-60	560
16/11/2016	J14	13h57	Co-60	540
23/11/2016	J21	14h28	Co-60	460
23/11/2016	J21	15h01	Co-60	390

Tableau 9 : Suivi anthropogammamétrique du cas n°5 CNPE G, contamination interne au Co-60

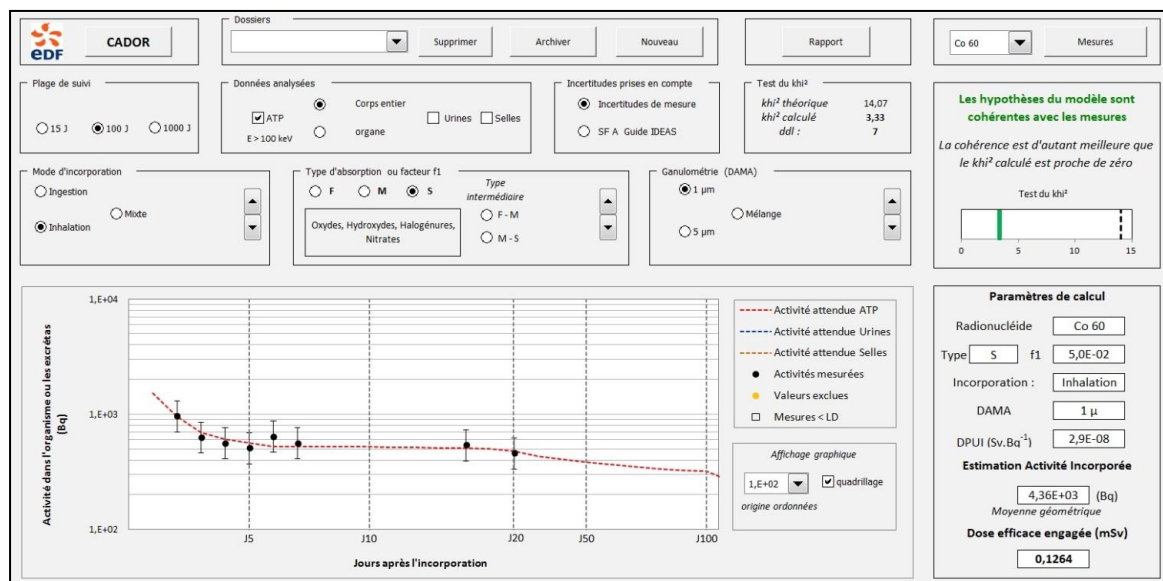


Figure 54 : Feuille de calcul CADOR présentant la cinétique de décroissance du Co-60 et le test  $K_{hi}^2$  du cas n°5 CNPE G

## Cobalt 58

Le Cobalt 58 a été retrouvé dans 55% des cas (36/66 cas) de façon isolée ou non.

Nous avons également observé des cas de contamination au Cobalt 58 suivant une décroissance compatible avec un modèle d'incorporation par inhalation 1  $\mu\text{m}$ .

Exemple : Cas n°7 CNPE B.

Le tableau suivant illustre le suivi ATP du cas de contamination n°7 survenue sur le CNPE B. L'activité initiale incorporée estimée à partir de l'ensemble des mesures est d'environ 10000Bq. Seul un modèle d'incorporation par inhalation de composé de type S associé à une granulométrie de 1  $\mu\text{m}$  permet de valider le test RBP et d'obtenir un  $\text{Khi}^2$  calculé <  $\text{Khi}^2$  Théorique.

La dose efficace engagée retenue dans ce cas serait très inférieure à 0.1 mSv.

Date ATP	Jour	Heure	Radionucléide	Activité (Bq)
07/05/2014	J0	21h30	Co-58	6900
09/05/2014	J2	09h22	Co-58	2235
12/05/2014	J5	08h59	Co-58	1440
13/05/2014	J6	08h51	Co-58	1000
16/05/2014	J9	08h33	Co-58	1100
22/05/2014	J15	15h39	Co-58	750
02/06/2014	J26	10h01	Co-58	880
11/07/2014	J65	09h42	Co-58	460
02/09/2014	J118	08h44	Co-58	350

Tableau 10 : Suivi anthropammétrique du cas N°7 CNPE B, contamination interne au Co-58

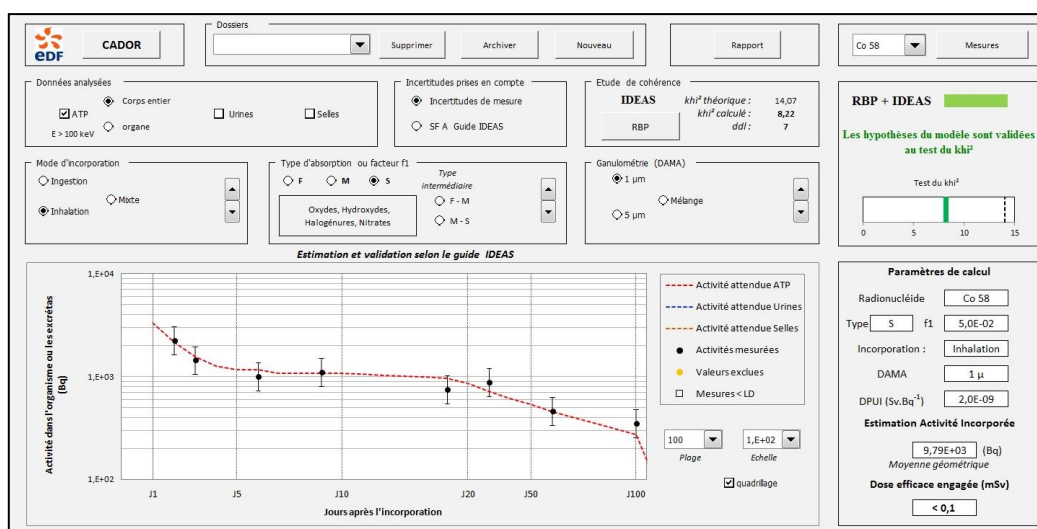


Figure 55 : Feuille de calcul CADOR présentant la cinétique de décroissance du Co-58 et le test  $\text{Khi}^2$  du Cas n°7 CNPE B

## Argent 110m

Nous avons également observé des cas de contamination suivant une décroissance compatible avec un modèle d'incorporation par inhalation d'Ag110m de DAMA 1µm sur différents CNPE français.

La forme physico-chimique de l'Argent 110m n'est pas clairement définie (*cf. partie 2 chapitre 5.4*), les trois formes physico-chimiques (types S, M et F) ont donc été analysés dans ce travail.

### Exemple : Cas n°4 CNPE D

Le tableau suivant illustre une contamination interne à l'Argent 110m survenue sur le CNPE D. L'activité initiale incorporée estimée à partir de l'ensemble des mesures est de 35700 Bq. Un modèle d'incorporation par inhalation associé à une granulométrie de 1 µm permet de valider le test RBP et d'obtenir un  $K_{hi}^2$  calculé <  $K_{hi}^2$  Théorique.

Par ailleurs, la forme physico-chimique (type S) a été validée, elle est plus pénalisante en terme de dosimétrie. La dose interne résultant de cette contamination est de 0.4 mSv.

Date ATP	Jour	Heure	Radionucléide	Activité (Bq)
04/09/2013	J0	19h10	Ag110m	26910
05/09/2013	J1	13h27	Ag110m	10150
06/09/2013	J2	09h12	Ag110m	7565
09/09/2013	J5	13h45	Ag110m	4916
10/09/2013	J6	09h56	Ag110m	5861
11/09/2013	J7	09h30	Ag110m	5374
12/09/2013	J8	14h27	Ag110m	4577
17/09/2013	J13	13h17	Ag110m	4363
19/09/2013	J15	08h51	Ag110m	3930
23/09/2013	J19	11h40	Ag-110m	3000
26/09/2013	J22	09h13	Ag-110m	3300
01/10/2013	J27	13h51	Ag-110m	3000
03/10/2013	J29	15h00	Ag-110m	2500

Tableau 11 : Suivi anthropométrique du cas n°4 CNPE D, contamination interne à l'Ag-110m

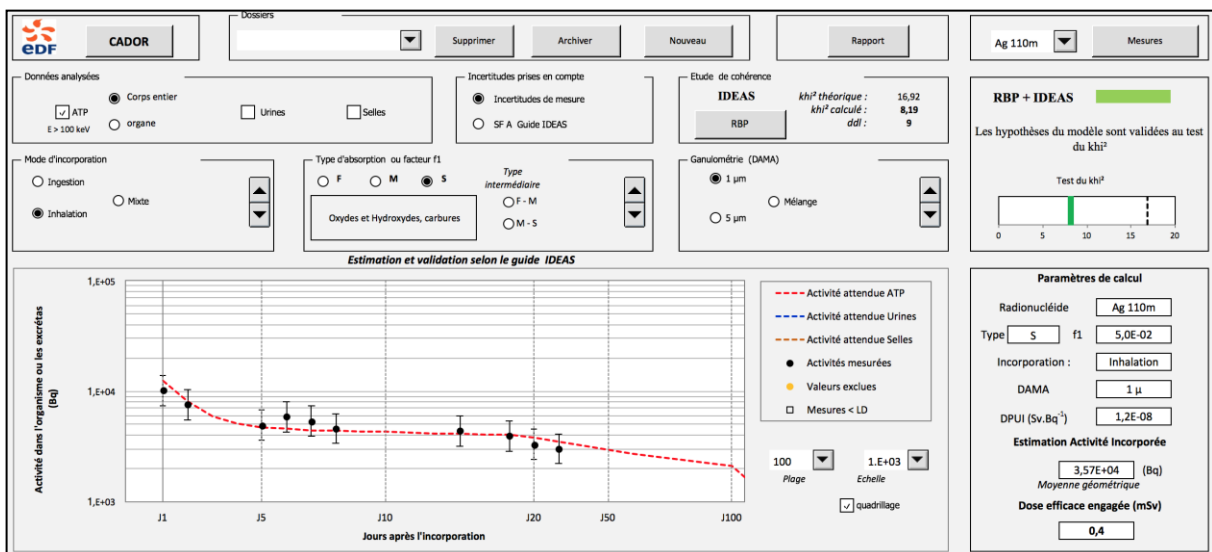


Figure 56 : Feuille de calcul CADOR présentant la cinétique de décroissance de l'Ag-110m et le test  $K_{hi}^2$  du Cas n°4 CNPE D

#### 4.2.1.3 Exemple de modèle mixte Inhalation 1/5 µm + particules chaudes

Le modèle d'incorporation par inhalation de composés polydispersés (DAMA 1/5µm + particules chaudes) a été observé dans 12% des cas de contamination.

Nous avons identifié quelques cas de contamination interne au Cobalt 60 ne répondant pas totalement à un modèle de décroissance décrit par la CIPR. En effet, nous avons observé une décroissance d'activité très importante au cours des trois premiers jours du suivi compatible avec la décroissance observée lors d'une contamination par une particule chaude. Au-delà du 4<sup>ème</sup> jour, la décroissance suivait un modèle d'incorporation par inhalation (*cf. figure 57*). Pour rappel, les particules chaudes sont des particules radioactives insolubles d'un diamètre variant de quelques dizaines de microns à 1 millimètre(6). Elles sont inhalées et après impact inertiel dès les voies aériennes supérieures, rapidement dégluties. Elles sont ensuite rapidement éliminées dans les selles suivant le temps de transit digestif.

Dans cet exemple, il s'agit donc d'un évènement lié à une inhalation d'un mélange de particules de tailles variables allant de 1µm à 1mm. L'analyse de la cinétique de décroissance a été réalisée sur les mesures d'activités réalisées au-delà du 3ème jour. L'activité initiale estimée à partir de ces valeurs est de 13100 Bq de Cobalt 60. Dans ce cas, l'activité incorporée retenue ne tient compte que du modèle inhalation.

La dose efficace engagée correspondante est de 0.38 mSv (hors particules chaudes).

Les données actuelles fournies par la CIPR concernant l'incorporation de particules chaudes ne permettent pas d'estimer la dose efficace engagée liée à cette particule chaude. Cette question a d'ailleurs fait l'objet d'un travail de thèse(37).

Exemple : Cas n°1 CNPE M.

Date	Jour	Heure	Radionucléides	Activité (Bq)	Incertitude
20/05/2008	J0	14h19	Co-60	98400	8,56
21/05/2008	J1	13h57	Co-60	57800	8,61
22/05/2008	J2	13h42	Co-60	30260	8,715
23/05/2008	J3	14h01	Co-60	1700	11,218
26/05/2008	J6	08h47	Co-60	1750	13,206
26/05/2008	J6	08h49	Co-60	1715	12,9606
27/05/2008	J7	13h36	Co-60	1670	13,233
29/05/2008	J9	15h27	Co-60	1585	13,775
09/06/2008	J20	14h13	Co-60	1326	14,866
16/06/2008	J27	10h31	Co-60	1600	13,973
19/06/2008	J30	13h47	Co-60	1376	14,942
18/08/2008	J90	09h37	Co-60	685	27,3532
02/10/2008	J135	14h17	Co-60	950	13,5259
05/11/2008	J168	08h53	Co-60	810	25,186
14/05/2009	J358	14h37	Co-60	712	23,326

Tableau 12 : Suivi anthropogammamétrique du cas n°1 CNPE M, contamination interne au Co-60

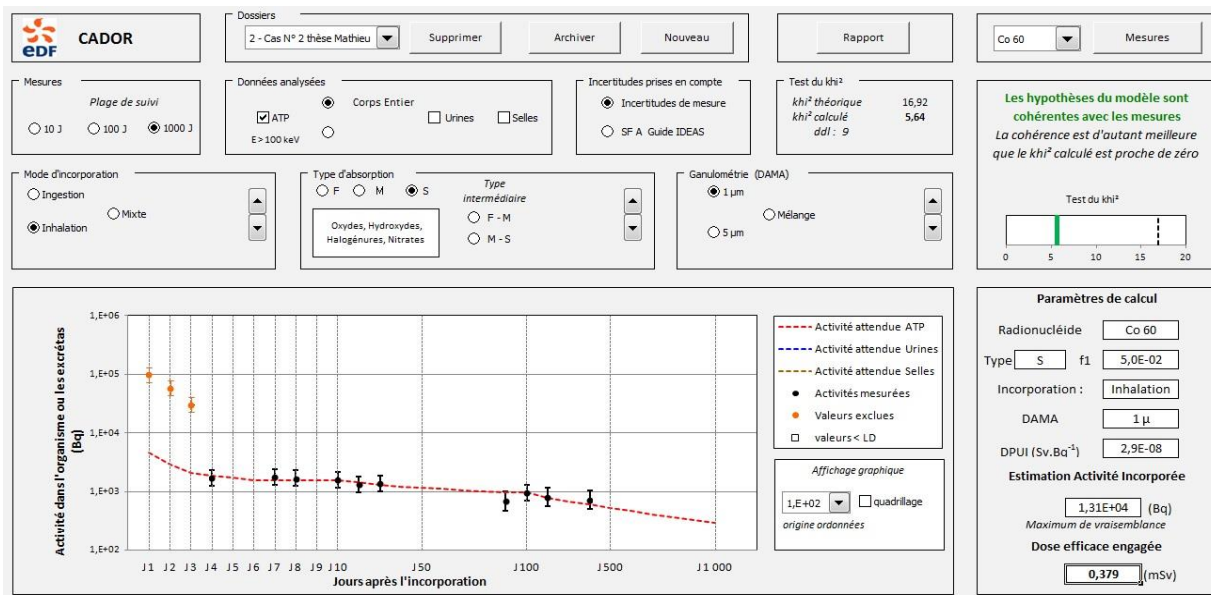


Figure 57 : Feuille de calcul CADOR présentant la cinétique de décroissance du Co-60 et le test  $\chi^2$  du cas n°1 CNPE M

Ce type d'incorporation de composés « polydispersés » a également été observé pour le cas n°10 du CNPE B, la série de cas n°3, 4, 5, 6 du CNPE I, la série de cas n°1 et 2 et le cas isolé n°4 du CNPE M et le cas n°1 du CNPE N (cf. Annexe 1).

Dans chacun de ces cas, le radionucléide impliqué est le Cobalt 60. Ces observations sont en accord avec l'origine des particules chaudes décrite comme provenant des stellites (Cf. Partie 1 chapitre 2).

#### 4.2.1.4 Série de contaminations

Sur différents sites nucléaires ont pu être observées des « séries » de contaminations internes, c'est-à-dire des cas groupés de travailleurs contaminés. Ils sont identifiés dans l'annexe 1 par une surbrillance des dates en violet.

Pour chacune de ces séries, les radionucléides impliqués, le modèle d'incorporation et la forme physico chimique restent identiques. Seule la granulométrie retenue par les tests RBP et  $\chi^2$  peut être variable selon les cas.

#### 4.2.2 Contamination par ingestion

Bien que le mode d'incorporation par inhalation soit le plus fréquent, les intervenants peuvent également se contaminer en portant leurs mains contaminées sur le visage (36). Le modèle d'incorporation par ingestion a été observé dans 9% des cas de contamination.

#### 4.2.2.1 Exemple de modèle ingestion Co58 et Co60

En effet, nous avons constaté des cas de contamination interne au Cobalt 58 et 60 suivant une décroissance compatible avec un modèle d'incorporation par ingestion.

Dans cet exemple (cas de contamination n°6 CNPE H), l'estimation de l'activité incorporée initialement est de 16900Bq de Co<sup>58</sup> et 7780 Bq de Co<sup>60</sup>. Seul un mode d'incorporation par ingestion permet de valider le test RBP et d'obtenir un  $K_{hi}^2$  calculé <  $K_{hi}^2$  théorique.

La dose efficace engagée qui résulterait de cet évènement est très inférieure à 0.1mSv.

Date	Jour	Heure	Radionucléides	Activité (Bq)
24/09/2014	J0	17h26	Co-58	9830
			Co-60	3820
25/09/2014	J1	09h42	Co-58	12200
			Co-60	4845
26/09/2014	J2	08h16	Co-58	6260
			Co-60	2890
26/09/2014	J2	16h28	Co-58	4660
			Co-60	2052
29/09/2014	J5	10h19	Co-58	595
			Co-60	300
06/10/2014	J12	08h41	Co-58	520
			Co-60	<LD
16/10/2014	J22	09h28	Co-58	320
			Co-60	<LD

Tableau 13 : Suivi anthropogammamétrique du cas n°6 CNPE H, contamination interne au Co-60/Co-58

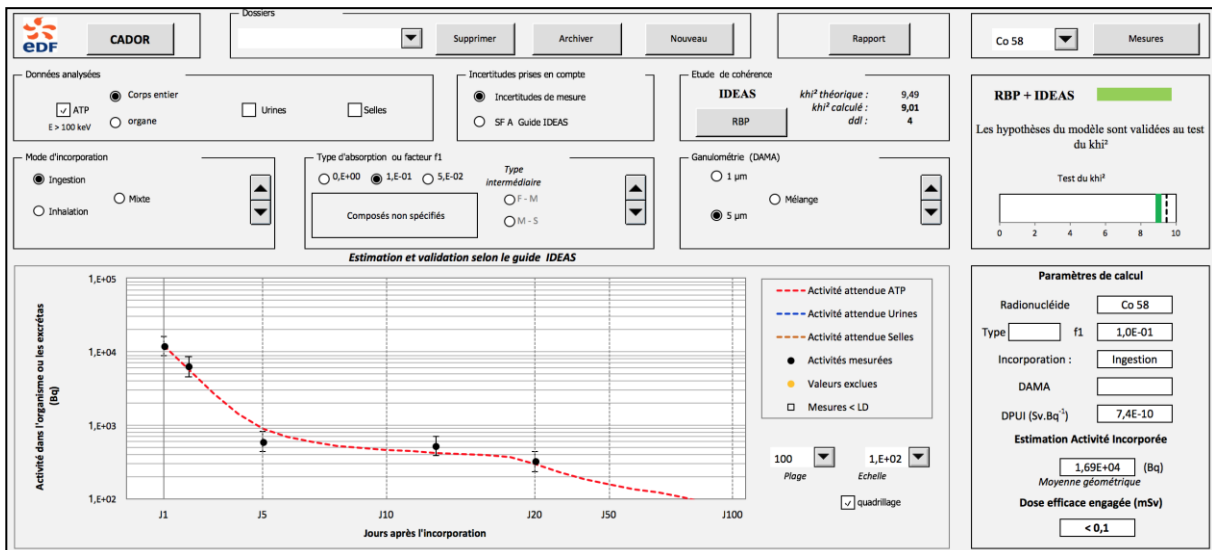


Figure 58 : Feuille de calcul CADOR présentant la cinétique de décroissance du Co-58 et le test  $K_{hi}^2$  du cas n°6 CNPE H

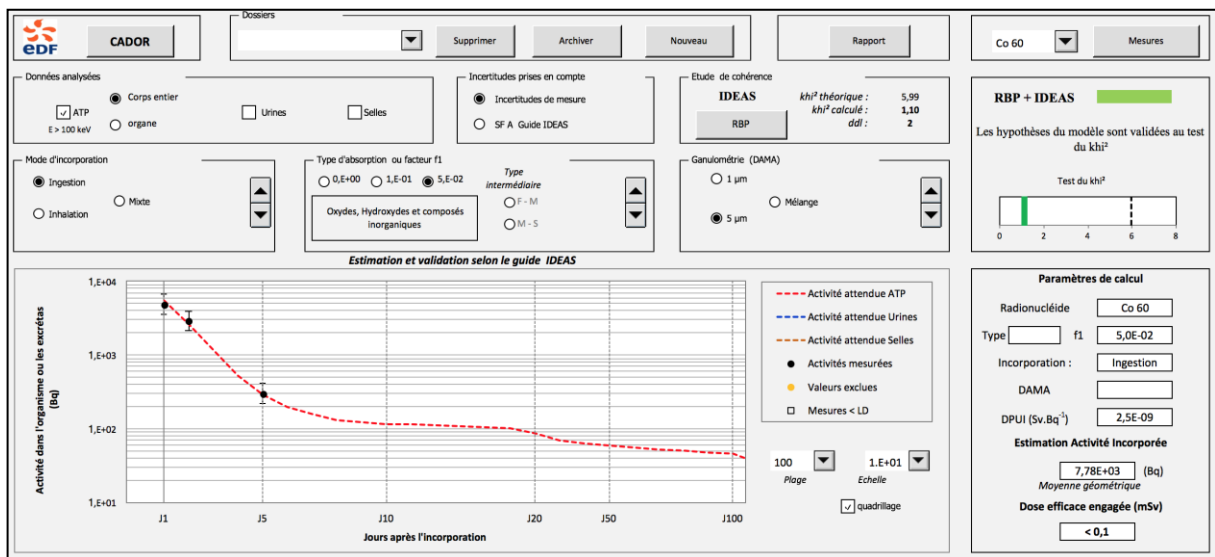


Figure 59 : Feuille de calcul CADOR présentant la cinétique de décroissance du Co-60 et le test  $\text{K}_{\text{fi}}^2$  du cas n°6 CNPE H

Les mêmes hypothèses d'incorporation ont été retenues pour le cas de contamination n°9 survenue sur le CNPE B.

#### 4.2.2.2 Exemple de modèle ingestion Ag110m

Un seul cas de contamination interne à l'Argent 110m suivait un modèle par ingestion. Il s'agit du cas n°1 CNPE D. Le test RBP et le test du  $\text{K}_{\text{fi}}^2$  sont validés en sélectionnant ce mode d'incorporation.

Cela correspond à une activité incorporée d'environ 2400Bq et une dose équivalente très inférieure à 0.1 mSv.

#### 4.2.2.3 Série de contaminations

Aucune série de contaminations suivant un modèle d'incorporation par ingestion n'a été observé.

## 5 Discussion

Nous avons voulu établir une méthode permettant d'estimer la dose efficace engagée (DEE) à partir des examens anthropogammamétriques (ATP) successifs sans avoir recours aux examens radiotoxicologiques des urines et des selles.

Celle-ci se base sur la réalisation de plusieurs examens ATP à des jours différents suivant la contamination, permettant d'établir une cinétique de décroissance et définissant ainsi un modèle d'incorporation.

Ce chapitre est consacré à la discussion des résultats obtenus par l'étude de la cinétique ATP et de leur comparaison aux résultats des examens radiotoxicologiques des urines et des selles.



## 5.1 Le cas des particules chaudes

Tous les cas de contamination interne observés ne correspondent pas au modèle d'incorporation d'aérosol. En effet, les travailleurs du nucléaire peuvent être exposés au risque de contamination interne par des particules chaudes : particules radioactives insolubles (le plus souvent constituées de Cobalt 60), d'un diamètre variant de quelques dizaines de microns à 1 millimètre. Elles sont inhalées et après impact inertiel dès les voies aériennes supérieures, rapidement dégluties.

Si la procédure permettant d'évaluer l'activité en cas d'incorporation d'aérosol de substances radioactives est bien définie, il n'en est pas de même pour les particules chaudes. L'activité d'un aérosol incorporé est évaluée grâce aux modèles biocinétiques décrits par la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) en utilisant les résultats des mesures anthropogammamétriques voire les résultats des analyses radiotoxicologiques urines et selles. Cette procédure ne peut être appliquée à l'identique pour l'évaluation de l'activité d'une particule chaude puisqu'aucun modèle biocinétique théorique précis décrivant sa cinétique d'évolution n'a été publié par la CIPR.

En effet, la particule chaude ne diffuse pas dans l'organisme contrairement à l'aérosol mais reste sous forme ponctuelle tout au long de son parcours digestif. Le résultat de la mesure de l'activité de la particule par l'anthropogammamétrie est très variable selon sa position dans l'abdomen ; cette variabilité s'expliquant par une fluctuation de la distance aux détecteurs de l'appareil de mesure.

On les retrouve, dans cette étude, dans 18% des cas de contamination interne de manière isolée (21 /119 cas) et dans 7% des cas de contamination associée à l'inhalation d'aérosol de DAMA 1/5 $\mu$ m (9 /119 cas). A noter que ce taux de 18% est sous-estimé de par la méthodologie délibérément choisie pour cette étude puisque seuls les cas de contamination perdurant au-delà de quatre jours ont été étudiés.

On suspecte la présence d'une particule chaude à l'aide de l'ATP lorsque :

- l'on retrouve une nette différence d'activité enregistrée entre les détecteurs haut et bas. (Le gradient d'activité entre les détecteurs haut et bas de l'appareil ATP est égal à quatre voire cinq).
- l'activité ne suit pas une décroissance habituelle et la cinétique de décroissance ne correspond alors pas aux modèles inhalation et ingestion décrits par la CIPR. En effet, la valeur enregistrée par l'ATP est dépendante de la position de la particule dans l'abdomen (35).

On est certain de la présence d'une particule chaude lorsqu'en plus des critères ci-dessus :

- l'activité mesurée à l'ATP est rapidement inférieure aux limites de détection, avec une élimination de la particule entre J2 et J7 au maximum.

Pour illustrer ces propos, nous avons décrit ci-dessous quelques cas de contamination interne par une particule chaude :

Cas n°7 du CNPE H :

Dans ce cas de contamination, il s'agit d'une élimination tardive de la particule chaude, survenue entre le 6<sup>ème</sup> et le 7<sup>ème</sup> jour après l'incorporation. Le plus souvent, l'élimination se fait entre le 2<sup>ème</sup> et le 4<sup>ème</sup> jour.

Date	Jour	Heure	Radionucléide	Activité (Bq)
10/06/2011	J0		Co-60	27420
14/06/2011	J4	13h53	Co-60	33000
15/06/2011	J5	09h13	Co-60	29310
16/06/2011	J6	10h03	Co-60	29730
17/06/2011	J7	09h45	Co-60	<LD

Tableau 14 : Suivi anthropogammamétrique du cas n°7 CNPE H, contamination interne au Co-60

Cas n°1 du CNPE N :

Dans ce cas de contamination (Cas n°1 CNPE N), on peut remarquer une variation de l'activité entre les différents jours de mesures correspondant aux variations de position de la particule dans l'abdomen. En effet, nous avons pu montrer par un travail complémentaire à cette thèse que l'épaisseur des tissus humains interposés entre la particule et le détecteur était responsable d'une atténuation des rayonnements Gamma reçus par les détecteurs (35). L'élimination de la particule chaude se fait entre J4 et J5.

Date	Jour	Heure	Radionucléides	Activité (Bq)
20/05/2016	J0	15h32	Co-58	950
			Co-60	2000
23/05/2016	J3	08h12	Co-58	570
			Co-60	970
23/05/2016	J3	16h00	Co-58	1138
			Co-60	1870
24/05/2016	J4	07h55	Co-58	346
			Co-60	900
25/05/2016	J5	07h50	Co-58	<LD
			Co-60	<LD

Tableau 15 : Suivi anthropogammamétrique du cas n°1 CNPE N, contamination interne au Co-58/Co-60

Cas n°2 du CNPE D :

Dans l'exemple suivant (Cas n°2 CNPE D), c'est l'étude de la cinétique de décroissance qui permet d'identifier la contamination par une particule chaude.

En effet, celle-ci n'est pas du tout en faveur d'un modèle par ingestion. (RBP = 4.24, Khi<sup>2</sup> 48.9/7.81)

La validation d'un modèle par inhalation nécessiterait que l'activité mesurée à J7 soit de plus de 300 Bq.

Il s'agit alors d'une particule chaude d'Ag<sup>110m</sup> éliminée après J4.

Date	Jour	Heure	Radionucléide	Activité (Bq)
25/11/2013	J0	15h07	Ag110m	2015
26/11/2013	J1	08h30	Ag110m	825
26/11/2013	J1	16h23	Ag110m	550
27/11/2013	J2	13h09	Ag110m	550
28/11/2013	J3	08h23	Ag110m	410
29/11/2013	J4	08h24	Ag110m	450
02/12/2013	J7	15h55	Ag110m	<LD

Tableau 16 : Suivi anthropogammamétrique du cas n°2 CNPE D, contamination interne à l'Ag-110m

## 5.2 Influence des jours de mesures

### 5.2.1 Influence des mesures ATP réalisées à J0

Les valeurs théoriques de rétention des radioéléments données par les modèles biocinétiques de la publication 78 de la CIPR(21) ne sont décrites qu'après le premier jour d'incorporation (J1) afin de ne pas prendre le risque d'entacher la mesure de contamination interne par une mesure de contamination externe. L'outil CADOR utilisé pour la réalisation de ce travail se base sur les modèles de la CIPR et ne peut donc pas tenir compte des mesures réalisées le premier jour de la contamination (J0).

Cependant, une actualisation récente (38) des données scientifiques concernant les modèles biocinétiques permet de tenir compte des mesures ATP réalisées dès la première heure après l'événement contaminant sous réserve d'avoir éliminé une éventuelle contamination externe. Ceci permettra alors de détecter plus fréquemment la présence d'une particule chaude qui peut être éliminée dès J1 et d'identifier plus précocement le modèle d'incorporation.

### 5.2.2 Influence du nombre de mesures et de leur date de réalisation

L'ensemble des résultats issus de ce travail proviennent de données réelles observées en situation de travail, collectées dans les différents services médicaux des CNPE Français. Dans notre étude, parmi les 119 cas de contamination interne analysés, nous n'avons pas pu déterminer de modèle d'incorporation pour 23 cas malgré les trois mesures ATP après J0. Les mesures corps entier réalisées ne permettaient pas de définir un modèle d'incorporation de manière précise malgré les trois mesures ATP après J0. Dans ces cas, il s'agissait de contamination très inférieure au seuil des 0,1mSv.

En cas de contamination interne, un suivi anthropogammamétrique comportant plus de trois examens ATP devrait donc être réalisé au cours des 10 premiers jours.

Une analyse statistique fera l'objet d'un prochain travail avec l'objectif de réaliser des modélisations biostatistiques issues des données collectées dans cette étude qui permettront de définir les modalités exactes du suivi des salariés contaminés, garantissant ainsi une évaluation précise de la DEE. Elle sera réalisée par des méthodes originales, incluant le développement d'un nouvel estimateur statistique adapté à ces petites séries de mesures et des simulations *in silico* afin d'apprécier l'incertitude de l'estimation de l'activité incorporée à l'échelle individuelle. Ces analyses permettront de connaître le

nombre de mesures ATP permettant un suivi de qualité pour les salariés ayant eu une contamination interne.

### 5.3 Influence du temps de comptage

Parmi les 119 cas de contamination interne analysés, nous n'avons pu déterminer de modèle d'incorporation pour 8 cas en raison d'une activité trop faible à l'ATP lors des mesures réalisées à distance de l'événement contaminant. Un doublement du temps d'examen ATP permettrait alors de faciliter et d'améliorer la reproductibilité des déconvolutions spectrales. A noter toutefois que les doses entraînées par ces cas de contaminations auraient été très inférieures au seuil des 0.1mSv.

#### 5.3.1 Par rapport à la limite de détection

##### 5.3.1.1 Distinction des modèles ingestion et inhalation

La limite de détection de l'anthropogammamétrie est évaluée à environ 300Bq. Elle peut être à l'origine de difficultés pour la distinction des modèles d'incorporation par ingestion et inhalation.

Dans cet exemple (*cf. annexe 1 cas n°1 CNPE D*), la mesure réalisée à J4 est difficilement déconvoluable en raison d'une activité très faible.

Date	Jour	Heure	Radionucléide	Activité (Bq)
03/04/2016	J0	14h00	Ag110m	3220
04/04/2016	J1	08h34	Ag110m	1596
05/04/2016	J2	08h30	Ag110m	1060
06/04/2016	J3	08h24	Ag110m	380
07/04/2016	J4	08h26	Ag110m	<LD

Tableau 17 : Suivi anthropogammamétrique du cas n°1 CNPE D, contamination interne à l'Ag-110m

Dans un premier temps, les hypothèses d'incorporations sont « testées » selon les mesures réalisées à J1, J2 et J3.

Deux modes d'incorporations peuvent être retenus puisque :

- en modèle ingestion, RBP = 1.39 ;  $Khi^2 = 2.41/5.99$  ;
- en modèle inhalation 5 $\mu$ m, RBP = 1.61 ;  $Khi^2 = 4.7/5.99$ .

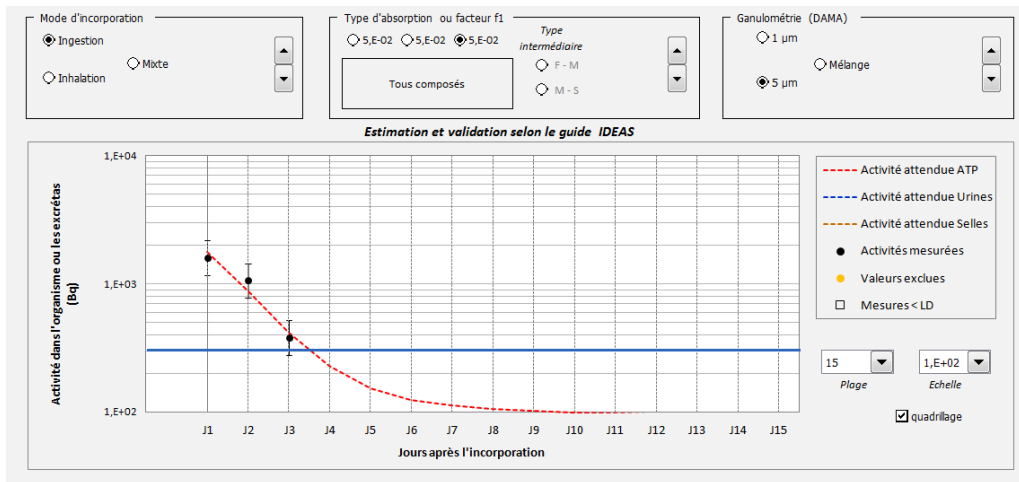


Figure 60 : Cinétique de décroissance du cas n°1 CNPE D avec une hypothèse d'incorporation par ingestion et représentation de la LD en bleu

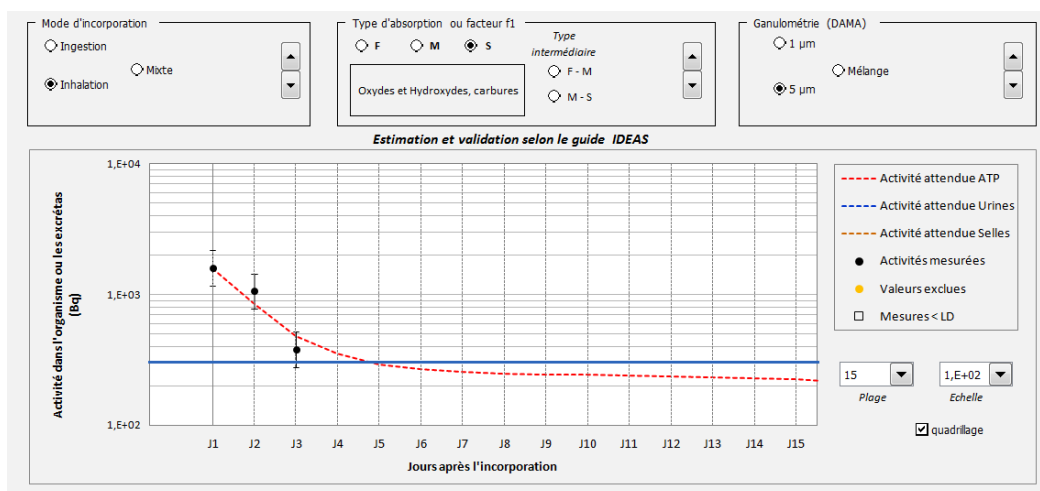


Figure 61 : Cinétique de décroissance du cas n°1 CNPE D avec une hypothèse d'incorporation par inhalation et représentation de la LD en bleu

Si l'on considérait la mesure de J4 = LD (= 300Bq) ; le modèle inhalation pourrait être retenu.

Si l'on considérait que la mesure J4 correspondait à environ 200Bq ; le modèle ingestion pourrait alors être retenu.

- en modèle ingestion, RBP = 1.39 ;  $\text{Khi}^2 = 2.93/7.81$  ;

- en modèle inhalation 5µm, RBP = 2.24 ;  $\text{Khi}^2 = 14.98/7.81$ .

En raison d'une décroissance rapide de l'activité en cas d'incorporation suivant un modèle par ingestion, les activités mesurées sont plus rapidement susceptibles d'être inférieures à la limite de détection de 300Bq que pour les modèles par inhalation.

L'observation de ce type de modèle est donc de ce fait plus difficile. L'augmentation du temps de mesure pourrait permettre de distinguer les modèles d'incorporation pour ces cas. A noter toutefois que ces derniers correspondent à de très faibles valeurs de dose, inférieures à 0,1 mSv.

### 5.3.1.2 Distinction des modèles ingestion et particule chaude

Pour rappel, lors d'une incorporation par particule chaude, on constate une négativation des examens anthropogammamétriques entre J2 et J7. Une confusion avec un modèle par ingestion est alors possible puisque dans ce cas les mesures ATP peuvent elles aussi être rapidement inférieures à la limite de détection. A noter que ces cas de modèle par ingestion correspondent à de très faibles valeurs de DEE, inférieures à 0,1 mSv.

## 5.4 Influence de la forme chimique

Les cas de contamination interne pour lesquels un modèle a pu être identifié correspondent le plus souvent à des oxydes ; pour le Cobalt 58 et 60 (type S), pour l'Antimoine 124 (type M), pour le Zirconium 95 (type M) ou pour le Césium 137 (type F). Ces observations sont cohérentes avec les données de la littérature (21).

Un cas particulier concerne l'Argent 110, radionucléide qui fait exception et pour lequel les formes S, M ou F étaient parfois compatibles avec l'incorporation. (Cf. cas 7, 8, 9,10 et 11 du CNPE G *Annexe I*). Ceci rejoint les constats des ingénieurs pour lesquels l'Argent 110 reste un sujet de discussion et de spéculations scientifiques (39). Il semblerait que l'Argent s'associe à d'autres éléments (impuretés) telles que le soufre (Ag-S, donne un caractère insoluble) ou l'iode (Ag-I, donne un caractère très peu soluble) formant alors d'autres espèces. C'est pourquoi, les trois formes physico-chimiques (types S, M et F) ont été analysées dans ce travail pour les contaminations internes à l'Argent<sup>110m</sup>.

Les cinétiques de décroissance des contaminations internes à l'Antimoine 124 n'ont pu être établies pour les modèles par inhalation 1µm et par ingestion parce que les facteurs de rétention ne sont pas connus.

## 5.5 Discussion sur le choix de la granulométrie

Pour rappel, la granulométrie définie par défaut pour les travailleurs est de 5µm (CIPR). Cependant, si les tests de cohérence (RBP + Khi<sup>2</sup>) ne sont pas validés, une granulométrie d'1 µm peut être testée. Néanmoins, dans certains cas, la granulométrie semble être inférieure à 1µm.

Par exemple, dans le cas n°6 CNPE G, il s'agit d'une contamination au Cobalt 58 et 60.

Pour le Co<sup>60</sup>, l'hypothèse d'inhalation 5µm, donne un test RBP non valide à 6.85 et un Khi<sup>2</sup> non valide à 124/12.59 et l'hypothèse d'inhalation 1µm donne un test RBP valide à 2.62 mais un Khi<sup>2</sup> non valide à 28.26/12.59.

Date	Jour	Heure	Radionucléides	Activité (Bq)
10/08/2016	J0	15h13	Co-58	430
			Co-60	1200
11/08/2016	J1	09h21	Co-58	570
			Co-60	660
12/08/2016	J2	10h07	Co-58	<LD
			Co-60	600

16/08/2016	J6	10h11	Co-58	275
			Co-60	330
17/08/2016	J7	10h01	Co-58	200
			Co-60	350
29/08/2016	J19	10h08	Co-58	<LD
			Co-60	390
12/10/2016	J63	11h48	Co-60	400
15/11/2016	J97	10h42	Co-60	380

Tableau 18 : Suivi Anthropogammamétrique du Cas n°6 CNPE G, contamination interne au Co-60

L'analyse de la courbe permet d'observer un écart important entre les mesures et la courbe théorique pour J1, J63 et J97. Cet écart explique la différence du  $\text{Khi}^2$  calculé par rapport au  $\text{Khi}$  théorique.

D'après la description faite en première partie, l'inhalation d'un aérosol d'une granulométrie inférieure au modèle supposé entraîne une rétention pulmonaire de la contamination plus importante que prévu. Ceci explique que l'activité mesurée à J63 et J97 soit supérieure à celle prévue par le modèle théorique. Dans ce cas, nous pouvons donc en conclure que la granulométrie est très probablement inférieure à  $1\mu\text{m}$ .

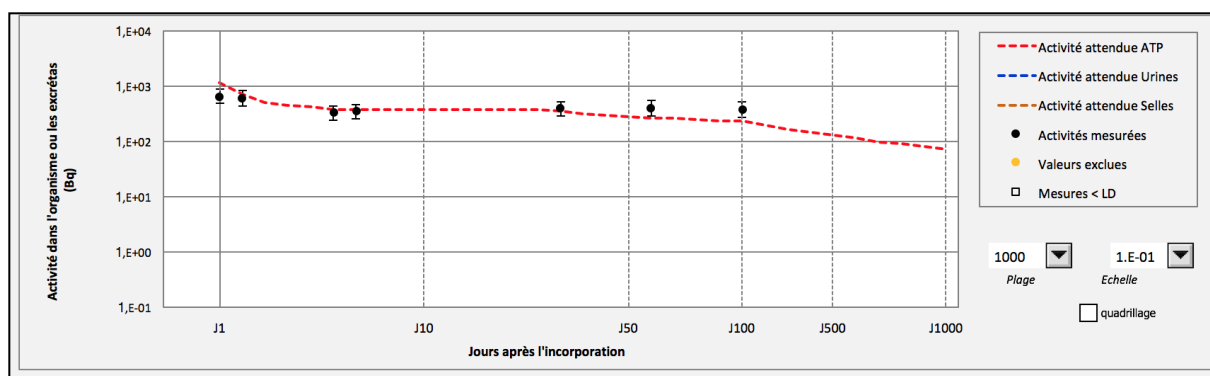


Figure 62 : Analyse de la cinétique de décroissance du Co-60 du cas n°6 CNPE G

Nous avons également identifié d'autres cas de contamination présentant une granulométrie inférieure à  $1\mu\text{m}$  (Cf. Cas n°1 et n°2 du CNPE I, annexe I).

D'autres cas de contamination semblent, quant à eux, présenter une granulométrie se situant entre 1 et  $5\mu\text{m}$ . En effet, pour certains cas validant le mode d'incorporation au test RBP, les paramètres de granulométrie ne peuvent être validés au test du  $\text{Khi}^2$ .

On le remarque au cas n° 10 du CNPE G :

- pour un DAMA de  $5\mu\text{m}$  RBP = 2.07,  $\text{Khi}^2$  19.35/15.51 et

- pour un DAMA de  $1\mu\text{m}$  RBP = 1.83  $\text{Khi}^2$  19.92/15.51.

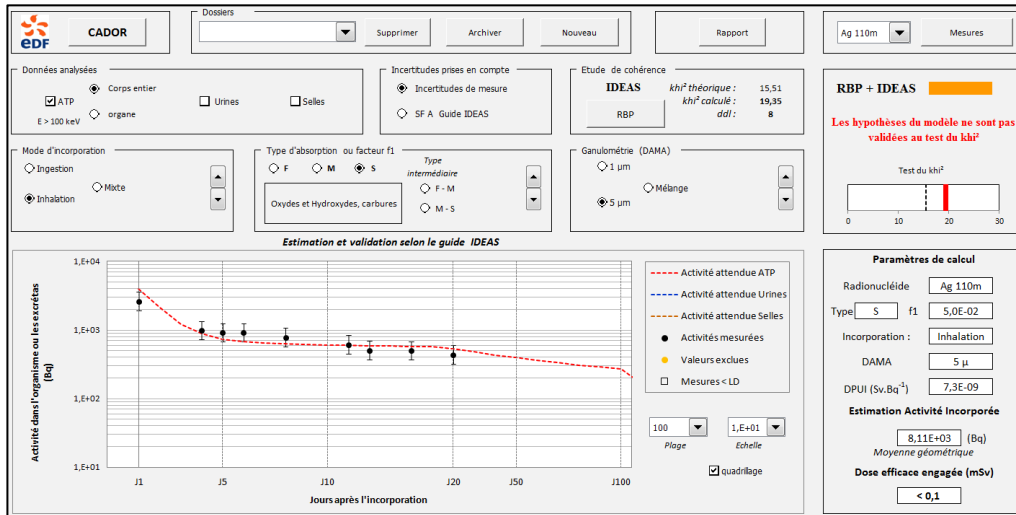


Figure 63 : Feuille de calcul CADOR présentant la cinétique de décroissance de l'Ag-110m et le test  $\text{K}\chi^2$  du cas n°10 CNPE G pour une granulométrie de 5  $\mu\text{m}$

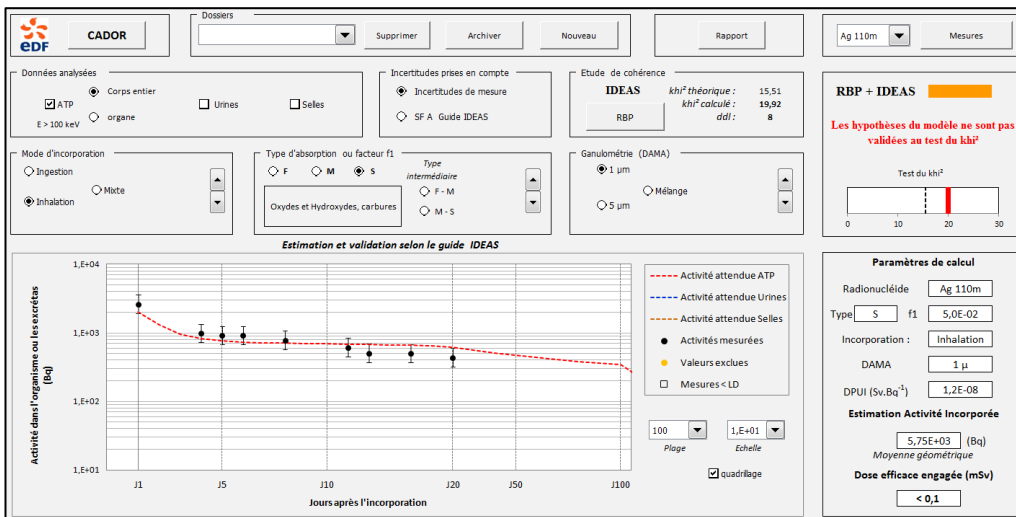


Figure 64 : Feuille de calcul CADOR présentant la cinétique de décroissance de l'Ag-110m et le test  $\text{K}\chi^2$  du cas n°10 CNPE G pour une granulométrie de 1  $\mu\text{m}$

D'après la description faite en première partie, l'analyse de la courbe de décroissance des activités mesurés nous oriente vers un choix de granulométrie intermédiaire, c'est à dire compris entre 1 et 5 $\mu\text{m}$ . L'application d'une granulométrie de 3  $\mu\text{m}$  permet de valider le test du  $\text{K}\chi^2$  :

- pour un DAMA de 3  $\mu\text{m}$  : RBP = 1,72  $\text{K}\chi^2$  14,24/15,51.

Le choix d'une granulométrie inappropriée est donc un facteur qui pourrait expliquer la non-validation du test du  $\text{K}\chi^2$  dans les observations pour lesquelles seul le test RBP était valide.

Ces observations sont corrélées avec une étude réalisée par EDF R&D en octobre 2004 sur le CNPE de Tricastin pendant l'arrêt de tranche sur le réacteur n°2. Elle avait pour objectif de qualifier et de



quantifier le risque de contamination interne des intervenants (nature et taille des radionucléides présents dans le bâtiment réacteur de la centrale).

Le DAMA moyen pendant l'arrêt de tranche (AT) était de  $2.9 \mu\text{m}$  ( $\pm 2.1$ ). Les radioéléments majoritairement présents étaient le  $\text{Co}^{60}$ , l' $\text{Ag}^{110\text{m}}$ , le  $\text{Co}^{58}$ , le  $\text{Cr}^{51}$ .

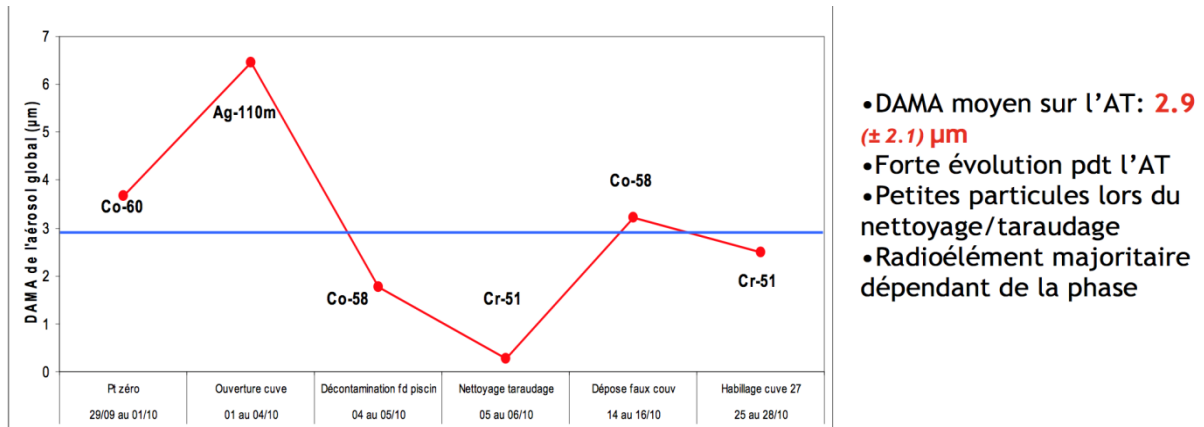


Figure 65 : Caractérisation expérimentale de la granulométrie des aérosols en CNPE au cours des différentes phases de l'Arrêt de Tranche(40)

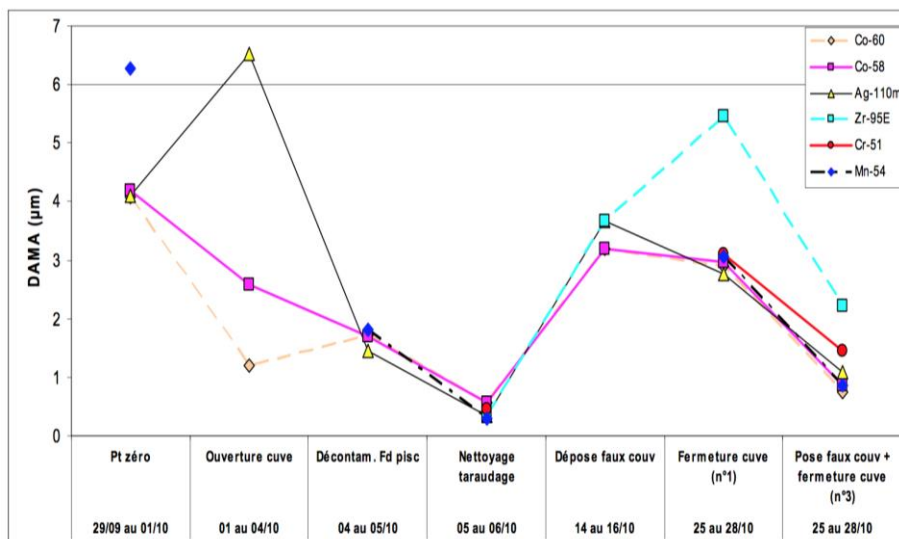


Figure 66 : Caractérisation expérimentale de la granulométrie des aérosols en CNPE par radioéléments au cours des différentes phases de l'Arrêt de Tranche (40).

On remarque que la granulométrie est variable au cours des différentes phases de l'arrêt de tranche. Les activités de taraudage, de nettoyage et de décontamination du fond de piscine sont pourvoyeuses de petite particules ( $\leq 1 \mu\text{m}$ ).

## 5.6 Evaluation des doses supérieures à 0.1 mSv

Au total, en se basant sur les valeurs de coefficient de dose issues de la réglementation française (tableau 3.1 de l'arrêté du 1<sup>er</sup> septembre 2003), 34 cas entraîneraient une dose interne supérieure à 0.1 mSv mais inférieure à 0.5 mSv, soit 51% des cas où un modèle d'incorporation défini par la CIPR a été observé.

Cependant, les connaissances scientifiques actuelles (28)(41)(38) non encore appliquées dans le droit français sont en faveur d'une majoration des valeurs de DPUI pour certains radionucléides. Ci-après est présentée la différence induite par l'évolution des coefficients de dose efficace pour le Co<sup>60</sup> en modèle inhalation DAMA 5µm. La future réglementation va alors entraîner une majoration des doses efficaces avec, dans cet exemple, un doublement (rapport 1,8) des doses efficaces engagées en cas de contamination liée au Cobalt 60.

Radionucléides	DPUI		Rapport
	Règlementation (2003)	CIPR 134 (2017)	
Co60 Inhalation Type S DAMA 5µm	1,70E-08	3,10E-08	1,8

Les nouvelles connaissances scientifiques sont donc en faveur d'une majoration de la radiotoxicité du Co<sup>60</sup>. Ainsi, cette évolution sera à l'origine d'une augmentation des doses efficaces engagées et du nombre de contaminations internes susceptibles d'être supérieures à 0,1mSv.

## 5.7 Proposition d'un protocole clinique de suivi des contaminations internes

Au vu des résultats de l'étude et des éléments de discussion détaillés exposés ci-avant, un algorithme décisionnel en cas de contamination interne pourrait donc être décliné tel qu'illustré ci-dessous.

En cas de contamination interne, un suivi anthropogammamétrique au cours des 10 premiers jours devrait donc être réalisé.

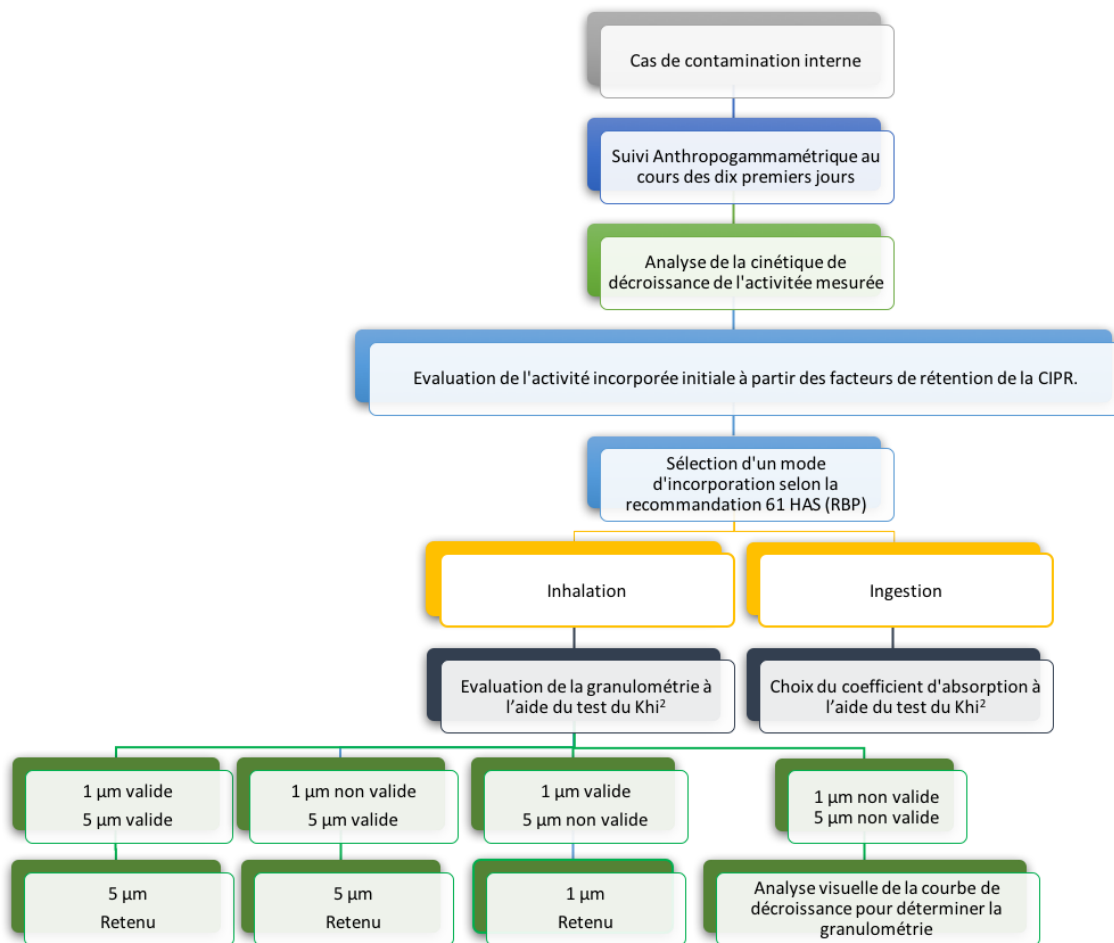


Figure 67 : Algorithme décisionnel en cas de contamination interne

L'application du test RBP aux estimations d'activités incorporées permet d'orienter le choix du modèle d'incorporation. Ensuite, l'utilisation de la feuille de calcul CADOR permet de valider visuellement l'adéquation des mesures avec la courbe théorique du modèle choisi. Enfin, la dernière étape consiste à valider le test du  $\text{Khi}^2$  en affinant les hypothèses d'incorporation (DAMA, f1).

Au final, lorsque les granulométries de 1 et 5  $\mu\text{m}$  sont validés par les deux tests, on retient le modèle 5 $\mu\text{m}$  par défaut comme indiqué par la CIPR. On ne retiendra la granulométrie de 1  $\mu\text{m}$  que lorsque celle-ci est validée au test du  $\text{khi}^2$  et que l'hypothèse d'une granulométrie de 5 $\mu\text{m}$  ne l'est pas.

Les examens radiotoxicologiques des urines et des selles sont actuellement considérés comme examen de référence pour définir l'activité initialement incorporée après une contamination interne. Ils sont réalisés en CNPE à partir d'un seuil à l'anthropogammamétrie le premier jour correspondant à 0,5 mSv. Ils sont alors réalisés le plus souvent au cours des trois premiers jours suivant l'événement contaminant. Nous proposons donc dans le chapitre suivant de discuter de l'intérêt comparé des résultats de la cinétique ATP et des RTX urines et selles pour déterminer l'activité incorporée.

## 5.8 Discussion de l'intérêt comparé des résultats de la cinétique ATP et des examens radiotoxicologiques urines et selles pour déterminer l'activité incorporée

### 5.8.1 Détermination du modèle biocinétique d'incorporation

Pour un cas donné de contamination interne, la détermination de l'activité incorporée initialement est conditionnée par la connaissance du modèle biocinétique d'incorporation correspondant au cas (Cf. partie 1 chapitre 7).

La comparaison des différents modèles d'excrétion des examens radiotoxicologiques des urines et des selles correspondant aux modèles biocinétiques d'incorporation définis par la CIPR est présentée dans les figures ci-après.

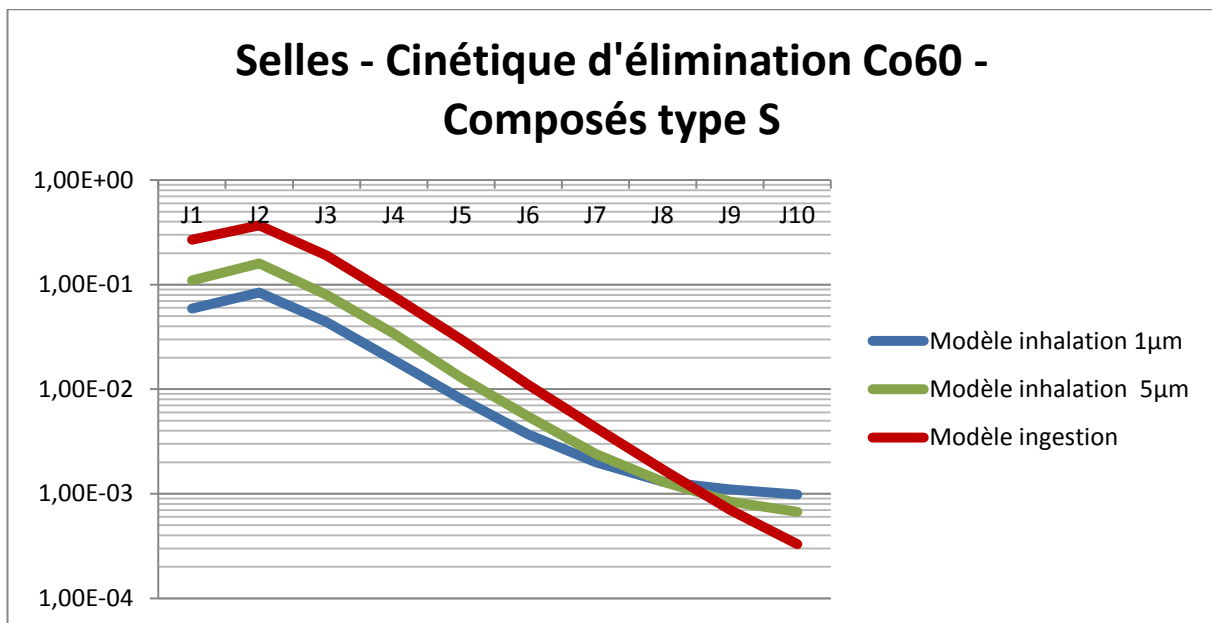


Figure 68 : Cinétiques d'excrétion des examens de selles définies par la CIPR pour 1 Bq de Cobalt 60 incorporé

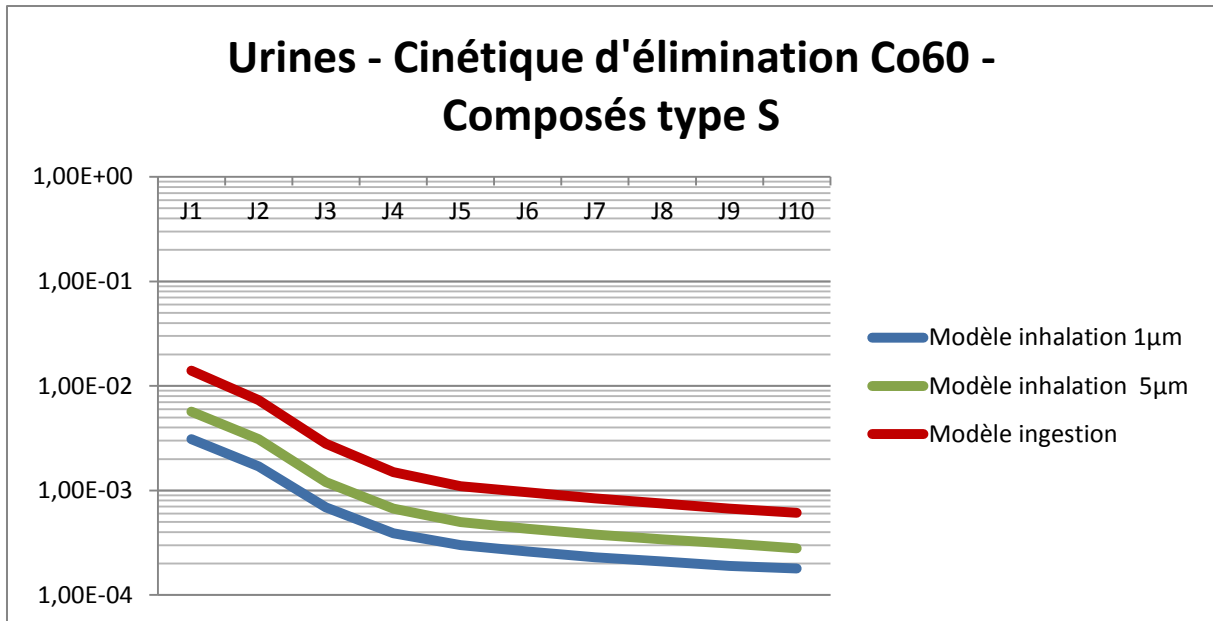


Figure 69 : Cinétiques d'excrétion des examens d'urines définies par la CIPR pour 1 Bq de Cobalt 60 incorporé

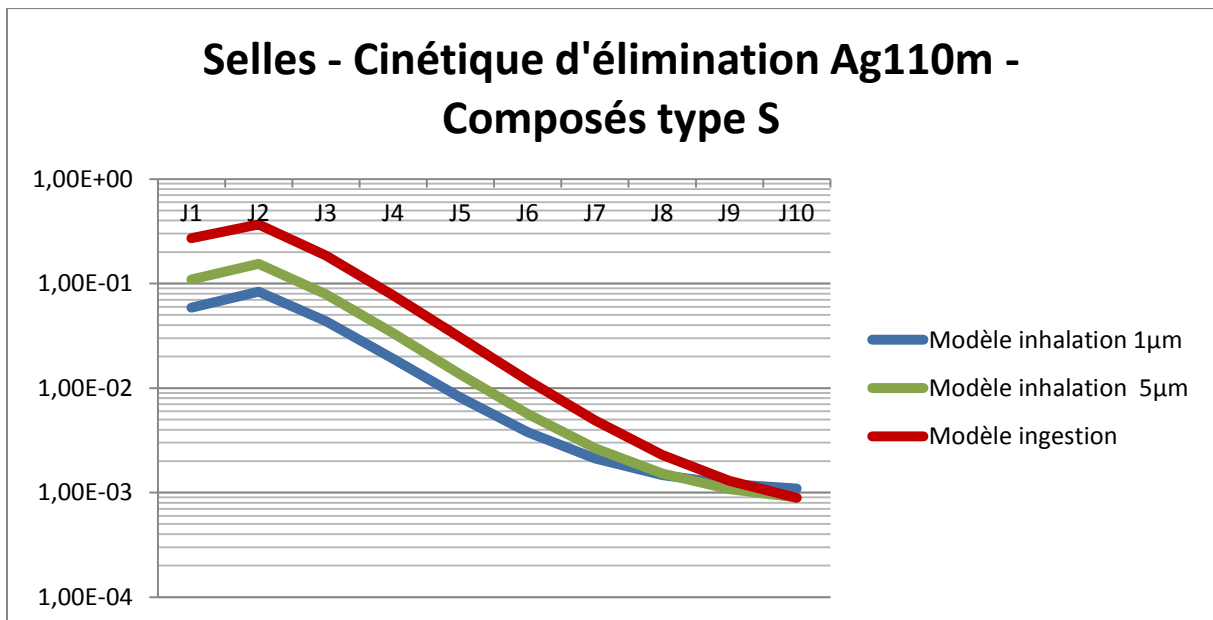


Figure 70 : Cinétiques d'excrétion des examens de selles définies par la CIPR pour 1 Bq d'Argent 110m incorporé

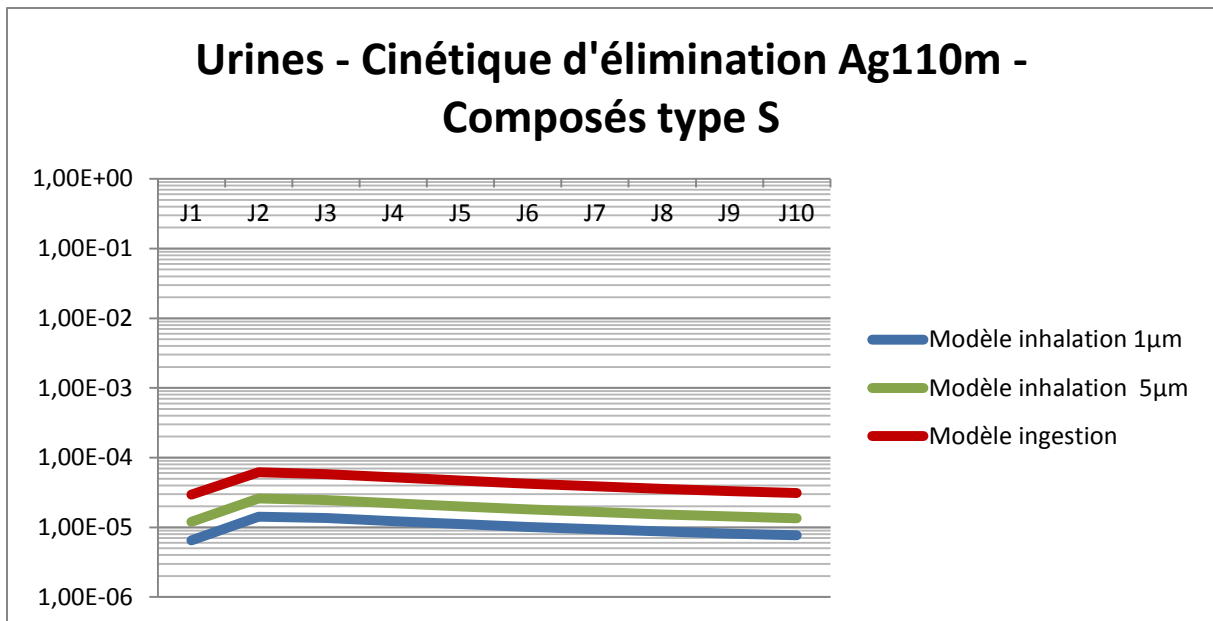


Figure 71 : Cinétiques d'excrétion des examens d'urines définies par la CIPR pour 1 Bq d'Argent 110m incorporé

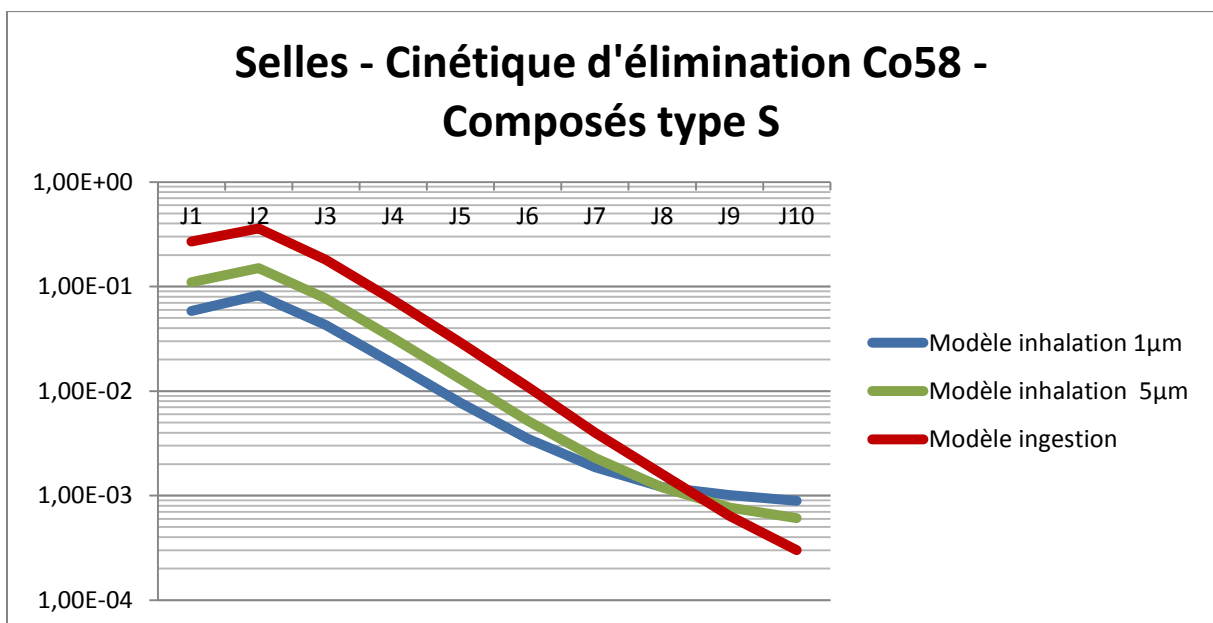


Figure 72 : Cinétiques d'excrétion des examens de selles définies par la CIPR pour 1 Bq de Cobalt 58 incorporé

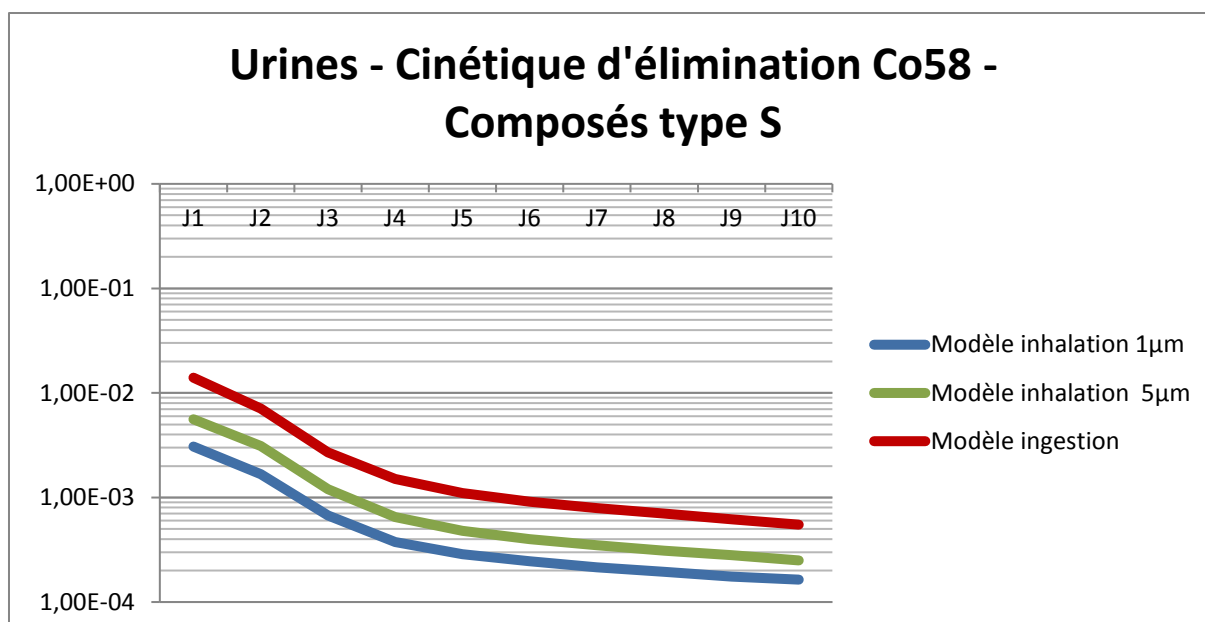


Figure 73 : Cinétiques d'excrétion des examens d'urines définies par la CIPR pour 1 Bq de Cobalt 58 incorporé

Tout d'abord, on constate que, pour tous les radionucléides émetteurs Gamma à l'origine de contamination interne en centrale nucléaire (Co60, Ag110m, Co58, ...), les cinétiques d'excrétion dans les selles ne présentent pas de différence significative entre les modèles d'incorporation au cours des 6 premiers jours. On observe une différence uniquement à partir du 6<sup>ème</sup> jour. Cependant, ces variations théoriques minimales sont confondues dans les variations individuelles d'excrétion et les incertitudes autour de la mesure (Cf. partie 2 chapitre 5.8.3).

A noter que la réalisation des analyses de selles à partir du 6<sup>ème</sup> jour ne permettrait pas de recueillir une éventuelle particule chaude (éliminée le plus souvent entre J1 et J4).

Pour les examens d'urines, on constate également que, pour tous les radionucléides émetteurs Gamma à l'origine de contamination interne en centrale nucléaire, la cinétique d'excrétion est sensiblement la même pendant les dix premiers jours, quel que soit le modèle d'incorporation choisi.

En résumé, la cinétique de décroissance théorique des analyses radiotoxicologiques décrite par la CIPR ne permet pas d'identifier un modèle biocinétique d'incorporation précis contrairement aux examens ATP (Cf. figure 35).

#### *5.8.2 Comparaison des résultats d'activité incorporée évalués à partir des examens radiotoxicologiques et anthropogammamétriques*

Dans cette partie, nous allons comparer les activités initialement incorporées estimées à partir des analyses radiotoxicologiques (RTX) des urines/selles à celles estimées par l'ATP. Puisque l'analyse des examens RTX des urines et des selles pour chacun de ces cas ne permet pas de discriminer un modèle d'incorporation en particulier (cf. chapitre précédent), le modèle biocinétique choisi pour l'analyse de ces examens a donc été pris par défaut selon la cinétique de décroissance des examens ATP correspondants.

Nous avons analysé l'ensemble des cas de contamination interne qui avaient justifié d'une prescription d'examen RTX, qui ne correspondaient pas à un modèle d'incorporation par particule chaude et pour lesquels nous disposons d'un suivi anthropogammamétrique (ATP) suffisant pour établir une cinétique de décroissance.

### 5.8.2.1 *Synthèse de la comparaison*

L'analyse des mesures radiotoxicologiques urines et selles a été réalisée à l'aide de la feuille de calcul CADOR. La valeur de l'activité incorporée initiale indiquée dans le tableau suivant correspond à la moyenne géométrique des estimations d'activité incorporée obtenue à partir de chaque mesure RTX.

Activité initiale incorporée estimée par type d'examen						
CNPE	Cas contamination	Modèle d'incorporation	Radionucléide	/ ATP	/ Selles	/ Urines
A	Cas 1	Inhalation	Co-58	7590 Bq	6160 Bq	
B	Cas 9	Ingestion	Co-60	10100 Bq	3190 Bq	
C	Cas 12	Inhalation	Co 60	11500 Bq	1140 Bq	
D	Cas 4	Inhalation	Ag-110m	35700 Bq	26800 Bq	
F	Cas 6	Inhalation	Co-58	21000 Bq	4830 Bq	
			Sb-124	6490 Bq	1260 Bq	
	Cas 7	Inhalation	Co-58	8260 Bq	3910 Bq	
			Co-60	4820 Bq	2660 Bq	
H	Cas 1	Inhalation	Co-58	14500 Bq	7490 Bq	
J	Cas 3	Inhalation	Co-60	9660 Bq	405 Bq	0 Bq
K	Cas 1	Inhalation	Co-58	34000 Bq	3000 Bq	
			Ag-110m	10500 Bq	2140 Bq	
	Cas 2	Inhalation	Cs-137	4960 Bq	850 Bq	
	Cas 4	Inhalation	Cs-137	3830 Bq	1600 Bq	
	Cas 13	Inhalation	Co-60	22200 Bq	1180 Bq	
	Cas 21	Inhalation	Ag-110m	5360 Bq	760 Bq	
Co-60			3240 Bq	1610 Bq		
L	Cas 2	Inhalation	Ag-110m	5600 Bq	5320 Bq	
M	Cas 4	Inhalation	Co-60	12800 Bq	13000 Bq	0 Bq
			Co-58	28000 Bq	27700 Bq	
	Cas 29	Inhalation	Co-58	5660 Bq	3320 Bq	
			Co-60	8570 Bq	8500 Bq	
	Cas 34	Inhalation	Co58	19000 Bq	25800 Bq	6980 Bq
Co-60			8460 Bq	11600 Bq	2030 Bq	
N	Cas 1	Inhalation	Co-58	13000 Bq	2430 Bq	
			Co-60	5000 Bq	678 Bq	
			Sb-124	5920 Bq	1040 Bq	
			Zr Nb-95	7810 Bq	2870 Bq	

Tableau 19 : Comparaison des estimations d'activité incorporée selon les analyses radiotoxicologiques et anthropogammamétriques



En premier exemple, nous allons détailler un cas où les examens RTX de selles sous-estiment l'activité incorporée initialement.

Exemple : Cas n°6 CNPE F

L'analyse des examens ATP permet d'estimer l'activité incorporée à 21000 Bq.

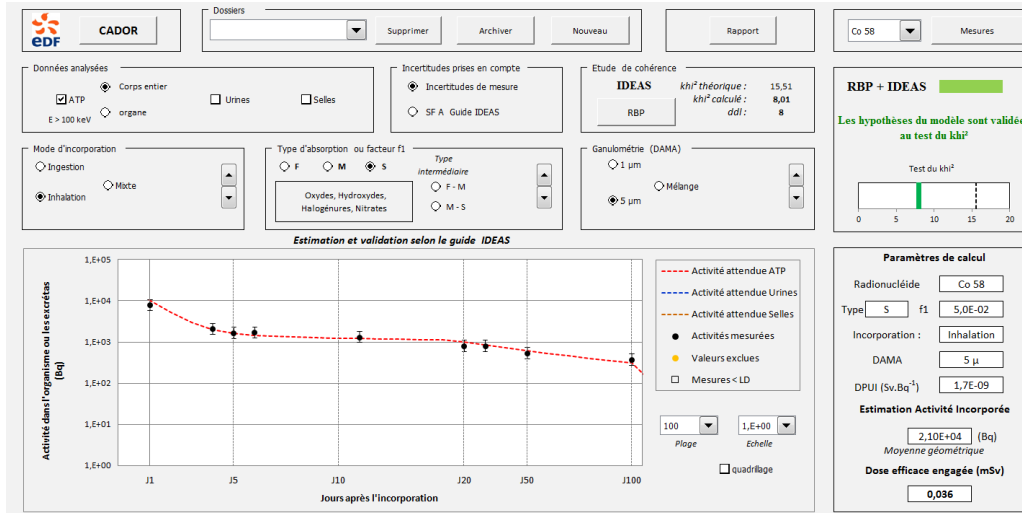


Figure 74 : Feuille de calcul CADOR présentant la cinétique de décroissance ATP du Co-58 et le test  $Khi^2$  du cas n°6 CNPE F

La moyenne géométrique des estimations d'activité incorporée pour les 5 recueils de selles réalisés permet d'estimer l'activité incorporée à 4830 Bq.

A noter que l'intervalle de confiance entourant une mesure de selle est très importants, le test du  $khi^2$  n'est donc pas pertinent pour vérifier la cohérence des mesures au modèle théorique.

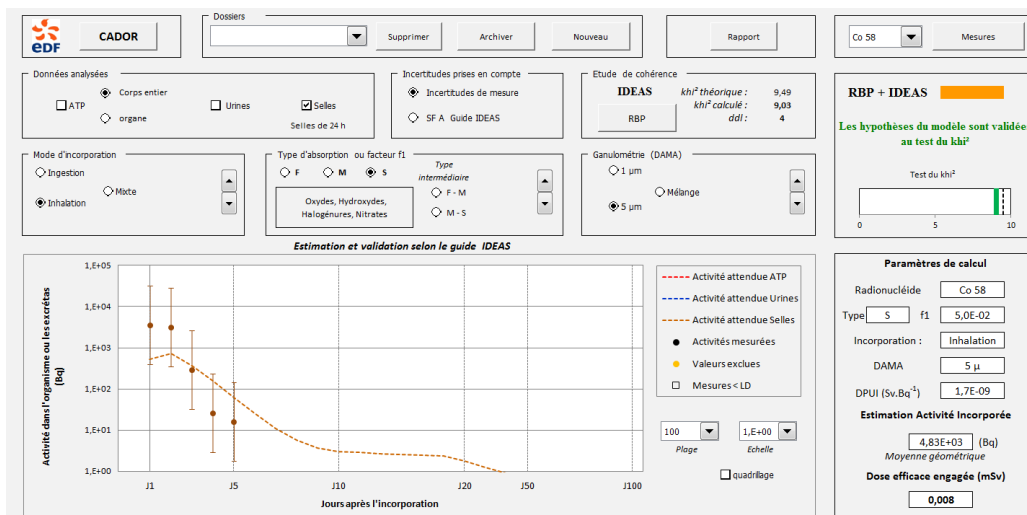


Figure 75 : Feuille de calcul CADOR présentant la cinétique de décroissance RTX des selles du Co-58 du cas n°6 CNPE F

On note une bonne concordance pour les recueils de selles des deux premiers jours. Cependant, les recueils des trois jours suivants entraînent une sous-estimation de l'activité incorporée initialement.

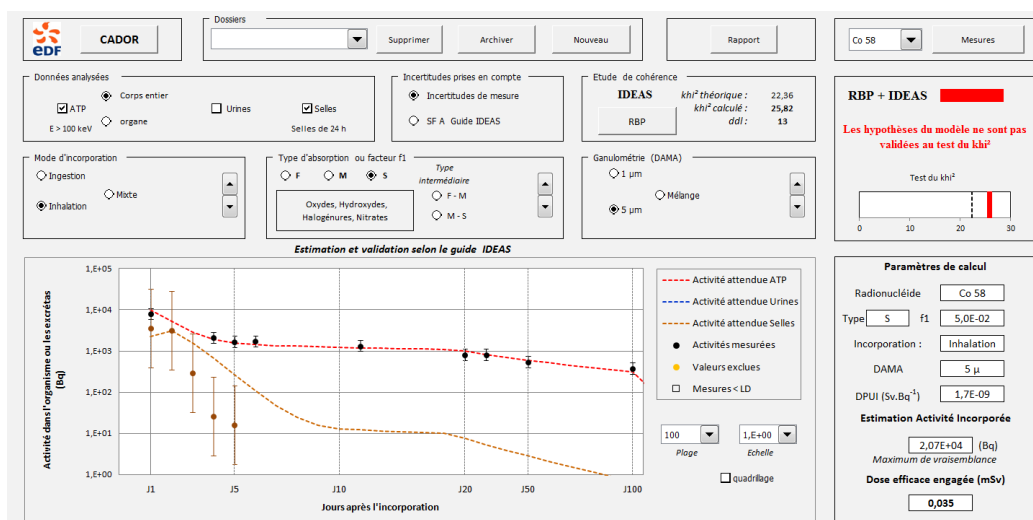


Figure 76 : Feuille de calcul CADOR comparant les cinétiques de décroissance ATP et RTX des selles du Co-58 du cas n°6 CNPE F

Dans ce second exemple, nous allons détailler un cas où les examens ATP et RTX sont concordants.

Exemple : Cas n°15 CNPE M.

L'analyse des examens ATP permet d'estimer l'activité initiale incorporée à 28000 Bq.

L'analyse des examens RTX de selles permet d'estimer l'activité initiale incorporée à 27700 Bq.

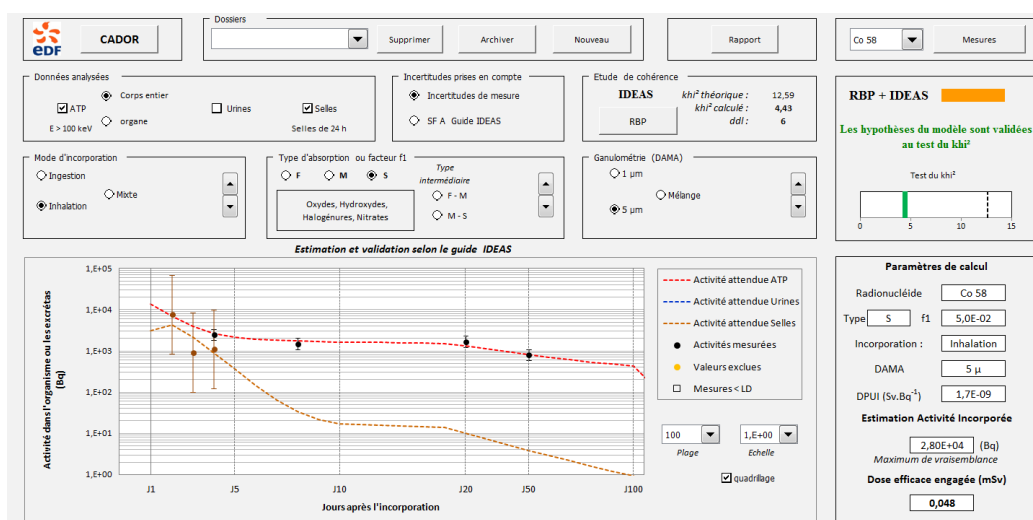


Figure 77 : Feuille de calcul CADOR comparant les cinétiques de décroissance ATP et RTX des selles du Co-58 du cas n°15 CNPE M

### 5.8.2.2 Qualité des recueils

Pour les cas n°2 du CNPE L et les cas n°4 et 15 du CNPE M, l'activité incorporée selon les examens RTX montre une très bonne concordance à l'estimation faite à partir des examens ATP. Pour 6 cas

/19, les estimations d'activité incorporée d'après les examens de selles sont jusqu'à deux fois inférieures à celle estimées par l'ATP.

Pour les 11 cas restants, l'activité incorporée selon les examens des selles était très inférieure à celle estimée par les examens ATP, cette différence était bien supérieure à un facteur 2 allant même jusqu'à plus d'un facteur 10.

Compte tenu de la grande variabilité de l'excrétion des selles d'un jour à l'autre, une autre méthode consiste à additionner les résultats des analyses RTX des selles et à en déduire l'activité incorporée  $A_{ij}$  selon la formule suivante :

$$A_{ij} = \frac{\sum m(j)}{\sum f(j)} \text{ où}$$

$A_{ij}$  : Activité initiale incorporée  $i$  selon les examens des selles réalisés aux jours  $j$

$\sum m(j)$  : Somme des activités mesurées dans les selles aux jours  $j$  depuis l'incorporation.

$\sum f(j)$  : Somme des valeurs de la fonction d'excrétion aux jours  $j$  définie par la CIPR.

Malgré tout, pour 8 cas/19, l'activité incorporée selon les examens des selles était très inférieure à celle estimée par les examens anthropogammamétriques, cette différence était bien supérieure à un facteur 2 allant même jusqu'à plus d'un facteur 10.

Les examens urinaires sont le plus souvent non contributifs à l'estimation de l'activité incorporée (2 cas négatif sur trois). En effet, ces derniers n'ont permis d'estimer l'activité incorporée que pour un seul cas et l'activité incorporée estimée était alors très inférieure à celle estimée par les mesures ATP.

La qualité des mesures *in vivo* ou *in vitro* ne peut être remise en cause puisqu'elles sont validées par le COFRAC, garantissant ainsi la justesse et la reproductibilité des résultats.

Cependant, l'analyse des recueils selles est conditionnée d'une part par l'exhaustivité du recueil qui ne peut être garantie. En effet, nous avons observé des cas de contamination par particule chaude sans recueil de celle-ci par les examens de selles. Ces observations rejoignent les constatations des gastro-entérologues qui ont abandonné les dosages de stéatorrhée sur recueil des selles de 24h.

D'autre part, la datation précise des recueils de selles n'est pas garantie car à la main du salarié. Au total, on ne peut garantir l'exhaustivité du recueil des urines et des selles sur 3 jours. Cela constitue un inconvénient par rapport aux mesures *in vivo*, risquant d'aboutir à une sous-estimation de l'activité incorporée.

### 5.8.3 Incertitudes sur les mesures radiotoxicologiques

Lors des 10 premiers jours qui suivent une contamination, l'élimination des radionucléides est fluctuante (21) et va dépendre :

- du mode d'incorporation,
- de la granulométrie,

- de la forme physico-chimique,
- du métabolisme individuel. Il y a de grandes fluctuations dans l'élimination quotidienne, la masse de selles variant de 60 à 500g/jour et le volume d'urine émis quotidiennement varie entre 500 et 2900ml (42).

L'analyse d'échantillons urinaires et fécaux comporte alors une incertitude d'interprétation liée à la fluctuation de l'excrétion fécale d'un jour à l'autre(21). Pour tenir compte de ces différentes incertitudes, le SF associé aux analyses urinaires/fécales de 24h est respectivement de 1,14 et 3,01. Pour rappel, le SF associé aux mesures anthropométriques est de 1,17.

L'incertitude entourant les mesures d'activité excrétée dans les examens RTX est significativement plus importante que celle entourant la mesure ATP.

#### 5.8.4 Comparaison des limites de détections des examens radiotoxicologiques et ATP

Dans la figure suivante est présentée la cinétique de rétention pulmonaire et la cinétique d'excrétion des urines et des selles au cours du temps. La ligne horizontale bleue représente la limite de détection (LD) pour la mesure ATP corps entier. La ligne horizontale orange représente les limites de détection pour les examens d'urines et de selles.

Les mesures *in vivo* permettent un suivi plus prolongé dans le temps que les mesures radiotoxicologiques urines et selles. En effet, la limite de détection est atteinte moins rapidement que pour les examens d'urines et de selles.

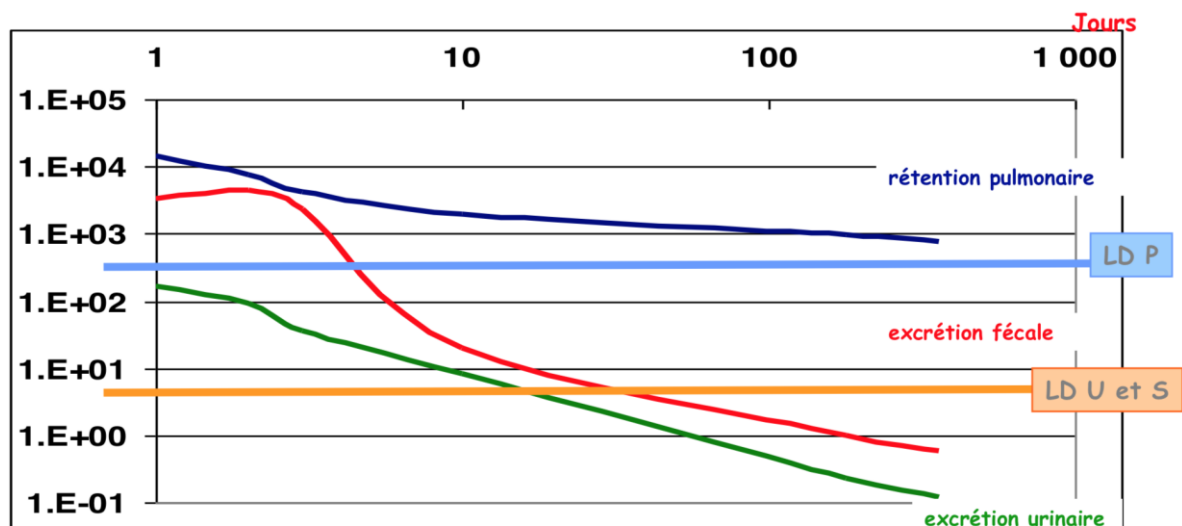


Figure 78 : Evolution de l'activité pulmonaire et excrétée au cours du temps et représentation des limites de détection pour chaque examen (cas du Co60)

### 5.8.5 Discussion sur les paramètres d'incorporation utilisés

Dans cette étude, l'utilisation de certains paramètres d'incorporation « par défaut » de la CIPR sont une source de différences entre les résultats des mesures ATP/ RTX comme illustré et expliqué ci-dessous.

#### Cas de contamination n°1 du CNPE G :

Il correspond à l'incorporation d'un aérosol de composés « polydispersés » constitué de  $\text{Co}^{58}$ ,  $\text{Co}^{60}$  et  $\text{Zr-Nb}^{95}$ . Les cinétiques d'excrétion de selles sont présentées dans les trois figures suivantes. En dehors de particules chaudes éliminées à J1 et J2, on remarque une bonne cohérence entre les mesures des selles réalisées à J3, J4, J30 et le modèle d'excrétion défini par la CIPR pour les trois radionucléides.

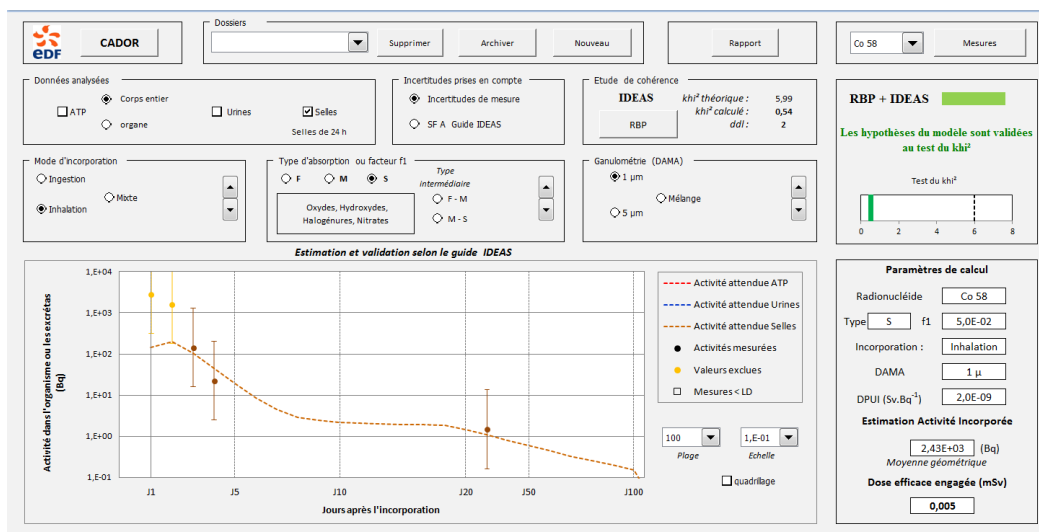


Figure 79 : Cinétique de décroissance des examens RTX des selles du Co58 du cas n°1 CNPE G

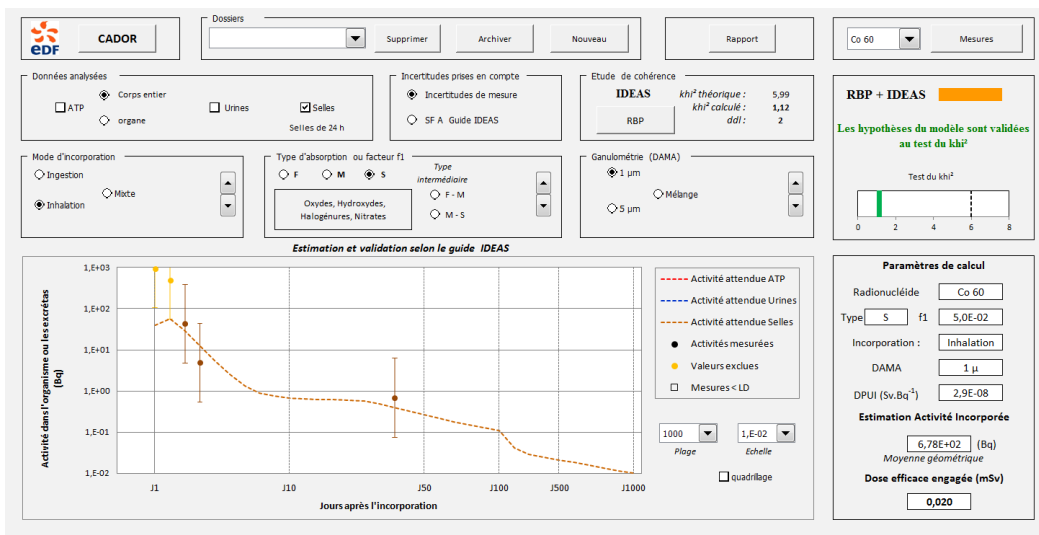


Figure 80 : Cinétique de décroissance des examens RTX des selles du Co60 du cas n°1 CNPE G

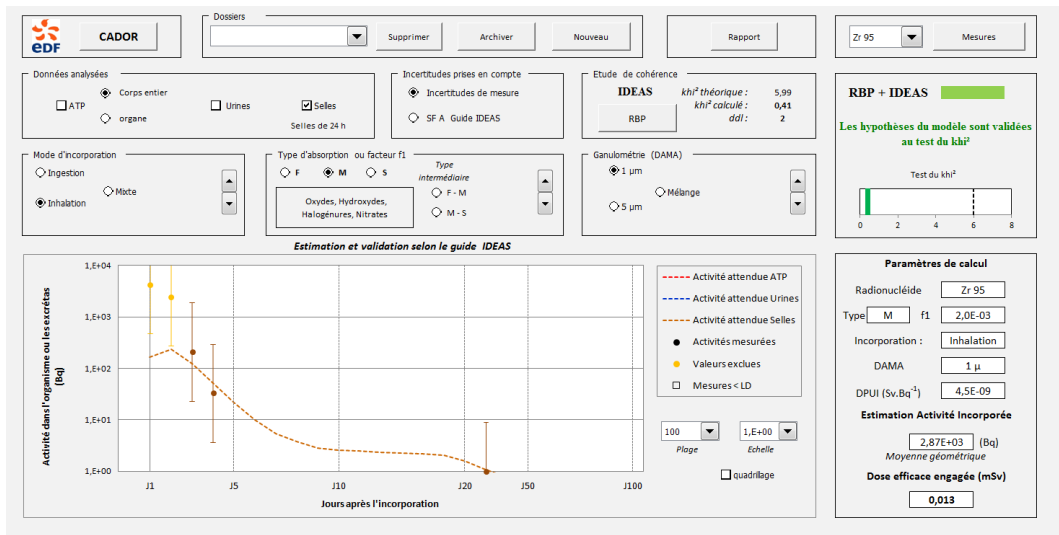


Figure 81 : Cinétique de décroissance des examens RTX des selles du Zr95 du cas n°1 CNPE G

Cependant la comparaison aux mesures ATP correspondantes montre à chaque fois une sous-estimation de l'activité incorporée selon les examens RTX.

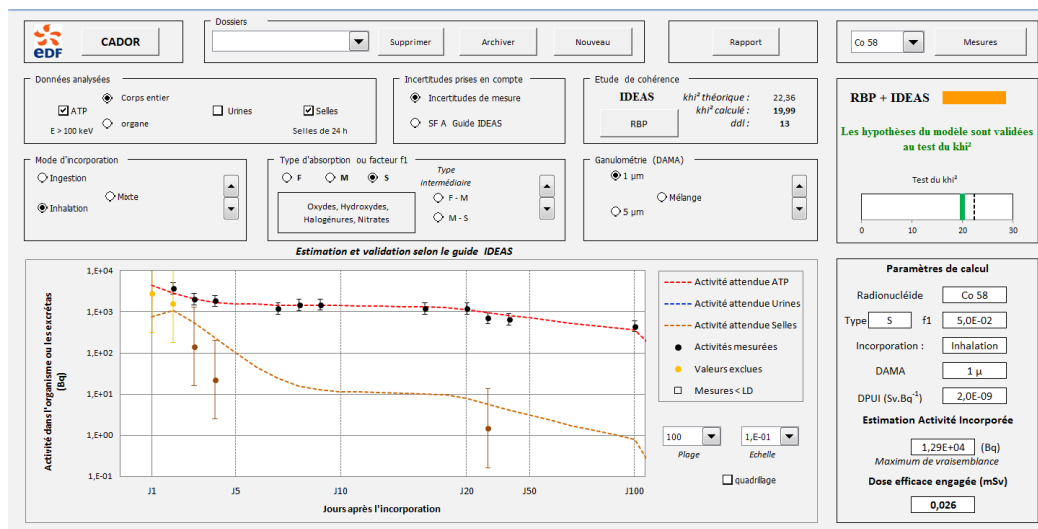


Figure 82 : Comparaison des cinétiques de décroissance des examens ATP (rouge) et RTX (marron) du Co58 du cas n°1 CNPE G

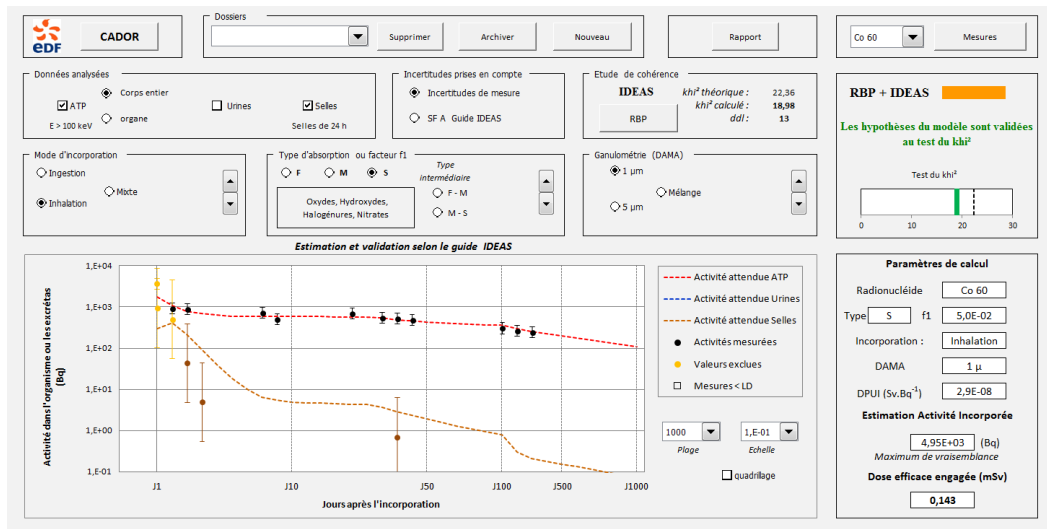


Figure 83 : Comparaison des cinétiques de décroissance des examens ATP (rouge) et RTX (marron) du Co60 du cas n°1 CNPE G

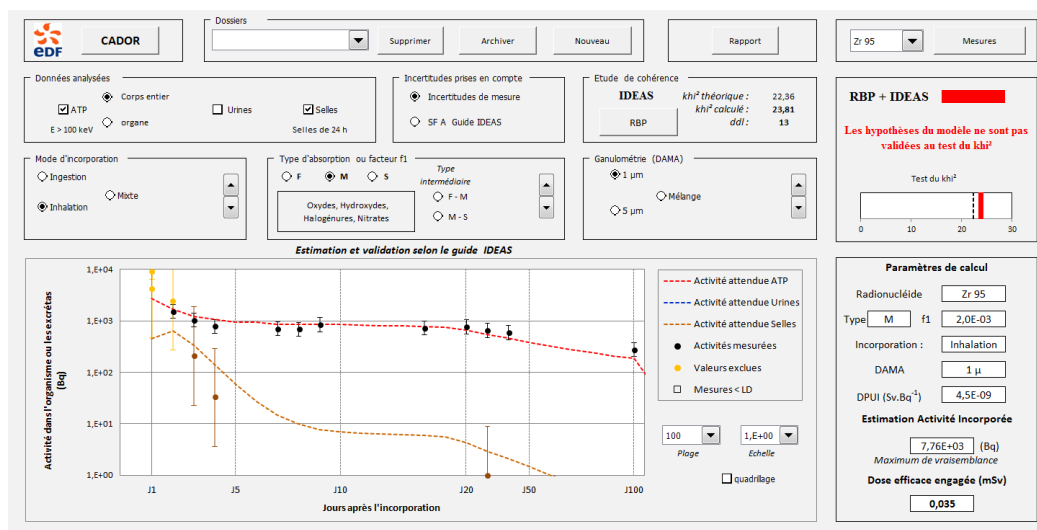


Figure 84 : Comparaison des cinétiques de décroissance des examens ATP (rouge) et RTX (marron) du Zr95 du cas n°1 CNPE G

Les choix de la bonne granulométrie et de la bonne forme physico-chimique sont indispensables à l'analyse des mesures ATP. Pour ce qui concerne l'analyse des mesures RTX urines/selles, d'autres paramètres d'incorporation sont nécessaires à une interprétation correcte des résultats : facteur de réabsorption intestinal  $f_1$ , le taux de dissolution lent pulmonaire  $S_s$ , la vitesse de remontée muco-ciliaire (sujet tabagique ou non), l'absorption sanguine ainsi que l'accélération du temps de transit digestif (utilisation de laxatif doux ou non).

L'utilisation de logiciel professionnel (IMBA) de suivi de contamination interne permettrait d'améliorer la cohérence des mesures RTX aux mesures ATP et ainsi une meilleure cohérence des estimations d'activité incorporée. Mais l'utilisation de ce logiciel de par la multiplicité des paramètres

pouvant être modifiés, relève du domaine de l'expertise pour des doses nettement supérieures à 0,5 mSv.

Ces observations sont concordantes avec les résultats d'une étude publiée en avril 2007 reposant sur l'analyse de mesures ATP et RTX d'un groupe de sept travailleurs contaminés après un incident lors du transport de combustible irradié en centrale nucléaire (43).

### *5.8.6 Intérêt des examens radiotoxicologiques*

Pour toutes les raisons développées ci-dessus, l'ATP constitue un bon moyen de suivi de la contamination interne sous réserve de réaliser un suivi régulier et des comptages de deux minutes facilitant l'analyse de ces examens.

Les examens radiotoxicologiques des selles restent cependant utiles pour la recherche et la quantification des radionucléides émetteurs Alpha.

Ils permettent également la détection de certains radionucléides présents en très faible quantité les rendant ainsi difficiles à quantifier par l'anthropogammamétrie (Ex : Cr<sup>51</sup>, Mn<sup>54</sup>, Fe<sup>59</sup>, Co<sup>57</sup>, Sn<sup>113</sup>, Sn<sup>117m</sup>). Ces radionucléides sont cependant très peu radiotoxiques (*Cf. tableau 3*).

Les examens des selles sont aussi réalisés en cas de contamination interne avec présence de particules chaudes. En effet, l'anthropogammamétrie ne peut évaluer directement l'activité de celles-ci sans application d'une méthode spécifique et l'utilisation de facteurs correctifs (35).



## 6 Conclusion

Cette étude a été réalisée grâce à l'analyse de mesures *in vivo* provenant des différents sites nucléaires français. Elles sont peu contraignantes pour les salariés et sont accréditées par le COFRAC, garantissant ainsi leur justesse et leur reproductibilité. Cette étude facilitée par l'usage d'un nouvel outil informatique, repose sur des mesures réelles résultant d'une exposition des salariés à leur poste de travail. La connaissance par les médecins du travail des conditions de travail alliées à la collaboration des ingénieurs nous a permis de vérifier la bonne cohérence des mesures ATP avec les modèles théoriques de la CIPR. Nous avons pu ainsi démontrer qu'en cas de contamination interne, le suivi ATP les jours suivant l'événement de contamination permet, pour les éléments émetteurs Gamma, d'identifier un modèle d'incorporation, d'évaluer l'activité incorporée et la DEE en résultant dès lors que celle-ci est supérieure à 0,1 mSv.

La réalisation de modélisations biostatistiques issues des données collectées permettra de définir les modalités du suivi des salariés contaminés internes (répartition et nombre de mesures dans le temps), garantissant ainsi une évaluation précise et reproductible de la DEE. Ces modélisations auront un impact pratique essentiel pour guider les médecins du travail dans le suivi et l'évaluation de l'exposition interne.

Néanmoins, d'ores et déjà, les résultats de cette étude modifient les règles de prescription et de réalisation des examens ATP dans les services médicaux des CNPE français. En cas de contamination interne, même minime, un suivi non invasif et peu contraignant est systématiquement réalisé par ATP répétées dans le temps dont la durée de comptage est prolongée à deux minutes. Parallèlement, ce travail de thèse permet d'alimenter les réflexions d'un groupe de médecin du nucléaire dont l'objectif est de proposer des recommandations à leurs confrères quant aux modalités précises de suivi des salariés contaminés et d'évaluation de la DEE. Un algorithme décisionnel en cas d'événement de contamination interne peut déjà être envisagée (*Cf. figure 66*). Les conclusions de ce groupe modifieront probablement les recommandations de bonnes pratiques actuelles de la HAS sur la surveillance médico-professionnelle de l'exposition interne aux radionucléides.

## Bibliographie

1. Autorité de sûreté nucléaire. « Le parc français des centrales nucléaires ». <https://www.asn.fr/Informer/Dossiers-pedagogiques/La-surete-des-centrales-nucleaires/Le-parc-francais-des-centrales-nucleaires> consulté le 18/09/2018.
2. Bataillon C, Féron D, Marchetti L, Perrin S, You D, et al. La corrosion et l'altération des matériaux du nucléaire, document CEA. [Internet]. CEA ; [cité 11 déc 2017]. Disponible sur : <http://www.cea.fr/Documents/monographies/Corrosion-alt%C3%A9ration-mat%C3%A9riaux-nucl%C3%A9aire-r%C3%A9acteurs-eau.pdf>
3. Guinard L, Moleiro E. Nouvelle synthèse sur la contamination des circuits par les produits de corrosion. EDF R&D/MMC ; 2005.
4. Tarabelli D, Anthoni S, Féron D, Ridoux Ph, Guinard L, Brun Ch. & Long A. Status and future plans of the PACTOLE code predicting the activation and transport of corrosion products in PWRs. Japan: Japan Atomic Industrial Forum, Inc. Water Chem 98 1998 JAIF Int Conf Water Chem Nucl Power Plants Kashiwazaki Niigata Jpn 13-16 Oct 1998. 1998 ; 301-5.
5. Cabanas BM. Comportement des produits de corrosion dans le circuit primaire des centrales REP - sorption du cobalt et du nickel sur des ferrites représentatifs [Internet] [phdthesis]. Université Paris Sud - Paris XI ; 2010 [cité 11 déc 2017]. Disponible sur : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00595061/document>
6. Charles MW, Harrison JD. Hot particle dosimetry and radiobiology--past and present. *J Radiol Prot Off J Soc Radiol Prot.* 2007;27(3A): A97-109.
7. Gonin M. Les pratiques dans les centrales nucléaires d'EDF, 2000. EDF - Serv Radioprot. 2000 ; Dosimétrie interne en centrale nucléaire (No.16) : p50-52.
8. EDF. Note de recommandation – Exploitation des filtres des principaux circuits d'eau des centrales REP, 2016. EDF CEIDRE/DETU/SCME/GCP ; 2016.
9. Rocher A, Drouet F, Touron JL, Blond S. Mise à l'arrêt à froid et RP : Un document pédagogique élaboré pour les exploitants. In Marseille; 2014.
10. Rothkamm K, Löbrich M. Evidence for a lack of DNA double-strand break repair in human cells exposed to very low x-ray doses. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2003 ; 100(9):5057-62.
11. Joiner MC, Marples B, Lambin P, Short SC, Turesson I. Low-dose hypersensitivity: current status and possible mechanisms. *Int J Radiat Oncol.* 1 févr 2001 ; 49(2):379-89.
12. Słonina D, Biesaga B, Urbański K, Kojs Z, Waligórski M. Evidence of low-dose hyper-radiosensitivity in normal cells of cervix cancer patients? *Radiat Prot Dosimetry.* 1 déc 2006;122(1-4):282-4.
13. Vaganay-Juéry S, Muller C, Marangoni E, Abdulkarim B, Deutsch E, Lambin P, et al. Decreased DNA-PK activity in human cancer cells exhibiting hypersensitivity to low-dose irradiation. *Br J Cancer.* juill 2000;83(4):514-8.

14. Colin C, Granzotto A, Devic C, Massart C, Viau M, Vogin G, et al. MRE11 and H2AX biomarkers in the response to low-dose exposure: Balance between individual susceptibility to radiosensitivity and to genomic instability. *Int J Low Radiat.* 2011 ; 8:96-106.
15. Grudzinski S, Raths A, Conrad S, Rube CE, Löbrich M. Inducible response required for repair of low-dose radiation damage in human fibroblasts. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2010;107(32):14205-10.
16. Bourguignon M, Foray N, Colin C, Pauwels E. Individual radiosensitivity: a key issue in radiation protection. *Int J Low Radiat.* 2013;9(1):52.
17. Joubert A, Zimmerman KM, Bencokova Z, Gastaldo J, Chavaudra N, Favaudon V, et al. DNA double-strand break repair defects in syndromes associated with acute radiation response: at least two different assays to predict intrinsic radiosensitivity? *Int J Radiat Biol.* 2008 ; 84(2) :107-25.
18. Le Guen B, Masse R. Effets des faibles doses des rayonnements ionisants. *Datatraitesin16-44534* [Internet]. 2007 [cité 1 mai 2018] ; Disponible sur : <http://www.em-consulte.com/en/article/64544>
19. Tubiana M, Masse R, De Vathaire F, Averbeck D, Aurengo A. La controverse sur les effets des faibles doses de rayonnements ionisants et la relation linéaire sans seuil. *Radioprotection.* 2007;42(2):133-61.
20. Recommendations of the international commission on radiological protection. CIPR Report 60. Pergamon Press, New York.
21. Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR), 1998. Individual monitoring for internal exposure of workers. CIPR Report 78. Pergamon Press, New York.
22. Norme Française S 92-501 Laboratoire de biologie médicale — Mesures anthroporadiométriques — Corps entier — Mesures des émissions gamma d'énergie supérieure à 100 keV. 2013.
23. *Arrêté du 1er septembre 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants.*
24. Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR), 1994. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66. Ann. ICRP 24 (1-3). Pergamon Press, New York.
25. Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR), 1979. Limits for intakes of radionuclides by workers. CIPR Report 30. Pergamon Press, New York.
26. Le Guen B. Modèles dosimétriques pour les radionucléides incorporés par les travailleurs. *DURAMT*; 2018.
27. Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR), 2006. Human alimentary tract model for radiological protection. CIPR Report 100. Elsevier, 2006.
28. Paquet F, Bailey MR, Leggett RW, Lipsztein J, Fell TP, Smith T, Nosske D, Eckerman KF, Berkovski V, Ansoberlo E, Giussani A, Bolch WE, Harrison JD. Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR), 2016. Occupational intakes of radionuclides: Part 2. ICRP

Publication 134. Ann. ICRP 45(3/4), 1–352.

29. Eckerman K, Harrison J, Menzel HG, Clement CH. Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR), 2012. Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. Ann. ICRP 41(Suppl.).

30. IRSN. Exposition professionnelle aux rayonnements ionisants en France : Bilan 2016. :130.

31. Gonin M, Le-Couteulx I. Les exemples de contamination interne, retour d'expérience sur les travailleurs du nucléaire dans les centrales nucléaires en France. In Paris ; 2015 [cité 1 mai 2018].

Disponible sur :

[http://www.sfrp.asso.fr/medias/sfrp/documents/manifestations/Journees\\_techniques\\_/2015\\_10\\_06/S1%20c%20GONIN%20M.pdf](http://www.sfrp.asso.fr/medias/sfrp/documents/manifestations/Journees_techniques_/2015_10_06/S1%20c%20GONIN%20M.pdf)

32. Castellani CM, Marsh JW, Hurtgen C, Blanchardon E, Berard P, Giussani A, Lopez MA. IDEAS Guidelines (Version 2) for the Estimation of Committed Doses from Incorporation Monitoring Data. EURADOS, 2013. 2013.

33. Landry B, Blanchardon E. Un outil de calcul de la dose efficace engagée. Radioprotection [Internet]. 2017 [cité 19 nov 2017] ; Disponible sur:

<https://www.radioprotection.org/articles/radiopro/abs/first/radiopro170010/radiopro170010.html>

34. HAS. Recommandation de bonne pratique : Surveillance Médico-Professionnelle de l'exposition interne aux radionucléides en installations nucléaires de base 2011.

35. Saily M, Lecouteulx I, Rollin L. Evaluation de l'activité d'une particule chaude radioactive incorporée chez un travailleur du nucléaire. 2018;

36. IAEA. Methods for Assessing Occupational Radiation Doses due to Intakes of Radionuclides. 2004 [cité 19 nov 2017] ; Disponible sur : <http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/6979/Methods-for-Assessing-Occupational-Radiation-Doses-due-to-Intakes-of-Radionuclides>

37. Grare R. 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 [Internet]. 2017 [cité 19 nov 2017]. Disponible sur : <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01620280/document>

38. Paquet F, Bailey MR, Leggett RW, Lipsztein J, Marsh J, Fell TP, Smith T, Nosske D, Eckerman KF, Berkovski V, Blanchardon E, Gregoratto D, Harrison JD. Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR), 2017. Occupational intakes of radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137. Ann. ICRP 46(3/4).

39. Benfarah M, You D, Jobert T and Debier D. Study of PWR Contamination by <sup>110m</sup>Ag Using Thermochemical Simulation of Silver, Iodine and Silver Iodide Under PWR Coolant Conditions. 20th NPC Int Conf. 2016.

40. IRSN. Prélèvements et caractérisation d'aérosols sur le chantier « fond de piscine » pendant l'arrêt de la tranche n°2 du CNPE de Tricastin en Octobre 2004. Direction de la radioprotection de l'Homme, service de radiobiologie et d'épidémiologie ; 2004.

41. Paquet F, Etherington G, Bailey MR, Leggett RW, Lipsztein J, Bolch W, Eckerman KF, Harrison JD. Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR), 2015. Occupational

Intakes of Radionuclides: Part 1. ICRP Publication 130. Ann. ICRP 44(2).

42. Snyder WS, Cook MJ, Nasset ES, Parry Howells G, Karhausen LR, Tipton IH. Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR), 1975. Report on the Task Group on Reference Man CIPR Report 23. Pergamon Press, New York.
43. Davis K, Marsh JW, Gerondal M, Bailey MR, Le Guen B. Assessment of intakes and doses to workers followed for 15 years after accidental inhalation of  $^{60}\text{Co}$ . Health Phys. 2007;92(4):332-44.
44. Franck D, Gerasimo P, Bérard Ph. Méthode d'évaluation de l'activité incorporée. 2000. EDF - Serv Radioprot. 2000 ; Dosimétrie interne en centrale nucléaire(No.16) : p.8-14.
45. EDF. Dosimétrie interne en centrale nucléaire. EDF, Service de Radioprotection; 2000.
46. Whillans DW, Chase WJ and Wolodarsky WH. Dose Assessment for Ingestion of a 330 Kilo Becquerel  $^{60}\text{Co}$  Hot Particle. Radiat Prot Dosim 2007. Vol. 127(No. 1-4,) : p.90-92.
47. Norme Internationale ISO 27048, Radioprotection - Estimation de la dose interne dans le cadre de la surveillance des travailleurs en cas d'exposition aux rayonnements. 2011.
48. Norme Française NF EN ISO 20553, Radioprotection - Surveillance professionnelle des travailleurs exposés à un risque de contamination interne par des matériaux radioactifs. 2017.
49. Agence Internationale de l'Énergie Atomique : Collection normes de sûreté No.37. Évaluation de l'exposition professionnelle due à l'incorporation de radionucléides — Vienne : Agence Internationale de l'énergie atomique, 2004.
50. Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR), 1994. Dose coefficients for intakes of radionuclides by workers. CIPR Report 68. Pergamon Press, New York.
51. Słonina D, Biesaga B, Urbański K, Kojs Z. Low-Dose Radiation Response of Primary Keratinocytes and Fibroblasts from Patients with Cervix Cancer. Radiat Res. 2007;167(3):251-9.
52. Tubiana M, Aurengo A, Auerbeck D, Masse R. The debate on the use of linear no threshold for assessing the effects of low doses. J Radiol Prot Off J Soc Radiol Prot. 2006 ; 26(3):317-24.
53. Principes de fonctionnement d'un réacteur nucléaire [Internet]. Connaissance des Énergies. 2011 [cité 29 nov 2017]. Disponible sur : <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/principes-de-fonctionnement-d-un-reacteur-nucleaire> consulté le 18/09/2018.
54. Delacroix D, Guerre JP et Leblanc P. Guide pratique radionucléides et radioprotection - EDP Sciences [Internet]. [cité 1 mai 2018]. Disponible sur: <https://laboutique.edpsciences.fr/produit/9782868838643>
55. Noßke D, Blanchardon E, Bolch WE, Breustedt B, Eckerman KF, Giussani A, Harrison JD, Klein W, Leggett RW, Lopez MA, Luciani A, Zankl M. New developments in internal dosimetry models | Radiation Protection Dosimetry | Oxford Academic. Radiat Prot Dosimetry. 2011 ; Volume 144(Issue 1-4): Pages 314-320.
56. Vivier A, Lopez G. Calculs de doses générées par les rayonnements ionisants - DOSIMEX 2. EDP Sciences.
57. EDF. Mémento de la radioprotection en exploitation [Internet]. EDF ; 2014. Disponible sur :

<https://www.edf.fr/sites/default/files/Lot%203/FOURNISSEURS/DEVENIR%20FOURNISSEUR/PDF/memento-de-la-radioprotection-en-exploitation-.pdf>

58. EDF. L'exploitation chimique en centrale PWR. Palier 1300 MWe. EDF, DPI/DPN ; 2011.

# Annexes

## Annexe 1 : Synthèse du suivi ATP des contaminations internes et les hypothèses d'incorporations retenus.

### Thèse contamination interne - Modèles d'incorporation retenus

CNPE	Cas	Date	Radionucléide	Modèle d'incorporation	Granulométrie	RBP	Khi2 calculé/théorique	RBP + IDEAS	Activité incorporée retenue	DEE (mSv)		
A	Cas 1	09/08/2009	Co-58	Ingestion	F=0,05	2,6	29,63/7,81		7040 Bq	<0,1		
					F=0,1	2	17,98/7,81		6380 Bq	<0,1		
					Type S	5 µm	1,6	5,56/7,81		7570 Bq	<0,1	
					Type S	1 µm	1,6	5,38/7,81		7640 Bq	<0,1	
	Cas 2	10/10/2013	Co-58	Ingestion	F=0,05	14,91	188,1/14,07		21400 Bq	<0,1		
					F=0,1	7,26	95,5/14,07		13300 Bq	<0,1		
					Type S	5 µm	2,03	16,3/14,07		8230 Bq	<0,1	
						Type S	1 µm	2,12	23,25/14,07		5460 Bq	<0,1
		Co-60	Ingestion	F=0,05	38,1	407,44/12,59		5550 Bq	<0,1			
				F=0,1	19,41	268,8/12,59		3580 Bq	<0,1			
	Type S			5 µm	6,68	110,47/12,59		2410 Bq	<0,1			
					Type S	1 µm	2,66	32,28/12,59		1640 Bq	<0,1	
	Cas 3	17/09/2013	Co-58	Ingestion	F=0,05	10,65	268,18/12,59		8200 Bq	<0,1		
					F=0,1	5,42	130,47/12,59		5600 Bq	<0,1		
					Type S	5 µm	1,81	11,09/12,59		4200 Bq	<0,1	
						Type S	1 µm	1,96	14,76/12,59		3170 Bq	<0,1
		Co-60	Ingestion	F=0,05	4,06	43,17/5,99		540 Bq	<0,1			
				F=0,1	3,8	39,45/5,99		520 Bq	<0,1			
	Type S			5 µm	3	26,28/5,99		690 Bq	<0,1			
					Type S	1 µm	1,88	9,16/5,99		770 Bq	<0,1	
	Cas 4	06/10/2014	Co-60	Ingestion	F=0,05	13,59	192,42/9,49		3990 Bq	<0,1		
					F=0,1	7	106,94/9,49		3240 Bq	<0,1		
					Type S	5 µm	2,5	24,81/9,49		3260 Bq	0,06	
							Type S	1 µm	1,39	2,83/9,49		2900 Bq
Ag-110m			Ingestion	F=0,05	3,1	37,19/9,49		3040 Bq	<0,1			
				Type S	5 µm	1,51	4,34/9,49		3100 Bq	0,02		
		Type S		1 µm	1,91	12,9/9,49		2890 Bq	<0,1			
Inhalation		Type M	5 µm	1,41	3,13/9,49		2790 Bq	<0,1				
			1 µm	2,03	14,82/9,49		2770 Bq	<0,1				
		Type F	5 µm	2,44	22,36/9,49		1570 Bq	<0,1				
					1 µm	3	32,67/9,49		2010 Bq	<0,1		
Cas 5		23/08/2014	Co-60	Ingestion	F=0,05	2,77	32,96/7,81		3140 Bq	<0,1		
	F=0,1				1,89	14,52/7,81		2600 Bq	<0,1			
	Type S				5 µm	1,34	1,86/7,81		2600 Bq	0,04		
						Type S	1 µm	1,96	9,88/7,81		2100 Bq	0,06
	Ag-110m		Ingestion	F=0,05	5,5	99,24/11,07		7960 Bq	<0,1			
				Type S	5 µm	2,39	25,51/11,07		6560 Bq	<0,1		
		Type S		1 µm	1,47	4,43/11,07		5110 Bq	0,06			
	Inhalation	Type M	5 µm	2,1	18,67/11,07		5680 Bq	<0,1				
			1 µm	1,42	3,71/11,07		4830 Bq	<0,1				
		Type F	5 µm	1,27	1,95/11,07		2620 Bq	<0,1				
					1 µm	1,24	1,37/11,07		3190 Bq	<0,1		
	Cas 6	09/09/2014	Co-58	Ingestion	F=0,05	1,6	5,93/7,81		6210 Bq	<0,1		
F=0,1					1,23	1,07/7,81		5330 Bq	<0,1			
Type S					5 µm	2,67	26,08/7,81		5610 Bq	<0,1		
						Type S	1 µm	6,54	88,37/7,81		5350 Bq	<0,1
Co-60			Ingestion	F=0,05	1,27	1,34/5,99		1555 Bq	<0,1			
				F=0,1	1,3	1,93/5,99		1500 Bq	<0,1			
	Type S	5 µm		1,65	5,26/5,99		1980 Bq	<0,1				
				Type S	1 µm	2,64	19,54/5,99		2220 Bq	<0,1		
Cas 7	21/08/2014	Co-58	Ingestion	F=0,05	2,65	26,63/11,07		2150 Bq	<0,1			
				F=0,1	1,98	13,0/11,07		1600 Bq	<0,1			
				Type S	5 µm	3,66	48,46/11,07		1360 Bq	<0,1		
						Type S	1 µm	7,03	132,29/11,07		1080 Bq	<0,1
		Co-60	Ingestion	F=0,05	5,68	87,9/11,07		3950 Bq	<0,1			
				F=0,1	3,2	39,69/11,07		2900 Bq	<0,1			
Type S	5 µm			2,13	18,99/11,07		2490 Bq	<0,1				
				Type S	1 µm	3,23	54,34/11,07		1960 Bq	<0,1		
B	Cas 1	01/09/2015	Co-58	Ingestion	F=0,05	4,95	59,39/5,99		5750 Bq	<0,1		
					F=0,1	2,86	24,56/5,99		4780 Bq	<0,1		
					Type S	5 µm	1,26	1,19/5,99		5020 Bq	<0,1	
					Type S	1 µm	2,11	15,21/5,99		4920 Bq	<0,1	
	Cas 3	17/02/2015	Co-60	Ingestion	F=0,05	1,83	7,63/5,99		2820 Bq	<0,1		
					F=0,1	1,72	6,09/5,99		2730 Bq	<0,1		
					Type S	5 µm	1,35	1,95/5,99		3610 Bq	0,06	
					Type S	1 µm	1,18	0,72/5,99		4030 Bq	0,12	
	Cas 4	07/05/2014	Co-58	Ingestion	F=0,05	5,45	78,16/7,81		1890 Bq	<0,1		
					F=0,1	3,28	34,82/7,81		1270 Bq	<0,1		
					Type S	5 µm	1,57	4,76/7,81		8940 Bq	<0,1	
					Type S	1 µm	2,21	14,93/7,81		6140 Bq	<0,1	
	Cas 5	07/05/2014	Co-58	Ingestion	F=0,05	5,61	72,64/5,99		9030 Bq	<0,1		
					F=0,1	3,38	38,45/5,99		6580 Bq	<0,1		
					Type S	5 µm	1,6	5,21/5,99		5430 Bq	<0,1	
					Type S	1 µm	1,34	1,78/5,99		4050 Bq	<0,1	
	Cas 7	07/05/2014	Co-58	Ingestion	F=0,05	22,47	298,47/14,07		58800 Bq	<0,1		
					F=0,1	11,39	178,58/14,07		33900 Bq	<0,1		
					Type S	5 µm	2,61	29,04/14,07		16900 Bq	<0,1	
					Type S	1 µm	1,65	9,5/14,07		10300 Bq	<0,1	
	Cas 9	22/06/2013	Co-58	Ingestion	F=0,05	1,1	0,32/5,99		2280 Bq	<0,1		
					F=0,1	1,32	1,8/5,99		2000 Bq	<0,1		
					Type S	5 µm	2,01	10,12/5,99		2220 Bq	<0,1	
							Type S	1 µm	3,15	27,54/5,99		2000 Bq
Co-60			Ingestion	F=0,05	3,88	23,68/7,81		12500 Bq	<0,1			
				F=0,1	1,73	7,01/7,81		10100 Bq	<0,1			
	Type S	5 µm		1,73	6,34/7,81		9620 Bq	0,16				
				Type S	1 µm	2,57	25,40/7,81		7760 Bq	0,225		
Cas 10	23/06/2013	Co-58	Particule chaude	F=0,05								
				F=0,1	5,21	66,26/7,81		10800 Bq	<0,1			
		Co-60	Ingestion	F=0,05	2,78	22,6/7,81		8900 Bq	<0,1			
				F=0,1	1,99	13,21/7,81		9170 Bq	0,16			
				Type S	5 µm	3,81	56,23/7,81		8570 Bq	0,25		
				Type S	1 µm	1,18	0,56/3,84		6980 Bq	0,12		
Cas 12	03/12/2013	Co-58	Ingestion	F=0,05	15,33	172,90/7,81		5070 Bq	<0,1			
				F=0,1	8,85	109,73/7,81		4270 Bq	<0,1			
				Type S	5 µm	3,68	41,39/7,81		4580 Bq	<0,1		
				Type S	1 µm	1,7	6,25/7,81		4360 Bq	<0,1		
Cas 6	18/04/2011	Co-58	Ingestion	F=0,05	19,22	201,78/5,99		6350 Bq	<0,1			
				F=0,1	9,81	120,69/5,99		4900 Bq	<0,1			
				Type S	5 µm	3,09	29,19/5,99		4420 Bq	<0,1		
						Type S	1 µm	1,48	3,33/5,99		3880 Bq	<0,1
		Co-60	Ingestion	F=0,05	31,91	317,15/7,81		11600 Bq	<0,1			
				F=0,1	15,78	185,66/7,81		8060 Bq	<0,1			
Type S	5 µm			3,63	44,61/7,81		5700 Bq	0,1				

C	Cas 7	18/04/2011	Co-58	Ingestion	F=0,05	1 µm	1,81	7,47/7,81		4420 Bq	0,13	
					F=0,1	5 µm	6,42	82,11/5,99		6630 Bq	< 0,1	
				Type S	1 µm	3,41	33,05/5,99		5290 Bq	< 0,1		
			Co-60	Ingestion	F=0,05	5 µm	1,51	3,48/5,99		5220 Bq	< 0,1	
					F=0,1	1 µm	3,07	26,28/5,99		5110 Bq	< 0,1	
				Inhalation	F=0,05	5 µm	13	170,13/7,81		7610 Bq	< 0,1	
	Cas 12	19/03/2018	Co-60	Ingestion	F=0,05	1 µm	6,7	87,08/7,81		5980 Bq	< 0,1	
					F=0,1	5 µm	2,39	11,97/7,81		6010 Bq	0,1	
				Inhalation	F=0,05	1 µm	1,75	15,17/7,81		5800 Bq	0,17	
					Type S	5 µm	5,14	137,9/12,59		19700 Bq	< 0,1	
D	Cas 1	03/04/2013	Ag-110m	Ingestion	F=0,05	1 µm	1,39	2,93/7,81		2360 Bq	< 0,1	
					F=0,1	5 µm	2,24	14,98/7,81		2800 Bq	< 0,1	
				Inhalation	Type S	1 µm	3,35	42,77/7,81		2880 Bq	< 0,1	
					Type M	5 µm	2,43	15,27/7,81		2580 Bq	< 0,1	
					Type F	1 µm	3,46	46,05/7,81		2770 Bq	< 0,1	
					Type F	5 µm	4,17	58,57/7,81		1600 Bq	< 0,1	
	Cas 4	04/09/2013	Ag-110m	Ingestion	F=0,05	1 µm	8,4	222,13/16,92		72300 Bq	0,2	
					F=0,1	5 µm	3,41	56,74/16,92		49100 Bq	0,35	
				Inhalation	Type S	1 µm	1,58	8,19/16,92		35700 Bq	0,42	
					Type M	5 µm	2,87	39,9/16,92		41200 Bq	0,24	
E	Cas 3	01/06/2016	Ag-110m	Ingestion	F=0,05	1 µm	9,44	196,2/9,49		3930 Bq	< 0,1	
					F=0,1	5 µm	4,05	68,55/9,49		3430 Bq	< 0,1	
				Inhalation	Type S	1 µm	1,96	13,75/9,49		2930 Bq	< 0,1	
					Type M	5 µm	3,44	51,72/9,49		3010 Bq	< 0,1	
					Type F	1 µm	1,85	11,47/9,49		2790 Bq	< 0,1	
					Type F	5 µm	1,57	5,80/9,49		1560 Bq	< 0,1	
	Cas 4	21/07/2016	Co-58	Ingestion	F=0,05	1 µm	17,74	195,14/9,49		16800 Bq	< 0,1	
					F=0,1	5 µm	9,05	116,38/9,49		11700 Bq	< 0,1	
				Inhalation	Type S	1 µm	2,93	33,27/9,49		8780 Bq	< 0,1	
					Type S	5 µm	1,56	4,96/9,49		6390 Bq	< 0,1	
F	Cas 2	02/04/2014	Co-58	Ingestion	F=0,05	1 µm	16,66	364,6/14,07		29000 Bq	< 0,1	
					F=0,1	5 µm	8,87	201,37/14,07		18300 Bq	< 0,1	
				Inhalation	Type S	1 µm	2,88	36,08/14,07		11700 Bq	< 0,1	
					Type S	5 µm	2,09	13,73/14,07		8150 Bq	< 0,1	
	Cas 3	02/04/2014	Co-58	Ingestion	F=0,05	1 µm	6,69	134,45/9,49		15900 Bq	< 0,1	
					F=0,1	5 µm	3,7	62,6/9,49		11700 Bq	< 0,1	
				Inhalation	Type S	1 µm	3,47	3,89/9,49		9860 Bq	< 0,1	
					Type S	5 µm	2,11	14,86/9,49		8010 Bq	< 0,1	
	Cas 4	02/04/2014	Co-58	Ingestion	F=0,05	1 µm	12,85	247,8/9,49		13800 Bq	< 0,1	
					F=0,1	5 µm	6,85	133,36/9,49		9810 Bq	< 0,1	
				Inhalation	Type S	1 µm	2,39	22,44/9,49		7790 Bq	< 0,1	
					Type S	5 µm	1,62	5,74/9,49		6240 Bq	< 0,1	
	Cas 6	21/06/2012	Co-58	Ingestion	F=0,05	1 µm	15,3	235,7/15,51		67200 Bq	< 0,1	
					F=0,1	5 µm	7,42	116,55/15,51		40300 Bq	< 0,1	
Inhalation				Type S	1 µm	1,62	8,78/15,51		21100 Bq	0,04		
			Type S	5 µm	2,55	26,12/15,51		13400 Bq	< 0,1			
Sb 124			Ingestion	F=0,1	pas de facteurs de retenion pour cette forme physico chimique							
				Type M	1 µm	2,19	16,15/11,07		6100 Bq	0,03		
Cas 7	21/04/2015	Co-58	Ingestion	F=0,05	1 µm	4,99	116,25/11,07		13600 Bq	< 0,1		
				F=0,1	5 µm	2,87	43,38/11,07		9850 Bq	< 0,1		
			Inhalation	Type S	1 µm	1,85	9,2/11,07		8260 Bq	0,014		
		Type S		5 µm	3,1	57,14/11,07		6680 Bq	< 0,1			
		Co-60	Ingestion	F=0,05	1 µm	6,91	151,57/11,07		7880 Bq	< 0,1		
				F=0,1	5 µm	4,02	61,78/11,07		5700 Bq	< 0,1		
Inhalation	Type S		1 µm	1,63	8,96/11,07		4820 Bq	0,06				
G	Cas 5	02/11/2016	Co-60	Ingestion	F=0,05	1 µm	14,27	303,24/14,07		14100 Bq	< 0,1	
					F=0,1	5 µm	7,47	168,7/14,07		9380 Bq	< 0,1	
				Inhalation	Type S	1 µm	2,28	27,7/14,07		6420 Bq	0,11	
					Type S	5 µm	1,36	3,73/14,07		4320 Bq	0,125	
	Cas 6	10/08/2016	Co-58	Ingestion	F=0,05	1 µm	14,01	268,96/7,81		3050 Bq	< 0,1	
					F=0,1	5 µm	8,09	163/7,81		2280 Bq	< 0,1	
				Inhalation	Type S	1 µm	3,36	49,36/7,81		2020 Bq	< 0,1	
			Type S		5 µm	1,65	5,94/7,81		1750 Bq	< 0,1		
			Co-60	Ingestion	F=0,05	1 µm	64,55	685/12,59		12400 Bq	< 0,1	
					F=0,1	5 µm	32,7	460,8/12,59		7850 Bq	< 0,1	
Inhalation	Type S	1 µm		6,85	124,6/12,59		4560 Bq	< 0,1				
Cas 7	18/05/2017	Ag-110	Ingestion	F=0,05	1 µm	5,45	70/11,07		13100 Bq	< 0,1		
				F=0,1	5 µm	2,07	23,46/11,07		9390 Bq	0,07		
			Inhalation	Type M	1 µm	2,19	26,57/11,07		7060 Bq	< 0,1		
				Type M	5 µm	1,94	19,81/11,07		8080 Bq	< 0,1		
				Type F	1 µm	2,28	26,99/11,07		6690 Bq	< 0,1		
				Type F	5 µm	2,58	29,27/11,07		3710 Bq	< 0,1		
		Cas 9	18/05/2017	Ag-110	Ingestion	F=0,05	1 µm	3,17	38,94/11,07		4560 Bq	< 0,1
						F=0,1	5 µm	5,8	92,85/11,07		8870 Bq	< 0,1
					Inhalation	Type S	1 µm	2,74	24,65/11,07		6500 Bq	< 0,1
						Type S	5 µm	1,87	10,89/11,07		4930 Bq	0,06
						Type M	1 µm	2,33	17,69/11,07		5600 Bq	< 0,1
						Type F	5 µm	1,86	11,08/11,07		4660 Bq	< 0,1
Cas 10	18/05/2017	Ag-110	Ingestion	F=0,05	1 µm	1,79	12,96/11,07		2560 Bq	< 0,1		
				F=0,1	5 µm	2,16	19,19/11,07		3150 Bq	< 0,1		
			Inhalation	Type S	1 µm	5,01	79,4/15,51		12300 Bq	< 0,1		
				Type S	5 µm	2,07	19,35/15,51		8110 Bq	0,06		
				Type M	1 µm	1,83	19,92/15,51		5750 Bq	0,07		
				Type M	5 µm	1,75	14,74/15,51		6890 Bq	< 0,1		
Cas 8	13/05/2017	Ag-110	Ingestion	F=0,05	1 µm	1,91	20,35/15,51		5440 Bq	< 0,1		
				F=0,1	5 µm	2,16	22,72/15,51		2990 Bq	< 0,1		
			Inhalation	Type M	1 µm	2,66	32,74/15,51		3630 Bq	< 0,1		
				Type M	5 µm	5,99	99,4/12,59		9670 Bq	< 0,1		
				Type S	1 µm	2,67	27,44/12,59		6380 Bq	< 0,1		
				Type M	5 µm	1,78	13,67/12,59		4490 Bq	< 0,1		
Cas 11	13/05/2017	Ag-110	Ingestion	F=0,05	1 µm	2,33	21,21/12,59		5450 Bq	< 0,1		
				F=0,1	5 µm	1,74	12,16/12,59		4260 Bq	< 0,1		
			Inhalation	Type M	1 µm	1,62	8,04/12,59		2360 Bq	< 0,1		
				Type F	1 µm	1,62	8,49/12,59		2840 Bq	< 0,1		
				Type S	5 µm	5,94	87,26/7,81		3760 Bq	< 0,1		
				Type S	1 µm	1,75	7,41/7,81		2310 Bq	< 0,1		
Inhalation	Type M	5 µm	2,4	20,55/7,81		2580 Bq	< 0,1					



						1 µm	1,69	6,59/7,81		2180 Bq	< 0,1			
				Type F		5 µm	1,51	4,31/7,81		1190 Bq	< 0,1			
						1 µm	1,45	3,4/7,81		1460 Bq	< 0,1			
H	Cas 1	27/03/2014	Co-58	Ingestion	F=0,05		5,19	56,68/5,99		26000 Bq	< 0,1			
					F=0,1		2,64	19,67/5,99		18400 Bq	< 0,1			
			Inhalation	Type S		5 µm	1,18	0,59/5,99		14500 Bq	< 0,1			
						1 µm	2,77	27,88/5,99		11700 Bq	< 0,1			
	Cas 2	22/10/2014	Ag-110	Inhalation	Ingestion	F=0,05		6,29	91,82/14,07		13200 Bq	< 0,1		
						Type S		5 µm	2,65	26,59/14,07		8530 Bq	< 0,1	
								1 µm	1,88	12,57/14,07		5870 Bq	0,07	
						Type M		5 µm	2,29	20,27/14,07		7170 Bq	< 0,1	
								1 µm	1,86	12,05/14,07		5530 Bq	< 0,1	
						Type F		5 µm	1,8	10,64/14,07		2990 Bq	< 0,1	
						1 µm	1,8	11,8/14,07		3580 Bq	< 0,1			
	Cas 5	26/09/2014	Co-58	Ingestion	F=0,05		13,37	170,03/14,07		7830 Bq	< 0,1			
						F=0,1		6,82	91,96/14,07		6390 Bq	< 0,1		
			Inhalation	Type S		5 µm	2,27	15,93/14,07		6480 Bq	< 0,1			
						1 µm	1,15	0,38/7,81		6120 Bq	< 0,1			
	Cas 6	24/09/2014	Co-58	Ingestion	F=0,05		2,41	30,55/9,49		24000 Bq	< 0,1			
						F=0,1		1,83	9,04/9,49		16900 Bq	< 0,1		
						Type S		5 µm	3,76	68,88/9,49		12500 Bq	< 0,1	
					Co-60	Inhalation	Type S		1 µm	9,87	196,17/9,49		9820 Bq	< 0,1
									5 µm	1,25	1,1/5,99		7780 Bq	< 0,1
									F=0,1		1,54	3,9/5,99		6710 Bq
				Inhalation	Type S		5 µm	3,08	30,85/5,99		7540 Bq	0,128		
							1 µm	6	86,22/5,99		7490 Bq	0,22		
	Cas 8	16/05/2015	Co-58	Ingestion	F=0,05		2,16	18,16/7,81		5630 Bq	< 0,1			
					F=0,1		1,86	9,85/7,81		5100 Bq	< 0,1			
		Inhalation	Type S		5 µm	1,49	3,96/7,81		6060 Bq	< 0,1				
						1 µm	1,9	11,07/7,81		6110 Bq	< 0,1			
Cas 12	22/05/2015	Ag-110	Ingestion	F=0,05		1,81	7,32/5,99		11100 Bq	< 0,1				
					Type S		5 µm	1,16	0,55/5,99		7280 Bq	< 0,1		
						Inhalation	Type M		1 µm	1,17	0,52/5,99		4960 Bq	< 0,1
									5 µm	1,14	0,39/5,99		6140 Bq	< 0,1
							Type F		1 µm	1,18	0,56/5,99		4650 Bq	< 0,1
										5 µm	1,19	0,66/5,99		2470 Bq
					1 µm	1,21	0,78/5,99		2940 Bq	< 0,1				
I	Cas 1	12/09/2013	Co-58	Ingestion	F=0,05		50,55	356,35/9,49		21500 Bq	< 0,1			
						F=0,1		25,22	240,61/9,49		14900 Bq	< 0,1		
			Inhalation	Type S		5 µm	6,4	87,01/9,49		10700 Bq	< 0,1			
						1 µm	2,42	20,46/9,49		7840 Bq	0,02			
			Co-60	Ingestion	F=0,05		58,36	377,66/9,49		11800 Bq	< 0,1			
						F=0,1		30,57	265,29/9,49		8170 Bq	< 0,1		
				Inhalation	Type S		5 µm	7,64	104,02/9,49		5870 Bq	0,1		
							1 µm	2,88	28,39/9,49		4230 Bq	0,12		
	Cas 2	17/04/2015	Co-60	Ingestion	F=0,05		13,51	218,9/11,07		10800 Bq	< 0,1			
						F=0,1		8,93	137,5/11,07		7880 Bq	< 0,1		
			Inhalation	Type S		5 µm	4,31	55,9/11,07		6540 Bq	0,11			
							1 µm	1,98	18,8/11,07		4930 Bq	0,14		
	Cas 3	29/12/2016	Co-60	Ingestion	F=0,05		24,62	422,6/15,51		62700 Bq	0,16			
						F=0,1		13,57	248,3/15,51		40000 Bq	0,14		
						Inhalation	Type S		5 µm	3,56	42,21/15,51		23700 Bq	0,4
									1 µm + grattons	2,62	32,45/15,51		15700 Bq	0,46
							2,04	12,53/12,59		15400 Bq	0,45			
	Cas 4	29/12/2016	Co-60	Ingestion	F=0,05		30,4	491,9/11,07		27500 Bq	< 0,1			
						F=0,1		14,88	304,1/11,07		18100 Bq	< 0,1		
			Inhalation	Type S		5 µm	3,42	51,56/11,07		10900 Bq	0,19			
							1 µm	1,48	4,92/11,07		8010 Bq	0,23		
							1,48	4,59/7,81		8220 Bq	0,23			
	Cas 5	29/12/2016	Co-60	Ingestion	F=0,05		24,8	413,7/11,07		15000 Bq	< 0,1			
						F=0,1		12,65	248/11,07		11000 Bq	< 0,1		
					Inhalation	Type S		5 µm	3,01	41/11,07		8410 Bq	0,14	
									1 µm + grattons	1,93	13,53/11,07		6660 Bq	0,19
						1,62	5,63/9,49		6180 Bq	0,18				
Cas 6	29/12/2016	Co-60	Ingestion	F=0,05		82,78	495/9,49		18000 Bq	< 0,1				
					F=0,1		41,91	347,6/9,49		12100 Bq	< 0,1			
					Inhalation	Type S		5 µm	9,26	120,8/9,49		7710 Bq	0,13	
									1 µm	3,55	35,5/9,49		5420 Bq	0,16
						1,7	6,74/7,81		6530 Bq	0,19				
Cas 1	05/07/2016	Co-58	Ingestion	F=0,05		12,5	151,35/7,81		2740 Bq	< 0,1				
					F=0,1		7,54	92,92/7,81		2310 Bq	< 0,1			
					Type S		5 µm	3,29	31,12/7,81		2480 Bq	< 0,1		
				Co-60	Ingestion	F=0,05		2,16	13,06/7,81		2360 Bq	< 0,06		
							F=0,1		3,91	49,14/7,81		4800 Bq	< 0,1	
									2,27	17,56/7,81		4090 Bq	< 0,1	
			Inhalation	Type S		5 µm	1,13	0,34/7,81		4430 Bq	0,075			
						1 µm	2,49	19,31/7,81		4250 Bq	0,12			
Cas 3	12/05/2014	Co-60	Ingestion	F=0,05		2,22	16,73/7,81		8770 Bq	< 0,1				
					F=0,1		1,99	11,02/7,81		8060 Bq	< 0,1			
		Inhalation	Type S		5 µm	1,57	6,64/7,81		9630 Bq	0,16				
						1 µm	2,29	15,99/7,81		9590 Bq	0,28			
Cas 2	28/09/2011	Cs-137	Ingestion	F=1		1,34	1,9/5,99		2670 Bq	< 0,1				
					Type F		5 µm	1,06	0,1/5,99		4970 Bq	< 0,1		
						1 µm	1,14	0,43/5,99		7140 Bq	< 0,1			
Cas 4	17/05/2011	Co-60	Particule chaude	F=1		1,39	1,38/5,99		2010 Bq	< 0,1				
					Type F		5 µm	1,15	0,45/5,99		3820 Bq	< 0,1		
						1 µm	1,16	0,51/5,99		5460 Bq	< 0,1			
Cas 1	14/01/2010	Co-58	Ingestion	F=0,05		5,39	74,31/7,81		60000 Bq	< 0,1				
					F=0,1		2,89	31,35/7,81		42600 Bq	< 0,1			
					Type S		5 µm	1,49	3,67/7,81		34100 Bq	0,06		
							1 µm	2,24	18,63/7,81		25300 Bq	< 0,1		
					Inhalation	Type S		5 µm	6,11	85,6/7,81		15700 Bq	< 0,1	
									5 µm	2,39	20,78/7,81		12900 Bq	< 0,1
				Ag-110m	Inhalation	Type S		1 µm	1,18	0,6/7,81		10500 Bq	0,13	
								5 µm	1,99	13,53/7,81		11200 Bq	0,1	
							Type M		1 µm	1,14	0,40/7,81		10000 Bq	< 0,1
									5 µm	1,25	1,22/7,81		5540 Bq	< 0,1
							Type F		1 µm	1,53	4,58/7,81		6940 Bq	< 0,1
									3,19	31,08/9,49		15300 Bq	< 0,1	
	Co-58	Ingestion	F=0,05		1,94	11,05/9,49		10100 Bq	< 0,1					
					F=0,1		2,9	39,9/9,49		7040 Bq	< 0,1			
			Type S		5 µm	7,77	122,03/9,49		5020 Bq	< 0,1				
						1 µm	7,77							

K	Cas 17	14/01/2010	Ag-110m	Ingestion	F=0,05		4,67	66,67/9,49		5900 Bq	< 0,1		
					Type S		5 µm	1,7	7,79/9,49		4410 Bq	< 0,1	
				Inhalation	F=0,05		1 µm	1,37	2,82/9,49		3420 Bq	< 0,1	
					Type M		5 µm	1,44	3,43/9,49		3810 Bq	< 0,1	
					F=0,05		1 µm	1,45	3,97/9,49		3240 Bq	< 0,1	
					Type F		5 µm	1,75	9,14/9,49		1790 Bq	< 0,1	
	Cas 18	14/01/2010	Co-58	Ingestion	F=0,05		7,66	120,18/9,49		13700 Bq	< 0,1		
					F=0,1		3,9	51,55/9,49		9050 Bq	< 0,1		
				Inhalation	F=0,05		5 µm	1,34	2,31/9,49		6330 Bq	< 0,1	
					Type S		1 µm	2,5	22,26/9,49		4510 Bq	< 0,1	
					F=0,05		5 µm	2,74	28,84/9,49		4960 Bq	< 0,1	
					Type S		1 µm	1,37	2,42/9,49		3850 Bq	< 0,1	
Cas 21	07/10/2016	Co-60	Ingestion	F=0,05		7,27	159,51/12,59		6790 Bq	< 0,1			
				F=0,1		3,88	64,95/12,59		4520 Bq	< 0,1			
			Inhalation	F=0,05		5 µm	1,69	7,15/12,59		3240 Bq	0,06		
				Type S		1 µm	3,22	39,08/12,59		2290 Bq	0,1		
				F=0,05		5 µm	3,11	42,62/12,59		7030 Bq	< 0,1		
				Type S		1 µm	1,69	7,5/12,59		5360 Bq	0,04		
Cas 22	28/09/2016	Co-60	Ingestion	F=0,05		2,96	31,55/12,59		4120 Bq	< 0,1			
				F=0,1		1,69	8,93/12,59		4620 Bq	< 0,1			
			Inhalation	F=0,05		5 µm	3,12	34,42/12,59		3900 Bq	< 0,1		
				Type M		1 µm	3,68	44,69/12,59		2140 Bq	< 0,1		
				F=0,05		5 µm	2,29	19,92/9,49		4290 Bq	< 0,1		
				Type F		1 µm	4,54	60,62/12,59		2630 Bq	< 0,1		
L	Cas 2	07/03/2012	Ag-110m	Ingestion	F=0,05		6,51	97,33/9,49		6290 Bq	< 0,1		
					F=0,1		2,48	24,49/9,49		6150 Bq	< 0,1		
				Inhalation	F=0,05		5 µm	1,47	4,52/9,49		5600 Bq	0,1	
					Type M		5 µm	2,11	16,71/9,49		5490 Bq	< 0,1	
					F=0,05		1 µm	1,41	4,3/9,49		5350 Bq	< 0,1	
					Type F		5 µm	1,49	4,83/9,49		3030 Bq	< 0,1	
	Cas 4	01/09/2008	Co-60	Ingestion	F=0,05		6,09	92,9/9,49		27400 Bq	0,1		
					F=0,1		6,5	87,65/9,49		22600 Bq	0,1		
				Inhalation	F=0,05		5 µm	8,34	136,65/9,49		23100 Bq	0,39	
					Type S		1 µm	16,8	249,84/9,49		20600 Bq	0,6	
					F=0,05		5 µm + gratton	1,21	0,93/5,99		12800 Bq	0,12	
					Type S		1 µm + gratton	1,28	1,59/5,99		9060 Bq	0,26	
M	Cas 1	20/05/2008	Co-60	Ingestion	F=0,05		17,65	259/19,68		95400 Bq	0,24		
					F=0,1		9,41	169/19,68		57700 Bq	0,2		
				Inhalation	F=0,05		5 µm	9,97	218,45/19,68		29300 Bq	0,5	
					Type S		1 µm	17,95	432,41/19,68		19100 Bq	0,55	
					F=0,05		5 µm + gratton	2,2	22,17/16,92		22200 Bq	0,38	
					Type S		1 µm + gratton	1,55	7,58/16,92		12700 Bq	0,37	
	Cas 2	20/05/2008	Co-60	Ingestion	F=0,05		11,01	311/19,68		66900 Bq	0,17		
					F=0,1		5,87	145,8/19,68		40500 Bq	0,14		
				Inhalation	F=0,05		5 µm	1,96	23,55/19,68		20700 Bq	0,35	
					Type S		1 µm	5,16	122,7/19,68		13500 Bq	0,39	
					F=0,05		5 µm + gratton	1,46	6,86/16,92		19000 Bq	0,12	
					Type S		1 µm + gratton	1,65	8,02/16,92		10900 Bq	0,315	
Cas 13	03/10/2009	Co-58	Ingestion	F=0,05		8,15	163,67/11,07		114000 Bq	0,1			
				F=0,1		4,25	74,6/11,07		72300 Bq	< 0,1			
			Inhalation	F=0,05		5 µm	1,58	5,25/11,07		45400 Bq	0,08		
				Type S		1 µm	1,93	18,5/11,07		30400 Bq	< 0,1		
				F=0,05		5 µm	10,75	227,85/11,07		31000 Bq	0,1		
				Type S		1 µm	6,2	114,77/11,07		20000 Bq	0,1		
	Cas 22	09/10/2012	Co-58	Ingestion	F=0,05		5,22	74,9/5,99		4170 Bq	< 0,1		
					F=0,1		3,11	34,63/5,99		3470 Bq	< 0,1		
				Inhalation	F=0,05		5 µm	1,36	2,09/5,99		3840 Bq	< 0,1	
					Type S		1 µm	2	9,99/5,99		3570 Bq	< 0,1	
					F=0,05		5 µm	10,96	124,27/5,99		6040 Bq	< 0,1	
					Type S		1 µm	5,87	67,03/5,99		4730 Bq	< 0,1	
Cas 25	22/04/2013	Co-58	Ingestion	F=0,05		2,21	13,06/5,99		4530 Bq	< 0,1			
				F=0,1		1,12	0,31/5,99		4110 Bq	< 0,1			
			Inhalation	F=0,05		5 µm	2,73	30,77/7,81		5030 Bq	< 0,1		
				Type S		1 µm	2,46	20,62/7,81		4560 Bq	< 0,1		
				F=0,05		5 µm	2,07	11,02/7,81		5410 Bq	< 0,1		
				Type S		1 µm	2,11	16,07/7,81		5460 Bq	< 0,1		
	Cas 31	14/03/2014	Co-58	Ingestion	F=0,05		19,59	233,27/5,99		14100 Bq	< 0,1		
					F=0,1		10	137,59/5,99		9140 Bq	< 0,1		
				Inhalation	F=0,05		5 µm	3,32	33,47/5,99		6080 Bq	< 0,1	
					Type S		1 µm	1,31	1,86/5,99		4590 Bq	< 0,1	
					F=0,05		5 µm	4,97	55,62/11,07		15000 Bq	< 0,1	
					Type S		1 µm	2,49	20,75/11,07		10700 Bq	< 0,1	
Cas 34	19/02/2015	Co-60	Ingestion	F=0,05		4,97	57,77/9,49		33400 Bq	< 0,1			
				F=0,1		2,64	24,17/9,49		24100 Bq	< 0,1			
			Inhalation	F=0,05		5 µm	1,81	9,8/9,49		19200 Bq	0,053		
				Type S		1 µm	3,36	38,28/9,49		14800 Bq	< 0,1		
				F=0,05		5 µm	4,97	55,62/11,07		15000 Bq	< 0,1		
				Type S		1 µm	2,13	10,16/11,07		8460 Bq	0,134		
N	Cas 1	06/06/2016	Co-58	Ingestion	F=0,05		15,26	393,4/19,68		60300 Bq	< 0,1		
					F=0,1		7,74	197,79/19,68		37300 Bq	< 0,1		
				Inhalation	F=0,05		5 µm	2,4	28,9/19,68		21400 Bq	< 0,1	
					Type S		1 µm	5,36	83,7/19,68		14500 Bq	< 0,1	
					F=0,05		5 µm + gratton	1,78	11,01/18,31		12900 Bq	0,03	
					Type S		1 µm + gratton	3,4	62,44/15,51		5370 Bq	0,03	
	Cas 1	06/06/2016	Sb 124	Ingestion	pas de facteurs de retention pour ce modèle d'incorporation								
					Type M		5 µm	3,4	62,44/15,51		5370 Bq	0,03	
				Inhalation	pas de facteurs de retention pour cette granulométrie								
					F=0,05		5 µm	22,4	567,2/18,3		25900 Bq	< 0,1	
					F=0,1		1 µm	11,5	316,77/18,3		15600 Bq	< 0,1	
					Type S		5 µm	3,07	40,14/18,31		8160 Bq	0,14	
Cas 1	06/06/2016	Zr-Nb 95	Ingestion	F=0,002		188	1846/18,3		124500 Bq	0,1			
				F=0,002		3,11	56,78/18,3		13300 Bq	< 0,1			
			Inhalation	F=0,002		5 µm	4,51	71,04/18,3		8390 Bq	< 0,1		
				Type M		1 µm	1,78	13,58/18,3		7500 Bq	0,03		
				F=0,002		5 µm	1,45	8,0/16,9		5020 Bq	0,15		
				Type M		1 µm	1,45	8,0/16,9		5020 Bq	0,15		

Nombre de cas étudiés 66

Nombre Conts entraînant dose > 0,1mSv 34 52%

Légende de couleur :

*Vert : test RBP et  $Khi^2$  validé*

*Orange : test RBP validé et  $Khi^2$  non validé*

*Rouge : test RBP et  $Khi^2$  non validé*

*Jaune : modèle d'incorporation retenu*

*Violet : cas de contamination « groupés », c'est à dire contamination de plusieurs salariés sur un même chantier, à la même date.*

Annexe 2 : Exemple de compte-rendu d'examen ATP

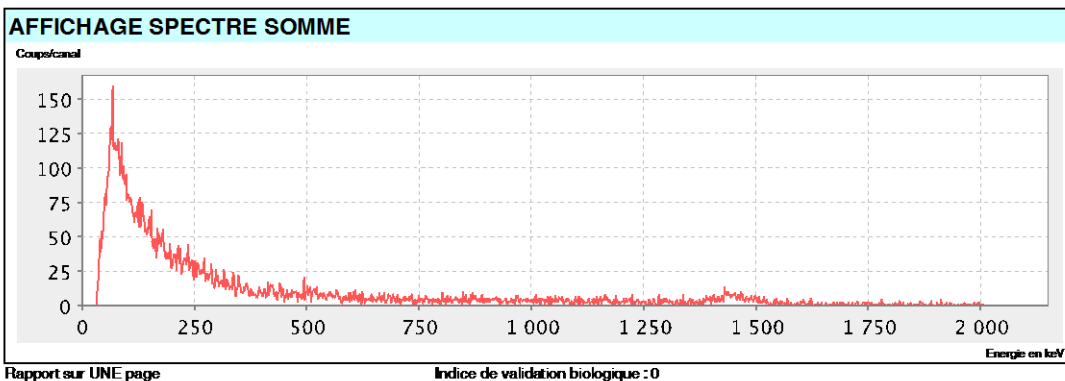


EDF Direction Production Ingénierie - Division Production  
 Unité de Mesure Anthropogammamétrie - C.N.P.E DE PALUEL  
**MATHIEU SAILLY** - RNIPP 1901159122105  
 Compte rendu d'examen 29/01/2016 à 16h52mn

DONNEES ADMINISTRATIVES	
<b>Entreprise employeur :</b> CNPE DE PALUEL ELECTRICITE DE FRANCE 55208131715479	<b>Entreprise titulaire :</b> CNPE DE PALUEL ELECTRICITE DE FRANCE 55208131715479
<b>Médecin du travail :</b> Laetitia ROLLIN CHU Pavillon Aubette - 76000 - ROUEN	

DONNEES DE LA MESURE ANTHROGAMMAMETRIQUE	
<b>Motif d'examen :</b> Systématique entrée	<b>Identifiant de l'examen :</b> 1460903
<b>Nature d'incident :</b>	<b>Appareil :</b> PAL Corps Entier 2
<b>Modalités de la mesure :</b> Tenue de ville	

RESULTATS DE LA MESURE ANTHROGAMMAMETRIQUE			
<b>Résultat</b> < Limite de détection	<b>Nature du radionucléide</b>	<b>Activité en Bq</b>	<b>Incertitude en %</b>
Mesure du corps entier par méthode interne par spectrométrie gamma sur détecteur à Iodure de Sodium  La Limite de Détection correspond à une activité de l'ordre de 300 Bq Le Seuil d'Analyse correspond à une activité de l'ordre de 800 Bq  Activité exprimée en notation scientifique : 2 E+03 = 2 000 Bq			
<b>CONCLUSION Absence de contamination</b> La décision d'actions complémentaires est fonction de la nature des radionucléides détectés et des circonstances de l'incident. L'item ci-dessous est renseigné uniquement en cas de contamination interne <b>Date de la contamination interne :</b> Entre le et le			
<b>Commentaires :</b> (le commentaire est hors périmètre d'accréditation)			Médecin EDF à contacter Dr
<b>OPERATEUR</b> Mme LEBOURG	<b>VALIDATION ANALYTIQUE</b> Mme LEBOURG	<b>VALIDATION TECHNIQUE</b> Dr COGNET	<b>VALIDATION BIOLOGIQUE</b> Dr COGNET



ACCREDITATION N°1-1991  
 PORTEE DISPONIBLE SUR  
[WWW.COFRAC.FR](http://WWW.COFRAC.FR)

C.N.P.E DE PALUEL  
 Service de Santé au Travail  
 BP 48  
 76450 CANY BARVILLE

Tél : 02 35 57 67 80  
 Fax : 02 35 57 16 36

## Liste des figures

FIGURE 1 : CARTE DE FRANCE DES DIFFERENTS PALIERS DE REACTEURS A EAU SOUS PRESSION (REP)(1)(SOURCE ASN).....	17
FIGURE 2 : SCHEMA D'UNE CENTRALE A EAU SOUS PRESSION (SOURCE EDF).....	18
FIGURE 3 : SCHEMA DU CIRCUIT PRIMAIRE D'UNE CENTRALE REP 1300 MWE (SOURCE ASN).....	19
FIGURE 4 : SCHEMA DU GENERATEUR DE VAPEUR (SOURCE ASN).....	20
FIGURE 5 : SCHEMA ILLUSTRANT LES MECANISMES DE CONTAMINATION DU CIRCUIT PRIMAIRE (2).....	23
FIGURE 6 : SCHEMA DE DESINTEGRATION DU COBALT 60.....	24
FIGURE 7 : LOCALISATION DES PRODUITS DE CORROSION EN SURFACE DU CIRCUIT PRIMAIRE (2).....	27
FIGURE 8 : SCHEMA DU SYSTEME RCV (8).....	29
FIGURE 9 : PHOTO D'UNE CARTOUCHE FILTRANTE RCV (8).....	29
FIGURE 10 : EVOLUTION DE L'ACTIVITE VOLUMIQUE EN Co58 DU FLUIDE PRIMAIRE AU COURS DES DIFFERENTES PHASES DE LA MISE A L'ARRET A FROID (9).....	30
FIGURE 11 : EFFETS DES RAYONNEMENTS IONISANTS SUR LA CELLULE ET L'ORGANISME (EFFETS STOCHASTIQUES VS EFFETS DETERMINISTES).....	34
FIGURE 12 : ILLUSTRATION DU NOMBRE DE CASSURE DOUBLE BRINS DE L'ADN PAR CELLULE EN FONCTION DE LA DOSE (10).....	35
FIGURE 13 : TEMPS DE REPARATION DE L'ADN EN FONCTION DE LA DOSE DE RI (15).....	36
FIGURE 14 : SURVIE CELLULAIRE SELON LES GROUPES DE RADIOSENSIBILITE (16).....	37
FIGURE 15 : RELATION DOSE-EFFETS DES RAYONNEMENTS IONISANTS.....	37
FIGURE 16 : ORGANISATION DE LA ZONE CONTROLEE AVEC LES PORTIQUES DE CONTROLE C1, C2 ET C3 ET L'ATP.....	40
FIGURE 17 : PORTIQUE DE SORTIE DE ZONE CONTROLEE C2.....	41
FIGURE 18 : ENCEINTE DE MESURE CORPS ENTIER (SOURCE EDF).....	42
FIGURE 19 : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN DETECTEUR A SCINTILLATIONS.....	42
FIGURE 20 : SPECTRES HAUT ET BAS DE MESURE ANTHROPOGAMMAMETRIQUE.....	44
FIGURE 21 : SPECTRE SOMME DE MESURE ANTHROPOGAMMAMETRIQUE.....	44
FIGURE 22 : SPECTRE ATP CORPS ENTIER ILLUSTRANT UNE CONTAMINATION AU COBALT 60.....	45
FIGURE 23 : TABLE DES PRINCIPAUX RADIONUCLEIDES RENCONTRES LORS D'UNE CONTAMINATION INTERNE POSITIONNES SELON LEUR(S) ENERGIE(S) D'EMISSION GAMMA.....	45
FIGURE 24 : EXEMPLE DE SPECTRE DECONVOLUE (CAS N°1 CNPE N).....	46
FIGURE 25 : MODELES BIOCINETIQUES DES DIFFERENTES VOIES D'INCORPORATION DES RADIONUCLEIDES (SOURCE CIPR(21)).....	48
FIGURE 26 : PROCESSUS PERMETTANT D'OBTENIR L'ESTIMATION DE LA DOSE EFFICACE ENGAGEE.....	49
FIGURE 27 : REPRESENTATION DES DIFFERENTES REGIONS DU MODELE RESPIRATOIRE DE LA CIPR.....	50
FIGURE 28 : AEROSOLS VU EN MICROSCOPIE ELECTRONIQUE.....	50
FIGURE 29 : PROCESSUS REGISSANT LE COMPORTEMENT DES AEROSOLS.....	51
FIGURE 30 : DEPOT REGIONAL DES AEROSOLS INHALES CHEZ LE TRAVAILLEUR DE REFERENCE (EN POURCENTAGE DE L'ACTIVITE INHALEE)(21).....	52
FIGURE 31 : MODELISATION DU TRANSPORT DES PARTICULES PAR EPURATION MUCO-CILIAIRE ET DRAINAGE LYMPHATIQUE (24).....	52
FIGURE 32 : MECANISME D'EPURATION DES VOIES RESPIRATOIRES (26).....	53
FIGURE 33 : MODELE GASTRO-INTESTINAL DECRIT PAR LA CIPR(25).....	54
FIGURE 34 : VALEURS DU F <sub>1</sub> SELON LES RADIOELEMENTS DEFINIS PAR LA CIPR.....	54
FIGURE 35 : EVOLUTION DE L'ACTIVITE MESUREE POUR 1BQ DE COBALT 60 INCORPOREE (TYPES S) SELON LE MODELE BIOCINETIQUE AU COURS DES DIX PREMIERS JOURS (DONNEES CIPR(21)).....	55
FIGURE 36 : MESURES DES RECUEILS URINAIRES PAR SPECTROMETRIE $\gamma$ -X.....	56
FIGURE 37 : PROTOCOLE DE REALISATION DES EXAMENS RADIOTOXICOLOGIQUES AU LBM D'EDF ET INDICATION SUR LA DUREE DES ETAPES SUCCESSIVES.....	57
FIGURE 38 : FRACTION D'ACTIVITE INCORPOREE ET EXCRETEE DE COBALT 60 EXPRIMEE EN BECQUEREL JUSQU'A UN AN APRES L'INCORPORATION (MODELE INHALATION 5 $\mu$ M TYPE S)(21).....	58
FIGURE 39 : BILAN DES EXPOSITIONS INTERNES SOURCE IRSN (30).....	59

FIGURE 40 : PROTOCOLE DE PRISE EN CHARGE D'UNE CONTAMINATION EN CNPE .....	61
FIGURE 41 : CONTROLEUR A MAIN COMO 170E .....	62
FIGURE 42 : VALEUR ET REPRESENTATION GRAPHIQUE DU TEST RBP POUR LE MODELE INHALATION 1 $\mu$ M CORRESPONDANT AU CAS N°4 CNPE I .....	66
FIGURE 43 : VALEUR ET REPRESENTATION GRAPHIQUE DU TEST RBP POUR LE MODELE INHALATION 5 $\mu$ M CORRESPONDANT AU CAS N°4 CNPE I .....	67
FIGURE 44 : VALEUR ET REPRESENTATION GRAPHIQUE DU TEST RBP POUR LE MODELE INGESTION CORRESPONDANT AU CAS N°4 CNPE I .....	67
FIGURE 45 : REPRESENTATION DU $K_{HI}^2$ CALCULE (EN NOIR : L'INCERTITUDE ASSOCIE A LA MESURE, EN VERT : L'ECART ENTRE LA MESURE REELLE ET LA VALEUR THEORIQUE PREVUE PAR LE MODELE TESTE) .....	68
FIGURE 46 : FEUILLE DE CALCUL CADOR PRESENTANT LA CINETIQUE DE DECROISSANCE ET LE TEST DU $K_{HI}^2$ POUR UN DAMA DE 5 $\mu$ M DU CAS N°4 CNPE I .....	70
FIGURE 47 : FEUILLE DE CALCUL CADOR PRESENTANT LA CINETIQUE DE DECROISSANCE ET LE TEST DU $K_{HI}^2$ POUR UN DAMA D'1 $\mu$ M DU CAS N°4 CNPE I .....	70
FIGURE 48 : LOGIGRAMME PRESENTANT LES CAS ETUDIES .....	73
FIGURE 49 : DIAGRAMME PRESENTANT LES DIFFERENTS MODES D'INCORPORATION OBSERVES ET LEUR FREQUENCE D'APRES L'ANALYSE DES EXAMENS ATP .....	75
FIGURE 50 : FEUILLE DE CALCUL CADOR PRESENTANT LA CINETIQUE DE DECROISSANCE DU Co-60 ET LE TEST $K_{HI}^2$ DU CAS N°7 CNPE F .....	77
FIGURE 51 : FEUILLE DE CALCUL CADOR PRESENTANT LA CINETIQUE DE DECROISSANCE DU Co-58 ET LE TEST $K_{HI}^2$ DU CAS N°7 CNPE F .....	78
FIGURE 52 : FEUILLE DE CALCUL CADOR PRESENTANT LA CINETIQUE DE DECROISSANCE DU Co-60 ET LE TEST $K_{HI}^2$ DU CAS N°21 CNPE K .....	79
FIGURE 53 : FEUILLE DE CALCUL CADOR PRESENTANT LA CINETIQUE DE DECROISSANCE DE L'AG-110M ET LE TEST $K_{HI}^2$ DU CAS N°21 CNPE K .....	79
FIGURE 54 : FEUILLE DE CALCUL CADOR PRESENTANT LA CINETIQUE DE DECROISSANCE DU Co-60 ET LE TEST $K_{HI}^2$ DU CAS N°5 CNPE G .....	80
FIGURE 55 : FEUILLE DE CALCUL CADOR PRESENTANT LA CINETIQUE DE DECROISSANCE DU Co-58 ET LE TEST $K_{HI}^2$ DU CAS N°7 CNPE B .....	81
FIGURE 56 : FEUILLE DE CALCUL CADOR PRESENTANT LA CINETIQUE DE DECROISSANCE DE L'AG-110M ET LE TEST $K_{HI}^2$ DU CAS N°4 CNPE D .....	82
FIGURE 57 : FEUILLE DE CALCUL CADOR PRESENTANT LA CINETIQUE DE DECROISSANCE DU Co-60 ET LE TEST $K_{HI}^2$ DU CAS N°1 CNPE M .....	84
FIGURE 58 : FEUILLE DE CALCUL CADOR PRESENTANT LA CINETIQUE DE DECROISSANCE DU Co-58 ET LE TEST $K_{HI}^2$ DU CAS N°6 CNPE H .....	85
FIGURE 59 : FEUILLE DE CALCUL CADOR PRESENTANT LA CINETIQUE DE DECROISSANCE DU Co-60 ET LE TEST $K_{HI}^2$ DU CAS N°6 CNPE H .....	86
FIGURE 60 : CINETIQUE DE DECROISSANCE DU CAS N°1 CNPE D AVEC UNE HYPOTHESE D'INCORPORATION PAR INGESTION ET REPRESENTATION DE LA LD EN BLEU .....	91
FIGURE 61 : CINETIQUE DE DECROISSANCE DU CAS N°1 CNPE D AVEC UNE HYPOTHESE D'INCORPORATION PAR INHALATION ET REPRESENTATION DE LA LD EN BLEU .....	91
FIGURE 62 : ANALYSE DE LA CINETIQUE DE DECROISSANCE DU Co-60 DU CAS N°6 CNPE G .....	93
FIGURE 63 : FEUILLE DE CALCUL CADOR PRESENTANT LA CINETIQUE DE DECROISSANCE DE L'AG-110M ET LE TEST $K_{HI}^2$ DU CAS N°10 CNPE G POUR UNE GRANULOMETRIE DE 5 $\mu$ M .....	94
FIGURE 64 : FEUILLE DE CALCUL CADOR PRESENTANT LA CINETIQUE DE DECROISSANCE DE L'AG-110M ET LE TEST $K_{HI}^2$ DU CAS N°10 CNPE G POUR UNE GRANULOMETRIE DE 1 $\mu$ M .....	94
FIGURE 65 : CARACTERISATION EXPERIMENTALE DE LA GRANULOMETRIE DES AEROSOLS EN CNPE AU COURS DES DIFFERENTES PHASES DE L'ARRET DE TRANCHE(40) .....	95
FIGURE 66 : CARACTERISATION EXPERIMENTALE DE LA GRANULOMETRIE DES AEROSOLS EN CNPE PAR RADIOELEMENTS AU COURS DES DIFFERENTES PHASES DE L'ARRET DE TRANCHE (40). .....	95

FIGURE 67 : ALGORITHME DECISIONNEL EN CAS DE CONTAMINATION INTERNE .....	97
FIGURE 68 : CINETIQUES D'EXCRETION DES EXAMENS DE SELLES DEFINIES PAR LA CIPR POUR 1 BQ DE COBALT 60 INCORPORE .....	98
FIGURE 69 : CINETIQUES D'EXCRETION DES EXAMENS D'URINES DEFINIES PAR LA CIPR POUR 1 BQ DE COBALT 60 INCORPORE.....	99
FIGURE 70 : CINETIQUES D'EXCRETION DES EXAMENS DE SELLES DEFINIES PAR LA CIPR POUR 1 BQ D'ARGENT 110M INCORPORE....	99
FIGURE 71 : CINETIQUES D'EXCRETION DES EXAMENS D'URINES DEFINIES PAR LA CIPR POUR 1 BQ D'ARGENT 110M INCORPORE..	100
FIGURE 72 : CINETIQUES D'EXCRETION DES EXAMENS DE SELLES DEFINIES PAR LA CIPR POUR 1 BQ DE COBALT 58 INCORPORE .....	100
FIGURE 73 : CINETIQUES D'EXCRETION DES EXAMENS D'URINES DEFINIES PAR LA CIPR POUR 1 BQ DE COBALT 58 INCORPORE.....	101
FIGURE 74 : FEUILLE DE CALCUL CADOR PRESENTANT LA CINETIQUE DE DECROISSANCE ATP DU Co-58 ET LE TEST KHI <sup>2</sup> DU CAS N°6 CNPE F.....	103
FIGURE 75 : FEUILLE DE CALCUL CADOR PRESENTANT LA CINETIQUE DE DECROISSANCE RTX DES SELLES DU Co-58 DU CAS N°6 CNPE F.....	103
FIGURE 76 : FEUILLE DE CALCUL CADOR COMPARANT LES CINETIQUES DE DECROISSANCE ATP ET RTX DES SELLES DU Co-58 DU CAS N°6 CNPE F .....	104
FIGURE 77 : FEUILLE DE CALCUL CADOR COMPARANT LES CINETIQUES DE DECROISSANCE ATP ET RTX DES SELLES DU Co-58 DU CAS N°15 CNPE M.....	104
FIGURE 78 : EVOLUTION DE L'ACTIVITE PULMONAIRE ET EXCRETEE AU COURS DU TEMPS ET REPRESENTATION DES LIMITES DE DETECTION POUR CHAQUE EXAMEN (CAS DU Co60) .....	106
FIGURE 79 : CINETIQUE DE DECROISSANCE DES EXAMENS RTX DES SELLES DU Co58 DU CAS N°1 CNPE G.....	107
FIGURE 80 : CINETIQUE DE DECROISSANCE DES EXAMENS RTX DES SELLES DU Co60 DU CAS N°1 CNPE G.....	107
FIGURE 81 : CINETIQUE DE DECROISSANCE DES EXAMENS RTX DES SELLES DU Zr95 DU CAS N°1 CNPE G .....	108
FIGURE 82 : COMPARAISON DES CINETIQUES DE DECROISSANCE DES EXAMENS ATP (ROUGE) ET RTX (MARRON) DU Co58 DU CAS N°1 CNPE G.....	108
FIGURE 83 : COMPARAISON DES CINETIQUES DE DECROISSANCE DES EXAMENS ATP (ROUGE) ET RTX (MARRON) DU Co60 DU CAS N°1 CNPE G.....	109
FIGURE 84 : COMPARAISON DES CINETIQUES DE DECROISSANCE DES EXAMENS ATP (ROUGE) ET RTX (MARRON) DU Zr95 DU CAS N°1 CNPE G.....	109

## Liste des tableaux

TABLEAU 1 : ORIGINE PRINCIPALE DES RADIONUCLÉIDES IMPLIQUÉS DANS LA CONTAMINATION DES CENTRALES REP(3).....	24
TABLEAU 2 : VALEURS RÉGLEMENTAIRES D'EXPOSITION AUX RAYONNEMENTS IONISANTS .....	39
TABLEAU 3 : VALEURS D'ACTIVITÉ INHAALÉE (EN BECQUEREL) ET MESURÉE À L'ATP A J1, EN FONCTION DES RADIONUCLÉIDES, SUSCEPTIBLES DE DONNER UNE DOSE DE 0.1 mSv .....	47
TABLEAU 4 : SUIVI ANTHROPOGAMMAMÉTRIQUE DU CAS N°4 CNPE I, CONTAMINATION INTERNE AU Co-60 .....	65
TABLEAU 5 : ACTIVITÉ INCORPORÉE CORRESPONDANT AU CAS N°4 CNPE I ESTIMÉE SELON LES DIFFÉRENTS MODÈLES D'INCORPORATION.....	65
TABLEAU 6 : MODE D'INCORPORATION RETENUS PAR RADIONUCLÉIDE ET COHÉRENCE AUX TESTS RBP ET KHI <sup>2</sup> (*CERTAINS CAS DE CONTAMINATION COMPORTENT PLUSIEURS RADIONUCLÉIDES).....	74
TABLEAU 7 : SUIVI ANTHROPOGAMMAMÉTRIQUE DU CAS N°7 CNPE F, CONTAMINATION INTERNE AU Co-58/Co-60 .....	77
TABLEAU 8 : SUIVI ANTHROPOGAMMAMÉTRIQUE DU CAS N°21 CNPE K, CONTAMINATION INTERNE AU Co-60 ET À L'AG-110M ...	79
TABLEAU 9 : SUIVI ANTHROPOGAMMAMÉTRIQUE DU CAS N°5 CNPE G, CONTAMINATION INTERNE AU Co-60 .....	80
TABLEAU 10 : SUIVI ANTHROPOGAMMAMÉTRIQUE DU CAS N°7 CNPE B, CONTAMINATION INTERNE AU Co-58 .....	81
TABLEAU 11 : SUIVI ANTHROPOGAMMAMÉTRIQUE DU CAS N°4 CNPE D, CONTAMINATION INTERNE À L'AG-110M .....	82
TABLEAU 12 : SUIVI ANTHROPOGAMMAMÉTRIQUE DU CAS N°1 CNPE M, CONTAMINATION INTERNE AU Co-60 .....	83
TABLEAU 13 : SUIVI ANTHROPOGAMMAMÉTRIQUE DU CAS N°6 CNPE H, CONTAMINATION INTERNE AU Co-60/Co-58 .....	85
TABLEAU 14 : SUIVI ANTHROPOGAMMAMÉTRIQUE DU CAS N°7 CNPE H, CONTAMINATION INTERNE AU Co-60 .....	88
TABLEAU 15 : SUIVI ANTHROPOGAMMAMÉTRIQUE DU CAS N°1 CNPE N, CONTAMINATION INTERNE AU Co-58/Co-60 .....	88
TABLEAU 16 : SUIVI ANTHROPOGAMMAMÉTRIQUE DU CAS N°2 CNPE D, CONTAMINATION INTERNE À L'AG-110M .....	89
TABLEAU 17 : SUIVI ANTHROPOGAMMAMÉTRIQUE DU CAS N°1 CNPE D, CONTAMINATION INTERNE À L'AG-110M .....	90
TABLEAU 18 : SUIVI ANTHROPOGAMMAMÉTRIQUE DU CAS N°6 CNPE G, CONTAMINATION INTERNE AU Co-60 .....	93
TABLEAU 19 : COMPARAISON DES ESTIMATIONS D'ACTIVITÉ INCORPORÉE SELON LES ANALYSES RADIOTOXICOLOGIQUES ET ANTHROPOGAMMAMÉTRIQUES .....	102



## RÉSUMÉ

**Titre : Étude de la cinétique anthropogammamétrique dans l'évaluation de la dose efficace engagée après contamination interne par radionucléides émetteurs Gamma en installation nucléaire de base.**

**Résumé :** Bien que les expositions internes en centrale nucléaire soient peu fréquentes et que l'impact dosimétrique associé soit faible, elles sont une source de préoccupation très forte pour les intervenants. Jusqu'alors, l'évaluation et l'enregistrement de la dose efficace engagée (DEE) ne se faisaient qu'à partir d'un niveau d'exposition suspecté à l'anthropogammamétrie (ATP) correspondant à une DEE de 0.5 mSv, ceci par l'analyse d'examens radiotoxicologiques (RTX) urines et selles. L'ATP ne servait alors que d'examen de suivi de la contamination interne à titre qualitatif. L'évolution réglementaire et sociétale se marque par un souhait des intervenants exposés au risque radiologique et de leur médecin du travail de pouvoir connaître le niveau de DEE à partir de 0.1 mSv tel qu'il est appliqué pour l'enregistrement des expositions externes. De plus, l'acceptation et l'observance des examens RTX par les salariés ne sont pas satisfaisantes. L'objectif de ce travail est donc de proposer une méthode d'évaluation de la DEE après exposition interne dès lors qu'elle est estimée *a minima* à 0,1 mSv, et ce, en utilisant uniquement les résultats des examens anthropogammamétriques successifs réalisés après l'évènement contaminant.

Une analyse de 149 cas de contamination interne survenus sur les sites nucléaires Français entre 2008 et 2015 a été menée en contrôle croisé, correspondant à plus de 1000 mesures corps entier. Ce travail a été réalisé conformément aux recommandations de la HAS et du guide IDEAS. 30 cas de contamination n'ont pu être analysés en raison d'un nombre insuffisant de mesures. Parmi les 119 cas restants, 21 correspondaient à l'inhalation de particules chaudes. Pour 66 cas, un modèle d'incorporation décrit par la CIPR et cohérent avec les recommandations a pu être déterminé. Pour les 32 cas restants, la détermination d'un modèle n'a pu être faite en raison d'une activité mesurée trop faible, d'un nombre de mesures insuffisantes ou d'une recontamination au cours du suivi.

A chaque fois qu'un modèle d'incorporation décrit par la Commission internationale de protection radiologique a pu être déterminé, il s'agissait dans 91% des cas d'un modèle par inhalation. Pour 46% d'entre eux, il s'agissait de composés de type S 5 $\mu$ m, pour 33% de composés type S 1 $\mu$ m et pour 12% de composés polydispersés. Par ailleurs, nous avons observé des modèles par ingestion pour 9% des cas. De manière isolée ou non, nous avons trouvé du Co<sup>58</sup> dans 55% des cas, du Co<sup>60</sup> dans 48% et de l'Ag<sup>110m</sup> dans 26%. Nous avons observé du Cs<sup>137</sup>, de Sb<sup>124</sup>, du Zn-Nb<sup>95</sup>, du Cr<sup>51</sup> et du Mn<sup>54</sup>.

En dehors des cas d'inhalation de particule chaude, l'évaluation de l'activité incorporée issue des mesures ATP était comparable à celle issue des analyses de selles dans la moitié des cas. Dans l'autre moitié, l'activité estimée à partir des examens de selles était très inférieure à celle évaluée par l'ATP.

Au final, 34/66 cas auraient entraîné une DEE supérieure à 0.1mSv mais inférieure à 0.5mSv. La cinétique des examens ATP permet d'identifier un modèle d'incorporation et ainsi d'évaluer une dose interne, dès lors que l'activité incorporée correspond à une DEE de 0.1mSv, sous réserve d'un temps de comptage et d'un nombre de mesures suffisant.

**Mots-clefs :** médecine du travail, radioprotection, centrale nucléaire, contamination interne, anthropogammamétrie, dose efficace engagée.