



Développement d'une méthodologie d'établissement des spectres d'émission gamma prenant en compte le rayonnement de freinage pour les études de radioprotection

Anissa Chouou

► To cite this version:

Anissa Chouou. Développement d'une méthodologie d'établissement des spectres d'émission gamma prenant en compte le rayonnement de freinage pour les études de radioprotection. Sciences du Vivant [q-bio]. 2020. dumas-04099035

HAL Id: dumas-04099035

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04099035>

Submitted on 16 May 2023

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.

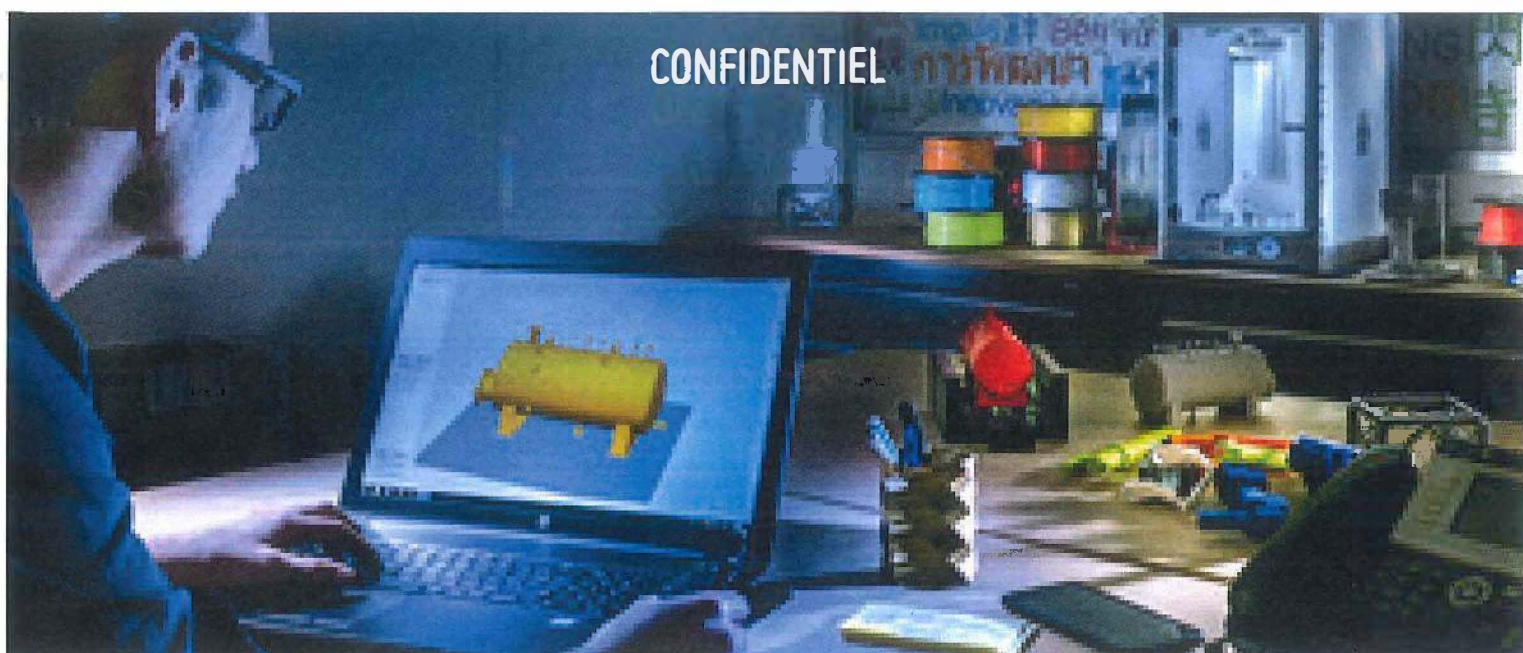


Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Mémoire Master 2

Parcours : RISQUES NUCLÉAIRES

Année Universitaire 2019-2020



Développement d'une méthodologie d'établissement des spectres d'émission gamma prenant en compte le rayonnement de freinage pour les études de radioprotection

par Anissa CHOUOU

Une alternance encadrée par :

Tuteur Entreprise : Alexis HUGUES | Tuteur Universitaire : Jocelyne BUFI



Entreprise : ORANO Projets

Adresse : RN 580 - TRA D'AUBAGNAC - 30200 Bagnols-sur-Cèze

	Nom	Date	Visa
Rédacteur / Alternant	Anissa CHOUOU	14/08/2020	
Approbateur / Tuteur Entreprise	Alexis HUGUES		

Être lancée dans la vie active, c'est découvrir un monde complémentaire à notre formation qui demande de l'organisation, de l'aide mais avant tout de l'accompagnement. C'est pourquoi les Hommes sont des acteurs majeurs de l'évolution. Évoluer soi-même, faire évoluer les autres pour permettre de construire, de renforcer et de porter une nouvelle pierre à l'édifice de l'entreprise. Donner la chance aux femmes et aux hommes, c'est finalement donner la chance à l'entreprise.

Remerciements

Mes premiers remerciements vont naturellement vers Alexis HUGUES, ingénieur en Calculs de Sûreté et également mon tuteur d'entreprise. Sa disponibilité, ses conseils, son professionnalisme mais aussi sa bonne humeur ont largement contribué au bon déroulement de ces deux années d'apprentissage au sein d'Orano Projets.

Mes remerciements vont également à Julie M. mon ancienne responsable et à Julie J. ma responsable actuelle du service Calculs Sûreté, pour m'avoir offert l'opportunité d'intégrer le service en tant qu'apprentie ingénieure. Je les remercie également pour leurs conseils et leur bienveillance tout au long de mon apprentissage.

Je tiens également à remercier l'ensemble du service Calculs Sûreté et plus particulièrement Alexandre M. et Marie L., pour m'avoir accueilli et rapidement intégré au sein de l'équipe et pour avoir su répondre à mes différentes interrogations.

À Jocelyne BUFI, ma tutrice universitaire pour sa pédagogie, son suivi et ses conseils mais également pour ses visites tout au long de mon master.

Un remerciement à toutes les personnes que j'ai pu côtoyer durant cette année d'alternance pour leur accueil et leurs conseils.

Enfin, j'adresse des remerciements à l'équipe pédagogique du Master IS-PRNT et à l'ensemble des intervenants professionnels pour la qualité de l'enseignement qu'ils ont su me transmettre.

L'information contenue dans ce mémoire est la propriété d'ORANO
La reproduction et la rediffusion sont interdites.

Sommaire

Table des illustrations.....	6
Introduction.....	7
1 Présentation de l'entreprise	9
1.1 Présentation du groupe ORANO	9
1.2 Présentation d'ORANO Projets	10
1.3 Présentation du CSP Calculs Sûreté	11
2 Sujet d'alternance.....	12
3 Eléments de calcul	13
3.1 Les moyens de calcul	14
3.1.1 MCNP4c2	14
3.1.2 MERCURAD	15
3.1.3 CASPER	15
4 Définitions	16
4.1 Rayonnement de freinage.....	16
4.2 Spectre d'émission gamma	17
5 Développement d'une méthodologie d'établissement des spectres d'émission gamma prenant en compte le rayonnement de freinage pour les études de radioprotection.....	19
5.1 Aujourd'hui... ..	19
5.2 Recensement des études	19
5.3 Méthode développée.....	21
5.4 Vérification	23
5.5 Comparaison des résultats selon les milieux	25
5.5.1 Milieux uranifères	25
5.5.2 Milieux non uranifères	28
5.6 Autre approche.....	30
5.7 Conclusion	30
6 Étude de radioprotection : Projet RECURE Na	31
6.1 Organisation du projet.....	32
6.2 Objectif.....	33
6.3 Amont de l'étude	33
6.3.1 Caractéristiques radiologiques du terme source	33
6.3.2 Caractéristiques géométriques	33
6.3.3 Configurations de calculs et modélisations	34
6.4 Résultats.....	39

L'information contenue dans ce mémoire est la propriété d'ORANO
La reproduction et la rediffusion sont interdites.

6.4.1	Colonne	39
6.4.2	Poubelle et sur-conteneur	39
6.4.3	Caisson pré-bétonné	39
6.4.4	Échantillon	40
6.5	Conclusion	40
	Conclusion	41
6.6	Conclusion du projet	41
6.7	Conclusion personnelle.....	42
	Bibliographie.....	43
	Glossaire	44
	Annexes.....	45
	Annexe A : Spectre d'émission bêta complet	45
	Annexe B : Rayon présentant le plus de rayonnement de freinage retenu pour chaque milieu.....	48
	Annexe C : Caractéristiques géométriques	49
	Annexe D : Note technique	52
	Résumé.....	55
	Abstract.....	55

L'information contenue dans ce mémoire est la propriété d'ORANO
La reproduction et la rediffusion sont interdites.

Table des illustrations

Figure 1 : Activités du groupe Orano : les différentes BU.....	10
Figure 2 : La DTI au sein de la BU Projets.....	11
Figure 3 : Principe schématisé du rayonnement de freinage.....	16
Figure 4 : Modélisation sphérique utilisée dans MCNP	21
Figure 5 : Modélisation sphérique retenue utilisée dans MCNP	22
Figure 6 : Modélisation du DV70.....	24
Figure 7 : Résultats des spectres de rayonnement de freinage de l' U_3O_8 dans un DV70.....	26
Figure 8 : Résultats des spectres de rayonnement de freinage de l' U_3O_8 dans une sphère.....	27
Figure 9 : Résultats des spectres de rayonnement de freinage de l'eau	29
Figure 10 : Organisation du projet	32
Figure 11 : Modélisation de la colonne	35
Figure 12 : Modélisation du sur-conteneur.....	36
Figure 13 : Modélisation du caisson pré-bétonné d'épaisseur 30 cm	37
Figure 14 : Modélisation du caisson pré-bétonné d'épaisseur 40 cm	38
Figure 15 : Modélisation de l'échantillon	39
Tableau 1 : Exemple de spectre d'émission gamma	17
Tableau 2 : Principe de mise en raies des spectres d'émission gamma.....	18
Tableau 3 : Les différents milieux et géométries	23
Tableau 4 : Comparaison des DED obtenus avec le spectre SA et ceux obtenus avec le spectre S1.....	24
Tableau 5 : Résultats des DED.....	28
Tableau 6 : Spectre d'émission gamma	33
Tableau 7 : Caractéristiques géométriques.....	34
Tableau 8 : Caractéristiques géométriques des flacons.....	34
Tableau 9 : Résultat de calcul de la configuration étudiée	40
Tableau 10 : Résultats de calcul des échantillons étudiés	40

Introduction

La radioactivité est omniprésente dans l'univers et sur Terre. En effet, nous sommes en permanence exposés à des sources de radioactivités naturelles (uranium, radium, radon...). La radioactivité est un phénomène naturel lié à l'instabilité de certains noyaux qui composent la matière. Ces noyaux instables dits radionucléides émettent des rayonnements (alpha, bêta, gamma et neutron) qui, en interagissant avec la matière, peuvent l'ioniser, c'est-à-dire lui arracher un ou plusieurs électrons. Ces rayonnements sont alors dits ionisants et peuvent provoquer des effets sur la matière vivante.

Dans le milieu professionnel, il est fondamental d'identifier dans un premier lieu les risques inhérents à toute activité. En matière de radioprotection, les risques sont :

- un risque d'exposition externe à des rayonnements ionisants ;
- un risque d'exposition interne (contamination externe ou interne) par des substances radioactives.

Ces risques doivent être évalués et quantifiés dans la mesure du possible. Cela passe par l'identification et la caractérisation des sources et des rayonnements, ainsi que par la caractérisation des situations de travail, c'est-à-dire des expositions.

Nous étudierons dans la suite de ce mémoire, le risque dû à l'exposition externe.

Le terme irradiation est employé pour une exposition externe aux rayonnements ionisants, lorsqu'une personne se trouve exposée de l'extérieur par les rayonnements ionisants émis par une source radioactive située dans son voisinage. Toutes les personnes se trouvant à proximité de substance radioactive sont donc sujets à ce risque.

La radioprotection consiste à évaluer le risque d'exposition aux rayonnements ionisants et si nécessaire, à mettre en œuvre des mesures de protection et de prévention destinées à limiter ce risque. Il est donc primordial de procéder en amont à une étude complète d'un projet afin d'évaluer l'exposition aux rayonnements ionisants des travailleurs et du public.

Dans le cadre de ma formation en « Master Ingénierie de la Santé – Prévention des risques et nuisances technologiques » à l'Université d'Aix-Marseille, j'ai effectué mon apprentissage au sein de la société Orano Projets à Bagnols-sur-Cèze.

La priorité d'Orano Projets est d'être une ingénierie du cycle du combustible compétitive au même titre que l'innovation et la dynamique qui se développe vers de nouveaux marchés. À ce titre, l'ingénierie se voit en constante évolution. De plus, de nombreuses activités autre que la production d'électricité, telles que le médical par exemple, utilisent des sources radioactives émettant des rayonnements qui se doivent d'être maîtrisées pour garantir la santé et la sécurité des travailleurs, des patients, et plus largement, des populations. Cette maîtrise passe par la réalisation de calculs de radioprotection.

Dans ce contexte, de nombreuses études de radioprotection sont réalisées chaque année au sein du service Calculs Sûreté d'Orano Projets, demandant un temps de travail considérable. Dans l'objectif d'une démarche d'amélioration du temps d'étude et de ce fait des coûts d'étude et en tenant compte des enjeux qui y sont associés, la problématique de ce mémoire d'alternance est la suivante :

Comment développer une nouvelle méthodologie d'établissement des spectres d'émission gamma prenant en compte le rayonnement de freinage pour les études de radioprotection ?

J'ai ainsi évolué dans le service Calculs Sûreté où ma mission principale consistait à mener à bien mon sujet d'alternance et à réaliser des calculs de radioprotection pour répondre aux besoins des analyses de sûreté (risques d'exposition externe).

Ainsi, nous verrons dans une première partie, la présentation de l'entreprise dans laquelle j'ai effectué mon alternance. Une présentation des outils et codes de calcul que j'ai utilisés au cours de mes projets. Ensuite, je décrirai le travail que j'ai réalisé pour le développement du spectre d'émission gamma et les conclusions qui en découlent. Je poursuivrai avec la présentation d'une étude de radioprotection que j'ai réalisée : le projet RECURE Na. Enfin, je terminerai par une conclusion sur mes projets ainsi que sur mes deux années d'alternance.

1 Présentation de l'entreprise

1.1 Présentation du groupe ORANO

Orano valorise les matières nucléaires afin qu'elles contribuent au développement de la société, en premier lieu dans le domaine de l'énergie.

Le groupe propose des produits et services sur l'ensemble du cycle du combustible nucléaire des matières premières au traitement des déchets. Ses activités, de la mine au démantèlement en passant par la conversion, l'enrichissement, le recyclage, la logistique et l'ingénierie, contribuent à la production d'une électricité bas carbone.

Orano et ses 16 000 collaborateurs mettent leur expertise, leur recherche permanente d'innovation, leur maîtrise des technologies de pointe et leur exigence en matière de sûreté et de sécurité au service de leurs clients en France et à l'international.

Orano est ainsi implanté dans le monde, en France, Belgique, Allemagne, Kazakhstan, Chine, Mongolie, Niger, Gabon, Namibie, Canada, Etats Unis, Japon et en Corée du Sud.

Orano est structuré selon une organisation articulée autour de Business Units (BU) et de Directions Centrales (DC). Le pilotage opérationnel des activités est assuré par les BU.

Les six BU existantes sont :

- la BU Mines, qui regroupe les activités d'extraction et de traitement du minerai d'uranium ;
- la BU Chimie-Enrichissement, qui s'occupe de la conversion et l'enrichissement de l'uranium ainsi que de la conception et la fabrication du combustible ;
- la BU Recyclage, qui récupère les matières valorisables des combustibles en fin de vie afin de les recycler et gérer les déchets ultimes ;
- la BU Démantèlement et Services, qui organise l'assainissement d'équipements et d'installations et pilote le démantèlement de sites à l'arrêt ;
- la BU Emballages Nucléaires et Services, qui conçoit et fabrique les emballages pour le transport et l'entreposage des matières nucléaires et organise leur transport ;
- la BU Ingénierie (Projets), qui conçoit et réalise des projets d'ingénierie pour le compte des installations du groupe Orano mais aussi pour des clients externes.

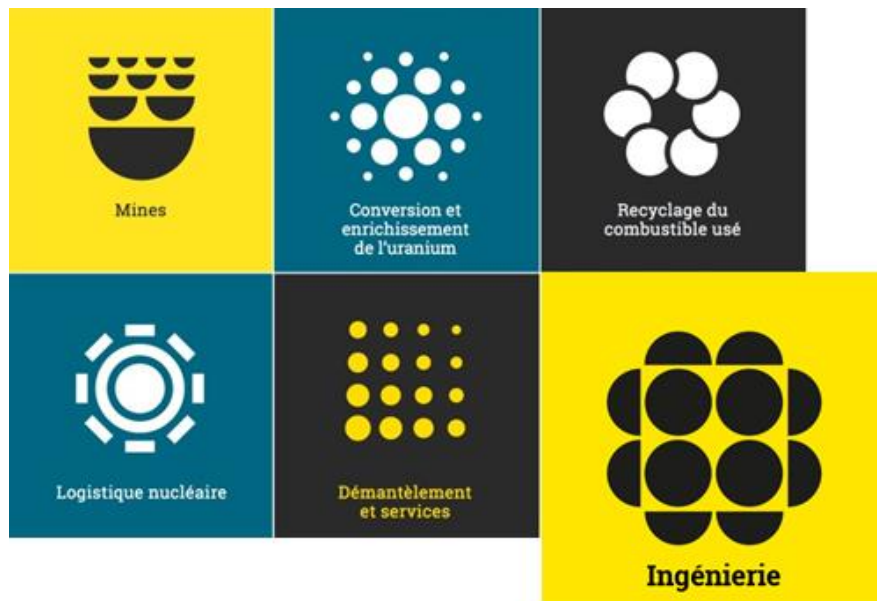


Figure 1 : Activités du groupe Orano : les différentes BU

Les Directions Centrales (DC) sont au service de la Direction Générale et des BU dans la réalisation de leurs objectifs.

Les DC présentes sont :

- Direction innovation et R&D ;
- Direction commercial et marketing ;
- Direction finance, juridique, SI et transformation digitale ;
- Direction performance ;
- Direction people et communications ;
- Direction sûreté, santé, sécurité, environnement ;
- Direction maîtrise d'ouvrage démantèlement et déchets ;
- Direction risques et audit interne ;
- Conformité ;
- Protection ;
- Stratégie.

1.2 Présentation d'ORANO Projets

Au sein du groupe Orano, la BU Projets concentre les expertises de l'ingénierie du cycle du combustible nucléaire pour le compte des installations du groupe et de clients externes.

Ses prestations vont de l'ingénierie de support pour l'exploitant à des missions complètes de type EPCM (Engineering, Procurement, Construction, Management).

Ses domaines d'intervention concernent l'ensemble des activités du groupe : les mines, la chimie de l'uranium, l'enrichissement, le recyclage de combustibles usés, le démantèlement

et la gestion des déchets. La BU Projets entend aussi se développer de façon raisonnée dans le nucléaire hors-cycle et les applications hors nucléaire.

Orano Projets, c'est un retour d'expérience en conception et réalisation de plus de 40 ans d'exploitation sur des usines uniques au monde (La Hague, Melox, ...), mais aussi les projets phares de ces 10 dernières années dans le Sud-Est de la France (Georges Besse II, Comurhex II, ...).

Quel que soit le projet, la Business Unit Projets mise sur le partage des expertises et l'amélioration continue. Son organisation orientée «Projets» apporte aux équipes une dynamique orientée vers la performance et l'optimisation des coûts.

L'enjeu est de définir les contours d'une nouvelle stratégie industrielle d'ingénierie.

1.3 Présentation du CSP Calculs Sûreté

Le CSP Calculs Sûreté dit « métier 36 » est intégré dans la Direction Technique Ingénierie (DTI) de la BU Projets. Le CSP Calculs Sûreté intervient sur l'ensemble de l'activité du groupe Orano (mines, chimie-enrichissement, ...) ainsi que sur toutes les phases de vie d'une installation : de la conception au démantèlement en passant par la construction et la rénovation.

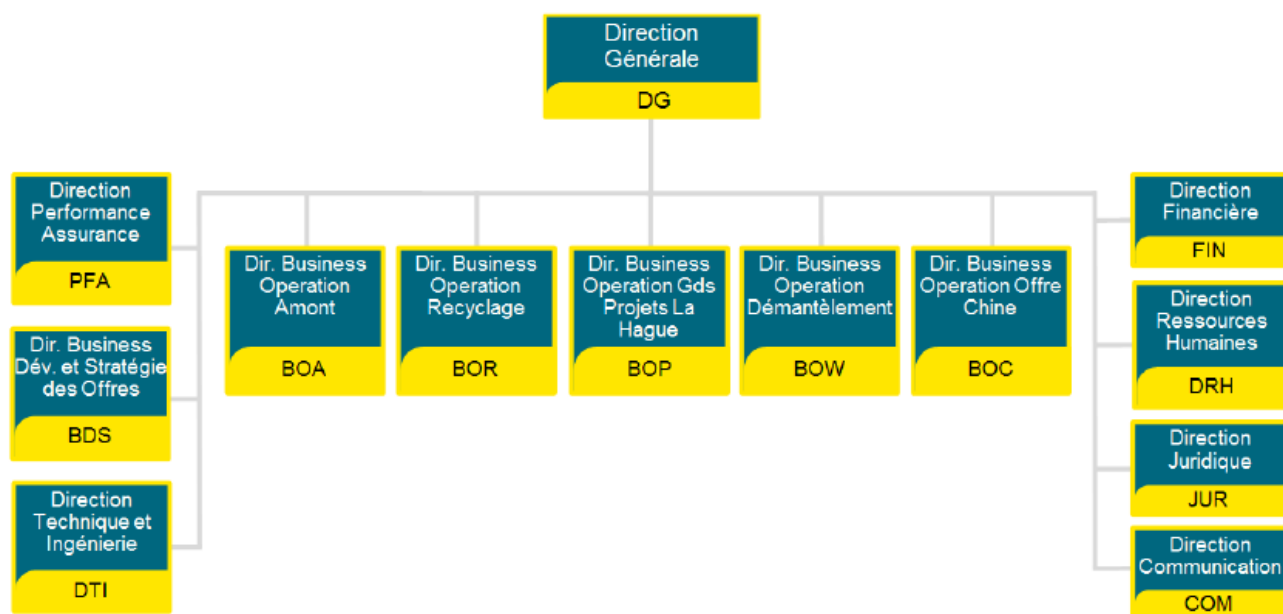


Figure 2 : La DTI au sein de la BU Projets

Le service est réparti sur les 3 établissements d'Orano Projets : Equeurdreville (50), Saint-Quentin en Yvelines (78) et Bagnols-sur-Cèze (30).

Les principales missions du service sont de répondre aux besoins des analyses de sûreté vis-à-vis du risque d'exposition externe, du risque de criticité et de l'impact dosimétrique au personnel et au public. Ainsi, les études réalisées ont pour objectif, par exemple, de vérifier des conceptions de pièces mécaniques vis-à-vis du risque d'exposition externe, de vérifier le zonage à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments ou encore de vérifier la sous-criticité des équipements mécaniques et chimiques, des entreposages de matières...

Au sein de cette entité, j'ai réalisé mon alternance sous la tutelle de mon maître d'apprentissage Alexis HUGUES à Bagnols-sur-Cèze en calculs de radioprotection.

2 Sujet d'alternance

L'objectif de ces deux années d'alternance a été de développer une méthodologie d'établissement des spectres d'émission gamma prenant en compte le rayonnement de freinage pour les études de radioprotection et de me former au métier d'ingénieur en calcul de radioprotection.

En matière de prévention des risques liés à l'exposition aux rayonnements ionisants, la démarche d'évaluation du risque professionnel qui doit être adoptée est la même que pour les autres risques. En application des principes généraux de prévention, il convient tout d'abord d'évaluer les risques, dans la mesure du possible de les éliminer, sinon de mettre en place des mesures de protection collective et en dernier ressort, des équipements de protection individuelle. La prévention doit être intégrée le plus en amont possible dès la conception des lieux de travail, en procédant à des calculs de radioprotection.

Il y a quelques années au sein du groupe, des commentaires ont été faits sur la cohérence entre les résultats obtenus avec les codes de calcul et les résultats mesurés sur le terrain par Orano Cycle. Ces écarts « Mesures-Calculs » ont suscité l'intérêt de notre service pour essayer de les comprendre et les expliquer. Après de nombreux échanges avec des experts et spécialistes en radioprotection, la problématique du rayonnement de freinage appelé également *Bremsstrahlung* est apparue. En effet, des comparaisons de spectres par une précédente alternante ont été effectuées mettant en évidence l'absence de prise en compte du rayonnement de freinage dans certains cas.

Aujourd'hui, le but est de quantifier le phénomène lié aux rayonnements de freinage et *in fine* de créer un spectre d'émission gamma le prenant en compte pour ainsi faciliter la réalisation des calculs pour chaque projet. De cette façon, lors de la réalisation d'études de radioprotection, il ne serait plus nécessaire d'effectuer des calculs spécifiques pour mesurer l'importance du rayonnement de freinage face au rayonnement direct issu des émissions photoniques. De plus, dans les études réalisées par le groupe, la part du rayonnement de freinage est très souvent négligeable face au rayonnement direct. Cependant, des calculs spécifiques pour le rayonnement de freinage sont réalisés afin de vérifier qu'il est bien négligeable.

Le travail réalisé dans le cadre de cette alternance ayant pour objectif le développement d'une méthodologie d'établissement des spectres d'émission gamma prenant en compte le rayonnement de freinage pour les calculs de radioprotection a donc un véritable enjeu pour le service Calculs Sûreté. Ceci permettra de gagner en temps de calculs et donc en temps d'études, ce qui diminuera les coûts pour le projet.

Le développement du spectre d'émission gamma prenant en compte le rayonnement de freinage permettra en plus de gagner du temps dans les études de radioprotection, d'éviter de faire des erreurs en négligeant le rayonnement de freinage lorsque celui-ci a une part important face au rayonnement direct.

L'évaluation du risque d'exposition externe, caractérisée par une grandeur appelée équivalent de dose (en Sv) et dont la fraction par unité de temps correspond au DED (en Sv/h), passe par la réalisation de calcul de radioprotection. Les calculs ont pour objectifs de quantifier le DED susceptible d'être reçu par les opérateurs. De plus, il existe des limites réglementaires à respecter en fonction des personnes (travailleur / public) mais aussi du type de zone (non réglementée / réglementée). Les calculs sont réalisés dès la phase de conception des projets, de manière à respecter des limites réglementaires tout au long de la vie de l'installation.

En parallèle du développement de la méthodologie, j'ai réalisé une étude complète de radioprotection. Cette étude concerne le projet RECURE Na qui concentre plusieurs demandes faites par le CEA. Ces demandes impliquent la réalisation de calculs de DED, calculs permettant de déterminer :

- l'activité maximale du radionucléide présent afin de respecter les limites de la réglementation transport ;
- le choix du colis de transport à utiliser.

Ces calculs sont réalisés afin de répondre à une demande en lien avec l'analyse de sûreté. Cette demande détaille les hypothèses à considérer ainsi que les objectifs du calcul (caractéristiques géométriques, matériaux, source...). Les calculs sont alors réalisés, puis vérifiés et enfin présentés dans une note technique communiquée au client.

3 Eléments de calcul

Les codes de calcul en radioprotection sont utilisés pour évaluer les risques liés à l'exposition externe et pour protéger au mieux la sécurité et la santé des travailleurs et du public. Quels sont ces codes de calcul ? Que contiennent-ils ? Quels sont leurs objectifs ?

3.1 Les moyens de calcul

Au sein du CSP Calculs Sûreté, divers codes sont utilisés en radioprotection tels que MERCURAD, ATILA, MCNP, CESAR, ORIGEN, SN1D, CERES...

Les paragraphes ci-après présentent une brève description de chaque code utilisé. Cette description permet de prendre connaissance de l'objectif de chacun ainsi que du contenu des fichiers de lancement. Les détails techniques liés à chaque code ne seront donc pas abordés.

Les codes utilisés pour la réalisation de mes projets seront détaillés par la suite.

3.1.1 MCNP4c2

Le code MCNP est un code de transport de type probabiliste utilisant la méthode dite de «Monte-Carlo». Ce code est l'un des plus complexes car il permet de suivre l'histoire de chaque particule simulée. C'est un code avec une très grande précision qui a pour principale contrainte le temps de calcul qui peut durer jusqu'à une semaine. Les calculs peuvent être lancés aussi bien avec des particules gamma, neutrons que bêta.

Le fichier MCNP se décompose en trois grandes parties, séparées par un saut de ligne : les cartes des cellules, les cartes des surfaces et les cartes des données. La première ligne du fichier est réservée pour le « titre » du fichier, mais toutes les autres lignes de commentaires doivent être précédées du caractère 'c'. Un exemple de fichier de données d'entrée est présenté en **annexe A**.

Dans la première partie, les cartes des cellules permettent de décrire la géométrie à simuler. Chaque cellule est décrite en spécifiant le matériau utilisé, sa densité, les surfaces qui la compose et l'importance des particules. Les cellules bien que définies à partir des surfaces sont décrites avant ces dernières dans le fichier de données d'entrée.

La seconde partie décrit les cartes des surfaces utilisées par les cartes cellules. Elles peuvent être de plusieurs formes : plans (P), sphères (S), cylindres (C), parallélépipèdes (RPP), Leurs dimensions et leur position sont également renseignées dans cette partie.

Dans la dernière partie, les cartes des données permettent de décrire les paramètres utiles au calcul :

- la description des matériaux utilisés où l'on retrouve les éléments chimiques qui le compose ainsi que leur pourcentage massique ou leur pourcentage atomique ;
- toutes les informations constituant la source qui peuvent être très différentes d'une étude à l'autre comme le spectre qui est renseigné dans cette partie via une carte SI et SP ;
- la définition des tallies. Un tally est un estimateur, qui enregistre une grandeur physique (flux de particule, énergie déposée, etc.) suivant le problème posé par l'utilisateur. Par défaut, MCNP donne les résultats pour une particule émise ;

Page 14 sur 55

L'information contenue dans ce mémoire est la propriété d'ORANO
La reproduction et la rediffusion sont interdites.

- enfin, différentes cartes peuvent être rajoutées comme par exemple, la carte PRDMP qui permet de sauver les résultats intermédiaires dans un fichier lorsque les calculs sont trop longs, la carte PHYS qui modifie les traitements physiques utilisés, la carte CTME qui limite le temps de calcul (au-delà du quel MCNP arrête la simulation), etc.

Le flux photonique est converti en $\mu\text{Sv/h}$ à l'aide d'une table de conversion de flux en dose, lors du calcul de DED.

Les calculs sont généralement lancés avec un poids de particule égale à 1. Un post-traitement est ensuite réalisé pour convertir le résultat obtenu pour une particule avec le nombre total de particules à considérer.

3.1.2 MERCURAD

MERCURAD est une IHM (Interface Homme Machine) permettant l'édition d'une scène réelle afin de déterminer le DED gamma. Cette IHM est associée au code MERCURE 6.3 qui décrit le transport et l'atténuation des rayonnements gamma par la méthode d'atténuation en ligne droite avec intégration des noyaux ponctuels par une méthode Monte Carlo dans une géométrie à trois dimensions. Ce code utilise donc une approche déterministe en 3D, simplifiée et permet ainsi la réalisation d'étude de faisabilité qui s'attache à vérifier que le projet soit techniquement faisable et économiquement acceptable.

Ce code réalise des calculs complexes mais reste tout de même moins précis que les codes Monte Carlo. Bien que ne prenant pas en compte tous les phénomènes physiques présents, il permet d'avoir un ordre de grandeur sur la dose susceptible d'être prise. Le temps de calcul est relativement court. Pour des calculs plus précis le code MCNP sera privilégié.

MERCURAD est réparti en 4 parties. Dans un premier temps, la géométrie. En effet, ce code est constitué de 4 formes élémentaires de bases : le parallélépipède rectangle, le cylindre, le tronc de cône et la sphère. La seconde partie à renseigner est la composition des matériaux utilisés dans notre géométrie (acier, béton, plomb, eau...) ainsi que leur densité. Dans un troisième temps, les caractéristiques de la source (l'activité et le spectre d'émission gamma) sont renseignées. La dernière étape est consacrée à l'emplacement du ou des détecteur(s). Une fois les coordonnées du ou des point(s) de détection fixées, le lancement du calcul peut être effectué.

Un exemple de modélisation est présenté en **annexe B**.

3.1.3 CASPER

Casper est un outil de calculs Excel permettant de générer le spectre d'émission bêta. Il contribue également à calculer l'activité totale des radionucléides considérés pour l'établissement du spectre et du nombre total de bêta émis aussi appelé l'intégrale des sources.

Cet outil contient une spécificité pour MCNP. Il génère la carte SI et SP à utiliser lors de la rédaction du fichier de données d'entrée MCNP.

4 Définitions

4.1 Rayonnement de freinage

Le rayonnement de freinage est un rayonnement électromagnétique créé par le ralentissement de charges électriques. La particule chargée est déviée et freinée par le champ électrique du noyau des cibles (due au noyau positif) et perd ainsi une partie de son énergie sous la forme de rayonnement électromagnétique.

Ce phénomène physique concerne toutes les particules chargées qui subissent un ralentissement. Aussi, ce phénomène devient « intéressant » dans nos configurations de calcul pour des électrons de fortes énergies car l'énergie des gammas issus de ce phénomène dépend de l'énergie initiale de la particule chargée.

La **figure 3** ci-dessous présente la création d'un rayonnement de freinage dans le champ électrique d'un noyau atomique.

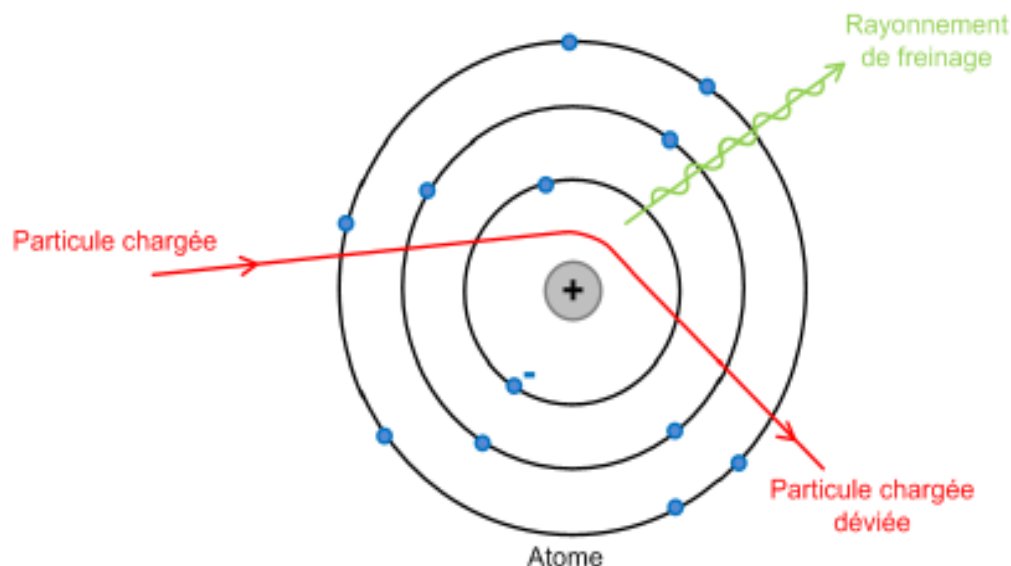


Figure 3 : Principe schématisé du rayonnement de freinage

Le spectre en énergie des photons de freinage émis est continu de zéro à l'énergie du bêta incident. Un exemple de spectre d'émission bêta est présenté en **annexe C**.

4.2 Spectre d'émission gamma

Un spectre d'émission gamma est un spectre donnant, le nombre de gamma émis par désintégration pour chaque raie d'énergie. Ce nombre est appelé indice de désintégration.

Le **tableau 1** ci-dessous présente un spectre d'émission gamma établi sur 18 raies d'énergies.

Énergies des raies (MeV)	Indice de désintégration
$1,500.10^{-2}$	$9,646.10^{-2}$
$2,500.10^{-2}$	$1,360.10^{-3}$
$3,750.10^{-2}$	$1,708.10^{-5}$
$5,750.10^{-2}$	$1,206.10^{-2}$
$8,500.10^{-2}$	$1,922.10^{-2}$
$1,250.10^{-1}$	$2,436.10^{-3}$
$2,250.10^{-1}$	$5,059.10^{-3}$
$3,750.10^{-1}$	$5,325.10^{-5}$
$5,750.10^{-1}$	$2,587.10^{-4}$
$8,500.10^{-1}$	$1,478.10^{-3}$
1,250	$1,414.10^{-3}$
$1,750.10^0$	$2,468.10^{-4}$
$2,250.10^0$	$1,212.10^{-7}$
$2,750.10^0$	$4,397.10^{-8}$
$3,500.10^0$	$3,875.10^{-8}$
$5,000.10^0$	$1,658.10^{-8}$
$7,000.10^0$	$1,910.10^{-9}$
$9,500.10^0$	$2,196.10^{-10}$

Tableau 1 : Exemple de spectre d'émission gamma

La mise en raies d'un spectre d'émission gamma consiste à sommer les indices de désintégration pour une gamme d'énergie donnée, afin de les affecter sur l'énergie de raie désirée. Cette mise en raies des spectres d'émission gamma a pour avantage, un meilleur traitement des raies dans MCNP et un gain au niveau du temps de calcul.

Le **tableau 2** ci-dessous présente le principe de mise en raie des spectres d'émission gamma avec les gammes d'énergies à affecter à la raie considérée.

Energies (MeV)		
Inférieur	Supérieur	Raie
$1,000.10^{-2}$	$2,000.10^{-2}$	$1,500.10^{-2}$
$2,000.10^{-2}$	$3,000.10^{-2}$	$2,500.10^{-2}$
$3,000.10^{-2}$	$4,500.10^{-2}$	$3,750.10^{-2}$
$4,500.10^{-2}$	$7,000.10^{-2}$	$5,750.10^{-2}$
$7,000.10^{-2}$	$1,000.10^{-1}$	$8,500.10^{-2}$
$1,000.10^{-1}$	$1,500.10^{-1}$	$1,250.10^{-1}$
$1,500.10^{-1}$	$3,000.10^{-1}$	$2,250.10^{-1}$
$3,000.10^{-1}$	$4,500.10^{-1}$	$3,750.10^{-1}$
$4,500.10^{-1}$	$7,000.10^{-1}$	$5,750.10^{-1}$
$7,000.10^{-1}$	$1,000.10^0$	$8,500.10^{-1}$
$1,000.10^0$	$1,500.10^0$	$1,250.10^0$
$1,500.10^0$	$2,000.10^0$	$1,750.10^0$
$2,000.10^0$	$2,500.10^0$	$2,250.10^0$
$2,500.10^0$	$3,000.10^0$	$2,750.10^0$
$3,000.10^0$	$4,000.10^0$	$3,500.10^0$
$4,000.10^0$	$2,250.10^0$	$5,000.10^0$
$6,000.10^0$	$8,000.10^0$	$7,000.10^0$
$8,000.10^0$	$1,100.10^1$	$9,500.10^0$

Tableau 2 : Principe de mise en raies des spectres d'émission gamma

Par exemple, la raie à $1,5.10^{-2}$ MeV est la somme des indices de désintégration corrigés des énergies comprises entre $1,0.10^{-2}$ et $2,0.10^{-2}$ MeV.

5 Développement d'une méthodologie d'établissement des spectres d'émission gamma prenant en compte le rayonnement de freinage pour les études de radioprotection

Le rayonnement de freinage est important dans nos calculs pour des électrons de très forte énergie et traversant un milieu dense car il peut ainsi avoir une part importante dans le DED total. Il peut donc être nécessaire de le prendre en compte dans les calculs de radioprotection pour évaluer avec précision le risque d'exposition externe.

5.1 Aujourd'hui...

La méthode utilisée actuellement afin d'obtenir la part de DED dû au rayonnement de freinage dans les calculs de radioprotection est le lancement d'un calcul spécifique (bêta-gamma) MCNP. Ce calcul utilisant un spectre bêta demande la rédaction d'un nouveau fichier d'entrée. Le but est donc de simplifier les études de radioprotection, pour optimiser les tâches à réaliser et donc le temps de travail.

La problématique du rayonnement de freinage a été identifiée par les écarts observés dans certaines configurations entre les résultats obtenus par les codes de calculs et les mesures réalisées sur le terrain. Un travail sur les termes sources concernés par la problématique tel que le milieu uranifère a donc été effectué afin de mettre en évidence la part non négligeable du rayonnement de freinage face au rayonnement direct.

Nous comparerons par la suite, les DED obtenus avec le spectre bêta et ceux obtenus avec le spectre incluant le rayonnement de freinage que l'on souhaite développer afin de vérifier la cohérence de nos résultats.

5.2 Recensement des études

Le projet a débuté par un travail de recherche documentaire. Effectivement, nous avons recensé l'ensemble des études traitant de l'uranium naturel, appauvri, enrichi ou de l'uranium de retraitement ultérieurement réalisées par le service. Ces milieux ont été étudiés car ils sont fréquemment rencontrés par le service, de plus ce sont des milieux pour lesquels les écarts « Mesures-Calculs » ont été détectés.

Une fois ces études recensées à travers un fichier Excel, nous avons commencé à les traiter. Le traitement des études a débuté par toutes celles utilisant le code de calcul MCNP. Les calculs étant lancés avec le code MCNP, il a été préférable de privilégier ces études pour éviter de reprendre la rédaction de l'étude complète et pour ainsi avoir des résultats plus rapides.

La modification des fichiers de données d'entrée MCNP avec le mode électron, photon (bêta-gamma) a été réalisé afin de prendre en compte les photons issus du rayonnement de

freinage, en se basant sur les fichiers de données d'entrée du mode photon, déjà existant. Le spectre bêta a été obtenu via CASPER (cf. § 3.1.3). Une fois le fichier lancé, les résultats obtenus ont été post-traités puis exploités. Nous avons observé que la part de gammas issus du rayonnement de freinage n'était pas négligeable. En effet, une part de DED supérieure à 1% due au rayonnement de freinage est considérée comme non négligeable par le service. Ce travail a été effectué pour plusieurs études recensées au préalable. Nous avons donc débuté notre travail d'investigation pour répondre à cette problématique et expliquer un tel écart.

Le but étant de recenser seulement les études impactées par le rayonnement de freinage et de calculer l'impact de celui-ci dans ces cas.

Dans un premier temps, nous avons choisi de modéliser un conteneur de type DV70 (cf. **annexe E**). Ce choix a été fait pour réaliser nos calculs avec une modélisation simple et pour éviter de biaiser nos résultats. Nous avons effectué nos calculs en considérant deux points, l'un à une distance proche du conteneur (50 cm) et l'autre à une distance plus éloignée (5 m) pour observer l'impact de la distance face au rayonnement de freinage. Les résultats de DED obtenus ont montré une augmentation de l'ordre d'un facteur 2 du DED total (prenant en compte le DED gamma et le DED bêta-gamma incluant le rayonnement de freinage avec la méthode utilisée actuellement par le service) face au DED gamma (sans prise en compte du rayonnement de freinage) dans nos calculs à 50 cm et à 5 m du DV70.

Pour mieux comprendre et appréhender ce phénomène, nous avons par la suite intégré le DV70 dans un entreposage de DV70 d'une étude antérieure recensée au préalable. Le lancement des calculs avec la méthode actuelle, a révélé une sous-estimation du DED de l'ordre de 30%.

La différence que nous avons constatée entre l'entreposage de DV70 et le DV70 seul est due à l'atténuation des conteneurs entre eux dans une configuration entreposage. En effet, la composition des conteneurs ainsi que le matériau qui les composent atténue le phénomène. En intégrant le DV70 à un entreposage, cela réduit donc l'effet lié au rayonnement de freinage. Cette différence de l'ordre de 30 % liée au rayonnement de freinage bien qu'importante est acceptable pour nos études et ne remet pas en cause la Sûreté des installations compte-tenu des marges de modélisations considérées tels que l'activité totale pénalisante ou encore le bâtiment d'entreposage non modélisé qui permet de négliger l'atténuation du DED due aux murs du bâtiment.

Après de nombreux essais, nous avons développé une première approche d'établissement du spectre de rayonnement de freinage, détaillé dans les paragraphes ci-dessous.

5.3 Méthode développée

La méthode utilisée afin d'obtenir le spectre de rayonnement de freinage se divise en deux étapes.

1^{er} étape :

➤ lancement d'un calcul MCNP bêta-gamma :

- avec une source ponctuelle entourée de sphères allant d'un rayon de 2 cm à 30 cm ;
- pour 7 milieux : eau, boues, nitrate, hexafluorure d'uranium (UF_6), poudre de titanate de strontium et différents oxydes ;
- en utilisant un estimateur surfacique afin de récupérer le flux photonique traversant la surface de chaque sphère.

La source ponctuelle modélisée par un point a été choisie afin de simplifier notre approche.

La géométrie sphérique a été choisie afin de prendre en compte l'ensemble des émissions radiatives, quel que soit l'angle d'émission de la particule. Cette méthode nous permet de déterminer le rayon créant le plus de rayonnement de freinage dans le but d'être enveloppe.

La **figure 4** ci-dessous présente la modélisation de calcul considérée.

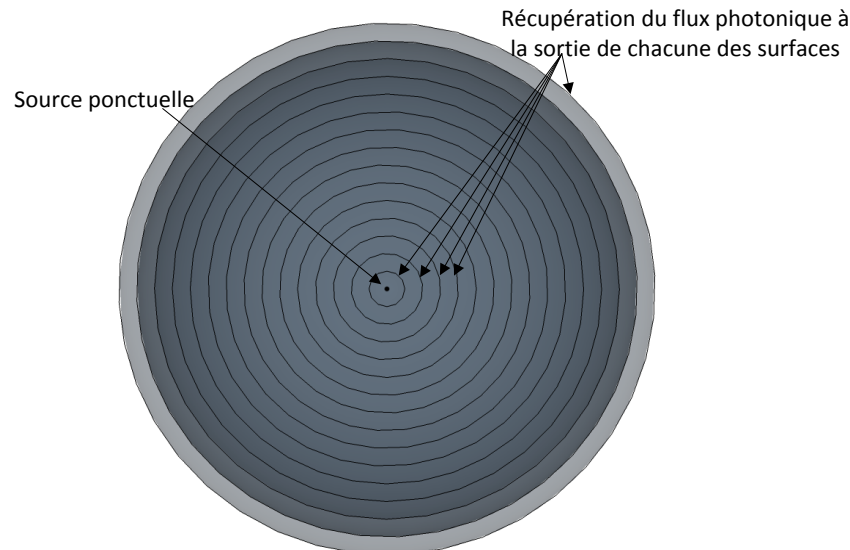


Figure 4 : Modélisation sphérique utilisée dans MCNP

Le rayon retenu pour chaque milieu traité est présenté en **annexe D**. En effet, après avoir traité les résultats obtenus nous avons sélectionné le rayon présentant le plus de rayonnement de freinage, soit la surface ayant le flux photonique le plus élevé pour chacun des milieux. On constate que selon le milieu considéré, le rayon retenu varie de 8 cm pour l'hexafluorure d'uranium à 24 cm pour l'eau.

Le flux photonique prend en compte le flux entrant et sortant de la sphère.

Après avoir identifié la configuration géométrique que l'on souhaite étudier (DV70, cylindre 30B, fût, ...), une seconde étape est requise pour l'obtention de notre spectre de rayonnement de freinage.

2^{ème} étape :

➤ lancement d'un calcul MCNP bêta-gamma :

- avec une source ponctuelle entourée d'une sphère de rayon retenu précédemment ;
- pour les 7 milieux définis précédemment ;
- en utilisant un estimateur surfacique afin de récupérer le flux photonique traversant la sphère dans l'ensemble de son volume.

Une carte E0 a été ajoutée dans le script MCNP pour obtenir le spectre de rayonnement de freinage. Cette carte permet d'obtenir le flux arrivant sur le tally en fonction de l'énergie de la particule arrivante. Nous avons choisi un spectre de 399 raies d'énergies, ce qui nous permet d'avoir un résultat plus précis.

Le fichier de sortie MCNP donne un spectre complet d'émission photonique à 399 raies. Ce spectre est ensuite mis en raies comme détaillé dans le paragraphe 4.2 pour obtenir un spectre de 18 raies. Il est nommé S1.

La **figure 5** ci-dessous présente la modélisation retenue pour l'obtention de notre spectre de rayonnement de freinage. Le rayon varie en fonction du milieu considéré.

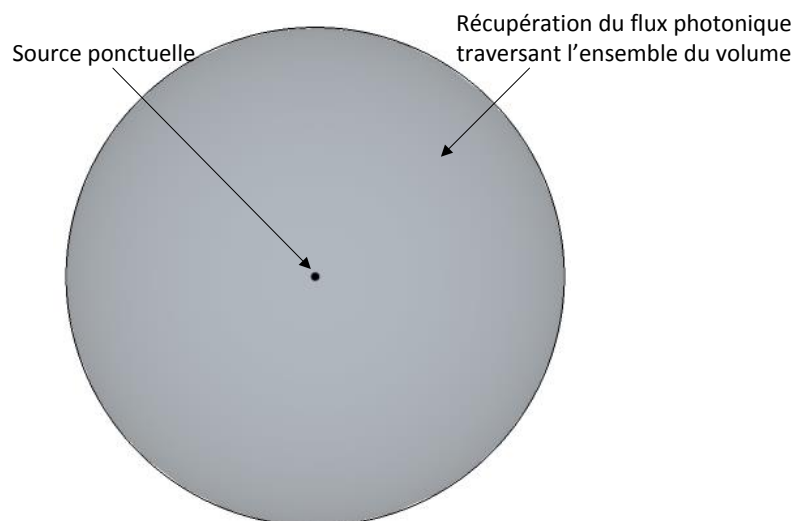


Figure 5 : Modélisation sphérique retenue utilisée dans MCNP

Avant de déployer la méthode, il a fallu vérifier son bon fonctionnement.

5.4 Vérification

Afin de vérifier le bon fonctionnement de la méthode, il a fallu établir le spectre de rayonnement de freinage pour tous les milieux étudiés. Une fois les spectres obtenus, des calculs de DED gamma ont été lancés à 50 cm et à 5 m de différentes géométries. Ce calcul a également été lancé avec la méthode utilisée actuellement (spectre bêta, nommé SA) pour que l'on puisse effectuer des comparaisons.

Cette vérification se fait en comparant nos deux calculs suivants :

- **lancement d'un calcul MCNP gamma :**
 - avec une source volumique ;
 - pour 6 géométries : cuve, réacteur procédé, fût, DV70, cylindre et capsule ;
 - pour les 7 milieux définis précédemment ;
 - en utilisant des points de calculs à 50 cm et à 5 m.
- **lancement d'un calcul MCNP bêta-gamma :**
 - avec une source volumique ;
 - pour 6 géométries définies précédemment ;
 - pour les 7 milieux définis précédemment ;
 - en utilisant des points de calculs à 50 cm et à 5 m.

Les géométries et les milieux ont été affectés comme décrit dans le **tableau 3** ci-dessous.

Milieu	Géométrie
U ₃ O ₈	DV70
Hexafluorure d'uranium (UF ₆)	Cylindre 30B
UO ₂	Fût
Nitrate	Cuve
Eau	Cuve et Fût
Boues	Réacteur procédé
Poudre de titanate de strontium	Capsule

Tableau 3 : Les différents milieux et géométries associés

Nota 1 : Les caractéristiques des six géométries utilisées sont présentées en **annexe E**.

La **figure 6** ci-après présente un exemple de modélisation de calculs de DED à 50 cm et à 5 m d'un DV70 contenant de l'U₃O₈.

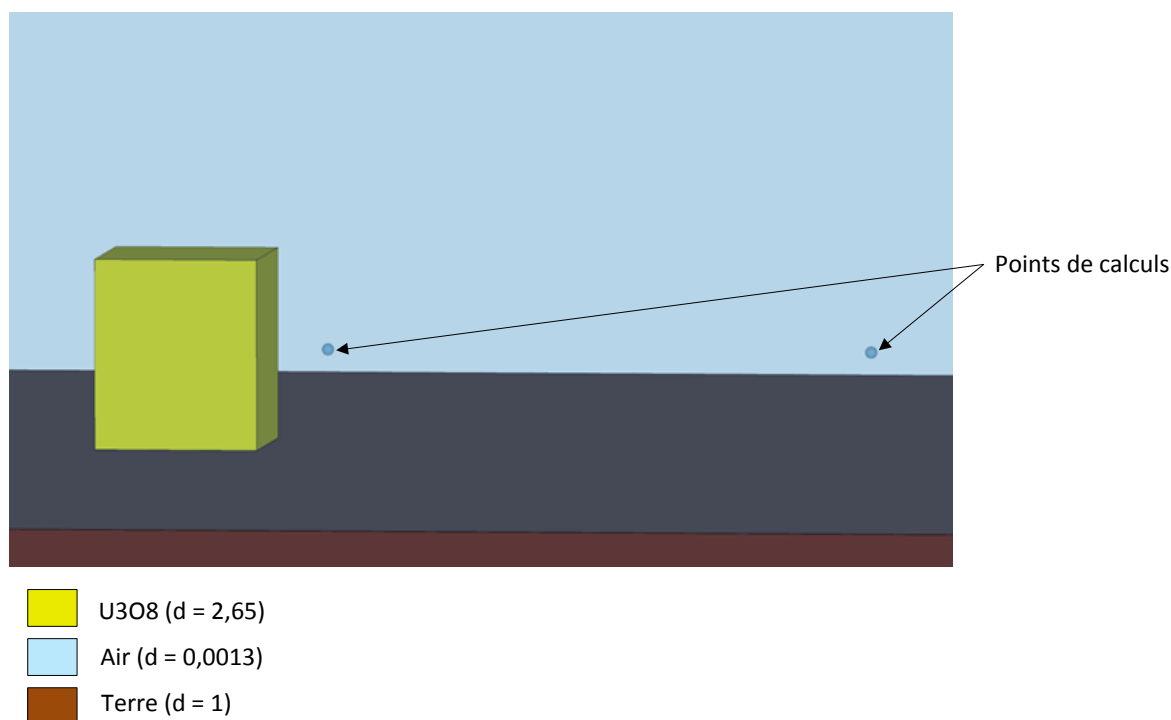


Figure 6 : Modélisation du DV70

Le **tableau 4** ci-dessous présente la comparaison entre les DED obtenus avec le spectre bêta SA et ceux obtenus avec le spectre prenant en compte le rayonnement de freinage S1.

Milieu	Géométrie	Rayon de la sphère (cm)	% massique d'U	DED spectre SA ($\mu\text{Sv.h}^{-1}$)		DED spectre S1 ($\mu\text{Sv.h}^{-1}$)		Ecart relatif (S1/SA)	
				50cm	5m	50cm	5m	50cm	5m
Eau	Cuve	24	-	$5,66 \cdot 10^{-1}$	$1,22 \cdot 10^{-1}$	1,14	$2,16 \cdot 10^{-1}$	+102%	+77%
Boues	Réacteur procédé	22	0,24%	3,33	$3,66 \cdot 10^{-1}$	6,11	$6,63 \cdot 10^{-1}$	+84%	+81%
Nitrate	Cuve	14	60,00%	1,97	$4,04 \cdot 10^{-1}$	2,68	$5,44 \cdot 10^{-1}$	+36%	+35%
UO ₂	Fût	12	88,00%	2,52	$4,69 \cdot 10^{-2}$	2,74	$5,01 \cdot 10^{-2}$	+9%	+7%
Eau	Fût	24	-	$2,44 \cdot 10^{-1}$	$4,55 \cdot 10^{-3}$	$5,99 \cdot 10^{-1}$	$1,10 \cdot 10^{-2}$	+145%	+142%
U ₃ O ₈	DV70	8	85,00%	1,36	$5,02 \cdot 10^{-2}$	1,66	$5,86 \cdot 10^{-2}$	+22%	+17%
Hexafluorure d'uranium	Cylindre 30B	8	67,62%	3,02	$1,10 \cdot 10^{-1}$	2,98	$1,09 \cdot 10^{-1}$	0%	0%
Poudre de titanate de strontium	Capsule	8	-	$1,21 \cdot 10^6$	$1,34 \cdot 10^4$	$1,84 \cdot 10^6$	$2,04 \cdot 10^4$	+52%	+52%

Tableau 4 : Comparaison des DED obtenus avec le spectre SA et ceux obtenus avec le spectre S1

Les comparaisons entre les DED obtenus avec le spectre SA et ceux obtenus avec le spectre S1 sont faites respectivement avec la même géométrie et le même milieu.

L'étude des différents cas a montré un écart dans certaines modélisations. En effet, certains cas se rapprochent du résultat que l'on souhaite obtenir avec des écarts relatifs inférieurs à 36% pour le nitrate, l' UO_2 , l' U_3O_8 et l'hexafluorure d'uranium (cf valeurs en vert dans le **tableau 4**). Ces valeurs obtenues avec le spectre S1 surestiment ceux obtenus avec le spectre SA. Elles sont considérées comme acceptables par le service. Toutefois, d'autres s'en éloignent considérablement avec des écarts relatifs qui surestiment les résultats obtenus avec le spectre SA de l'ordre d'un facteur 2 pour les cas de l'eau et les boues (composés d'eau et d'uranium en très faible quantité, 0,24%) (cf valeurs en rouge dans le **tableau 4**). Les DED obtenus dans le cas de la poudre de titanate de strontium (cf valeurs en orange dans le **tableau 4**) ne sont également pas concluants mais se rapprochent d'un résultat acceptable. Ces résultats bien que pénalisant ne sont pas acceptables car une majoration trop importante du DED pourrait entraîner des coûts supplémentaires pour le client qui devrait mettre en place des moyens de protections plus importants et peut-être plus contraignants sans réelle nécessité.

Nous avons également constaté après diverses modélisations que dans des conditions similaires, la géométrie n'a aucun impact sur les résultats obtenus. Cet écart a été constaté selon le milieu étudié. Deux catégories se présentent, les milieux uranifères et les milieux non uranifères.

5.5 Comparaison des résultats selon les milieux

5.5.1 Milieux uranifères

L' UO_2 , l' U_3O_8 , l'hexafluorure d'uranium et le nitrate sont les milieux uranifères que nous avons étudiés, composés respectivement de 88, 85, 68 et 60 % d'uranium. Ce sont des milieux fréquemment rencontrés dans les études de radioprotection du CSP Calculs de Sécurité pour les usines du sud telles que Malvési, Tricastin ou encore Melox.

En effet, Malvési récupère le minerai d'uranium en provenance des mines sous forme d' U_3O_8 (le yellow cake). On obtient après purification et hydrofluoruration (ajout de 4 atomes de fluor) de l' UF_4 . Les résidus du procédé (boues et liquides nitrates) sont envoyés vers des bassins d'entreposage et d'évaporation. L' UF_4 est ensuite envoyé à l'usine Comurhex II (Tricastin) pour sa conversion en UF_6 à l'aide d'un réacteur à flamme qui permet l'ajout de 2 atomes de fluor. Par la suite, l' UF_6 est enrichi dans l'usine George Besse II (Tricastin) en centrifugeuse. La production d' UF_6 enrichi est échantillonnée à l'atelier RECI (contrôle qualité) puis conditionnée dans des emballages (cylindres 30B) pour expédition vers le fabricant de combustible. De plus, le Tricastin traite la totalité du nitrate issu de l'usine Orano de La Hague pour le convertir en U_3O_8 . Une fois converti, l'uranium de retraitement est entreposé sur le site du Tricastin. L' UF_6 appauvri est quant à lui traité pour le stabiliser en U_3O_8 dans des conteneurs (DV70). Les DV70 sont ensuite entreposés sur parc en attente de réutilisation ultérieure. Les usines de Melox, produisent le combustible MOX, combustible constitué d'un mélange d' UO_2 et de plutonium.

La **figure 7** ci-dessous présente le spectre de rayonnement de freinage en cours de développement nommé S1 (en noir) et le spectre bêta utilisé pour le calcul direct du rayonnement de freinage nommé SA (en bleu) dans le cas du volume d'un DV70 contenant de l' U_3O_8 .

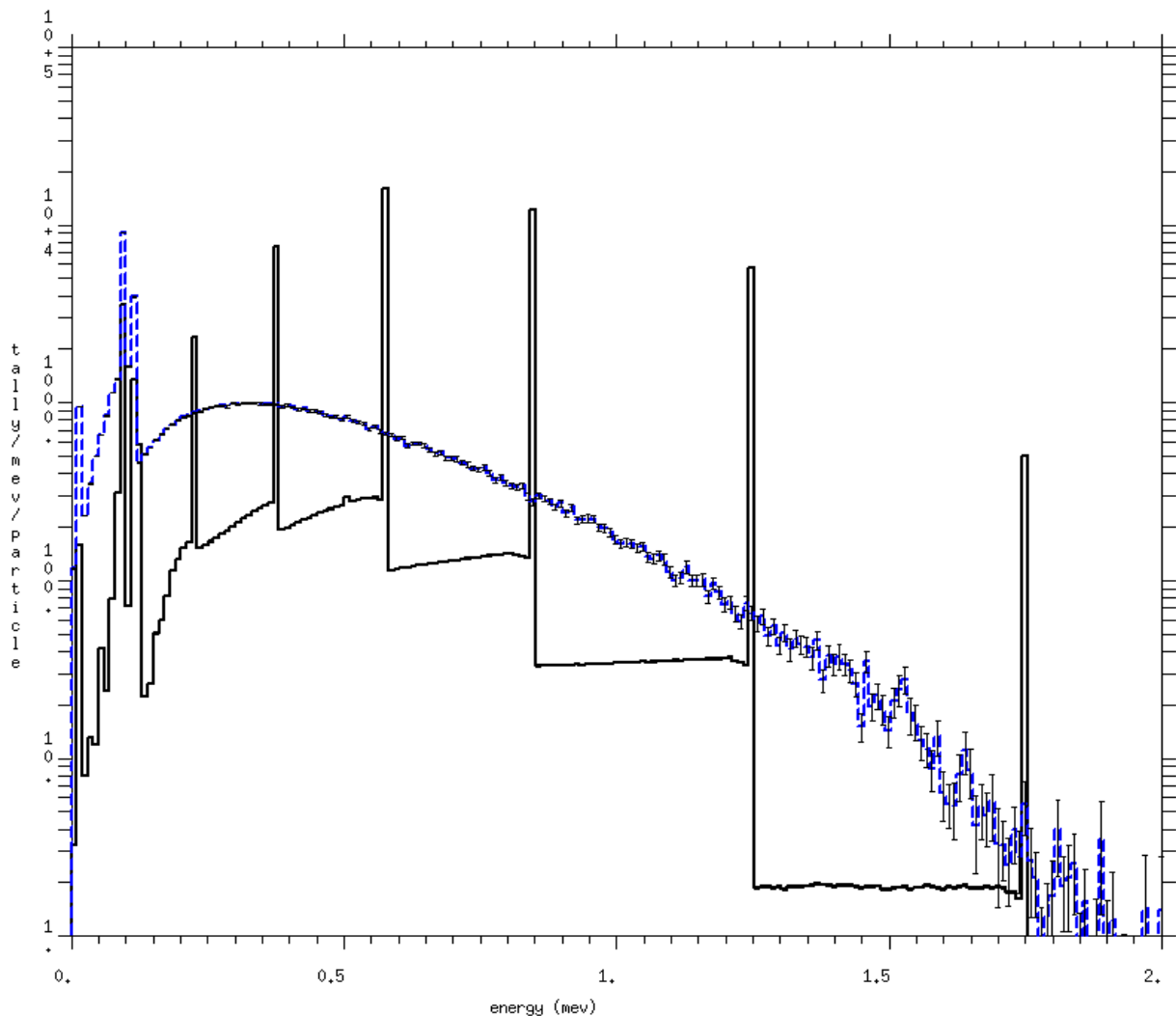


Figure 7 : Résultats des spectres de rayonnement de freinage de l' U_3O_8 dans un DV70

La **figure 8** ci-après présente le spectre de rayonnement de freinage en cours de développement nommé S1 (en noir) et le spectre bêta utilisé pour le calcul direct du rayonnement de freinage nommé SA (en bleu) dans le cas du volume d'une sphère de 8 cm de rayon contenant de l' U_3O_8 , soit le rayon créant le plus de rayonnement de freinage.

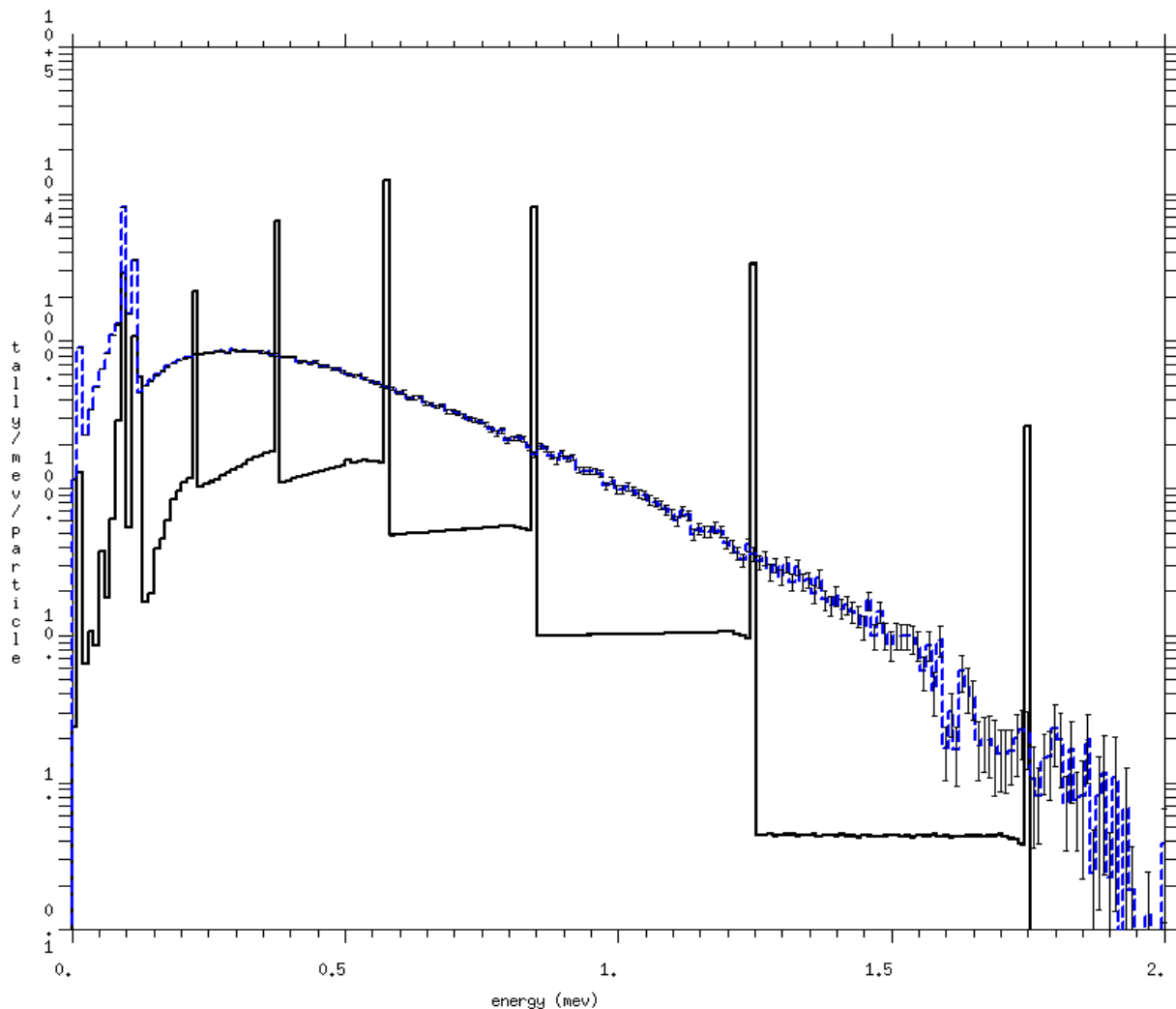


Figure 8 : Résultats des spectres de rayonnement de freinage de l' U_3O_8 dans une sphère

On constate que le spectre en cours de développement S1 et celui issu directement des calculs du rayonnement de freinage sont cohérents. Les résultats des DED obtenus présentés au **tableau 4** montrent une surestimation du DED pour une utilisation du spectre en cours de développement S1 par rapport au calcul direct du rayonnement de freinage (spectre bêta SA), en vert sur le tableau. Cette surestimation est de l'ordre de 30 % et est jugée satisfaisante car cela permet d'avoir un résultat enveloppe acceptable. Cette méthode fonctionne donc dans le cas des milieux uranifères.

De plus, on constate également que la **figure 7** et la **figure 8** sont similaires ce qui montre que la géométrie n'a aucune influence sur le spectre de rayonnement de freinage.

Les études de radioprotection ne sont pas seulement réalisées pour des milieux uranifères. Il a donc été important d'étudier d'autres milieux pouvant être rencontrés dans les études.

5.5.2 Milieux non uranifères

L'eau, la boue et le titanate de strontium sont les autres milieux que nous avons étudiés. Ces milieux ne sont pas composés d'uranium ou en très faible quantité (0.24%).

Après avoir constatés un écart relatif important pour les milieux non uranifères, nous avons décidé de modifier notre méthode pour réduire au minimum le nombre de paramètres pouvant influencer les résultats.

Afin de réduire au mieux cet écart, nous avons lancé nos calculs de DED à 5 cm et à 5 m d'une géométrie sphérique, soit la même sphère et donc le même volume que celui utilisé pour obtenir le spectre de rayonnement de freinage. Cette approche nous a permis d'observer l'impact de la géométrie dans ce cas.

Le **tableau 5** ci-dessous présente les résultats des DED à 50 cm et à 5 m d'une sphère de 24 cm de rayon contenant de l'eau.

Rayon sphère (en cm)	DED spectre SA ($\mu\text{Sv.h}^{-1}$)		DED spectre S1 ($\mu\text{Sv.h}^{-1}$)		Écart relatif (S1/SA)	
	50 cm	5 m	50 cm	5 m	50 cm	5 m
24	$2,19.10^{-1}$	$2,91.10^{-3}$	$1,81.10^{-1}$	$2,39.10^{-3}$	-21%	-22%

Tableau 5 : Résultats des DED

Les DED calculés avec le spectre en cours de développement S1 sont plus faibles que les DED calculés avec le spectre bêta SA. Cette sous-estimation des DED est de l'ordre de 20 %. D'un point de vue de la sûreté, ces résultats ne sont pas satisfaisants. En effet, la sous-estimation du DED ne permet pas de mettre en place tous les moyens de protections adaptées afin de protéger la santé des personnes et de l'environnement car ils ne seraient mis en place qu'en prenant en compte une partie du risque d'exposition externe.

Pour comprendre cette disparité, nous nous sommes intéressés au spectre.

La **figure 9** ci-après présente le spectre de rayonnement de freinage en cours de développement nommé S1 (en noir) et le spectre bêta utilisé pour le calcul direct du rayonnement de freinage nommé SA (en bleu), dans le cas du volume d'une sphère de 24 cm de rayon contenant de l'eau.

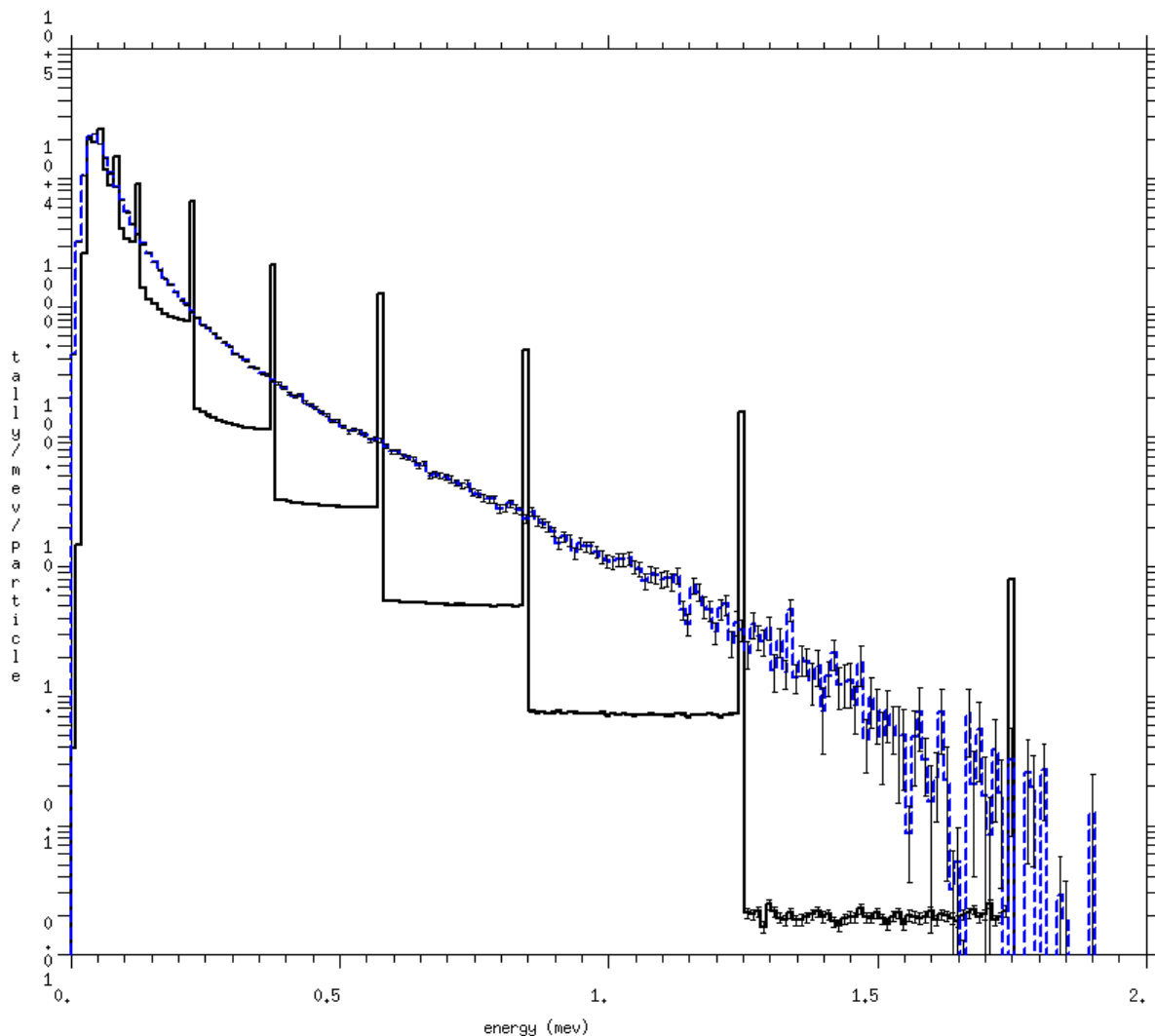


Figure 9 : Résultats des spectres de rayonnement de freinage de l'eau

On constate que le spectre en cours de développement S1 et celui issu directement des calculs du rayonnement de freinage sont cohérents. Néanmoins, les DED obtenus ne sont pas satisfaisants d'un point de vue de la sûreté car ils sous-estiment le risque d'exposition externe.

Cette méthode n'est pas exploitable hors milieu uranifère.

Nous avons lancé différentes modélisations pour comprendre d'où pouvaient provenir ces écarts dans le cas de l'eau. Des modélisations avec des rayons plus faible de 2, 6, 8, 10 et 16 cm, un rayon retenu plus élevé de 26 cm, une densité plus importante avec le passage d'une densité égale à 1 (densité de l'eau) à 1,55 (densité du nitrate) ou encore des cas avec différents volumes (fût, cuve, réacteur procédé). Les résultats de ces nombreuses autres modélisations se sont avérés non concluants.

Nous avons donc réfléchi à un moyen de comprendre cette différence pour obtenir un spectre de rayonnement de freinage qui se rapproche le plus possible de ce que l'on souhaite obtenir.

5.6 Autre approche

Les spectres S1 et SA étant cohérents, nous nous sommes donc intéressés à la déclaration de notre spectre via la carte SI dans le script MCNP. Cette carte précise quelle est la forme de la distribution. En effet, il existe trois types de distribution de spectre dans nos calculs MCNP :

- H, une distribution en histogramme où les entrées numériques sont des limites et doivent être en augmentation monotone et où la première entrée numérique doit être zéro ;
- L, une distribution en valeurs discrètes où les entrées numériques sont des valeurs discrètes de la source variable comme les énergies des raies du spectre des gammas ;
- A, une distribution continue où les entrées sont des valeurs de la variable source à laquelle la densité de probabilité est définie.

Les spectres gammas ont donc été déclarés avec le mode L. Nous les avons modifiés avec le mode A. Dans ce cas nous avons constaté une surestimation de l'ordre de 60 %. Nous avons donc ajouté de l'acier autour de notre sphère. Ce cas a été lancé avec plusieurs épaisseurs.

Les résultats sont en cours de traitement.

5.7 Conclusion

Le spectre d'émission gamma prenant en compte le rayonnement de freinage sera obtenu lorsque le spectre de rayonnement de freinage sera développé puis ajouter au spectre d'émission gamma.

Les investigations que nous avons menées, nous ont permis d'écarter certaines pistes et d'obtenir des résultats concluant dans le cas du milieu uranifère. Cependant, la problématique est toujours présente en milieu non uranifère, ce qui montre qu'un travail de recherche conséquent nécessitant de nombreux calculs reste tout de même à réaliser pour obtenir le spectre souhaité et ainsi, permettre au service de gagner du temps ingénieur dans leurs études.

Les recherches menées ont également montré qu'il n'y a pas de remise en cause de la Sûreté des installations compte-tenu des marges pénalisantes prises pour la modélisation dans les différentes études.

6 Étude de radioprotection : Projet RECURE Na

A l'occasion d'une revue d'orientation sur un projet, il est nécessaire d'avoir un ordre de grandeur des DED afin d'aider au choix de la solution à retenir et à développer, que ce soit pour l'implantation d'un nouvel équipement, la modification d'un procédé existant ou autres. Le projet RECURE Na s'inscrit dans le cadre du démantèlement du réacteur Rapsodie sur le site de Cadarache à l'arrêt depuis 1982. Aujourd'hui, le terme source a été retiré de l'installation mais certains résidus sont toujours présents.

L'étude réalisée durant mon alternance concerne le procédé de décontamination chimique permettant la récupération de ces derniers résidus.

Ce procédé de décontamination circulant dans les différents équipements et tuyauteries, contient du césium. Ce césium sera fixé sur des colonnes, de manière à épurer la solution de décontamination en césium et faciliter son retraitement. Les colonnes seront ensuite gérées sous forme d'un déchet puis stockées sur un site de l'ANDRA.

Dans ce cadre, l'objectif de cette étude est d'effectuer les calculs demandés par le client dans le but de choisir la filière de déchet adapté pour les colonnes, de calculer l'activité maximale que peuvent contenir les différents colis qui contiendront les colonnes concentrées en césium afin de respecter les limites réglementaires et de choisir le type de colis lors de leurs transports.

En cas de dépassement des limites réglementaires, des actions seront à mettre en place selon les techniques et les coûts disponibles par le client, comme des écrans de protection biologique pouvant avoir un impact sur l'implantation du procédé de décontamination, la manipulation des colis à une certaine distance ou encore en diminuant la quantité de césium présente dans les colis (impactant alors la cadence du procédé de décontamination). Ces actions permettent ainsi de réduire l'exposition des travailleurs en application du principe ALARA.

6.1 Organisation du projet

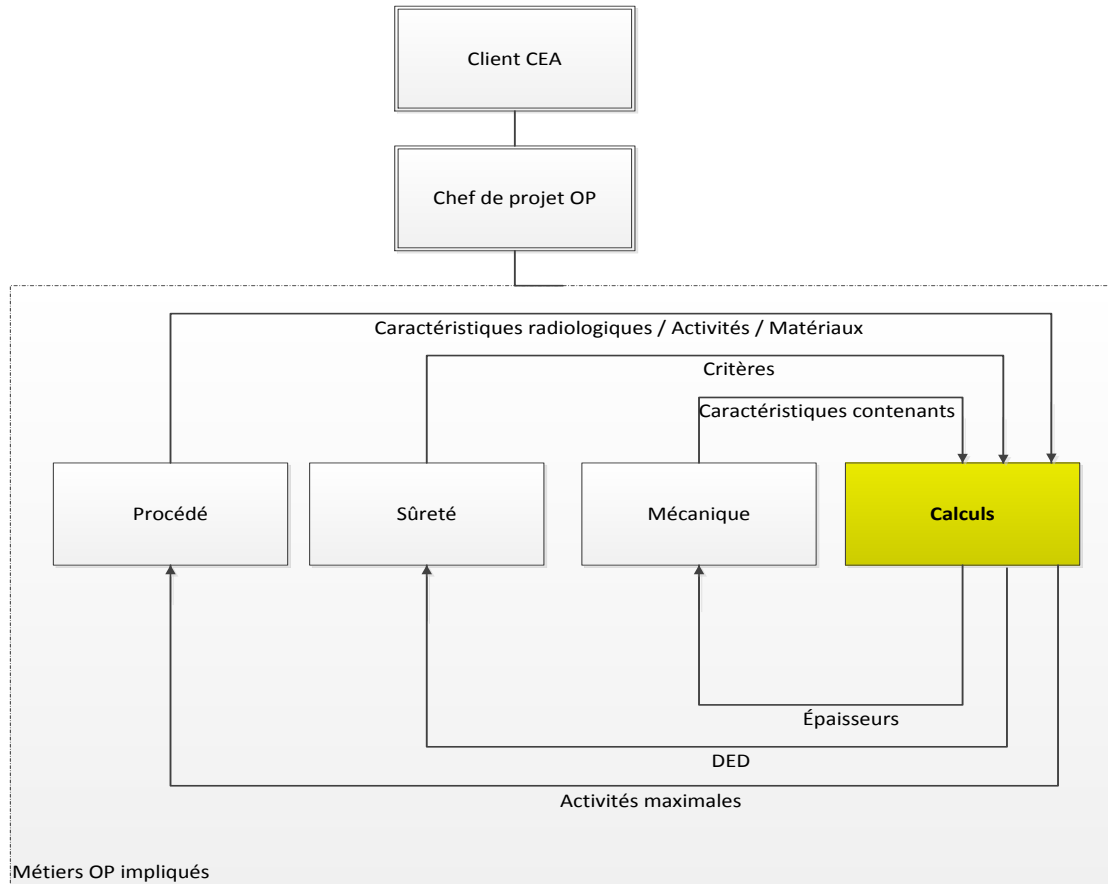


Figure 10 : Organisation du projet

L'organisation du projet se fait comme indiqué dans la **figure 10** ci-dessus. Le chef de projet en contact direct avec le client transmet les directives du projet aux différents métiers concernés. En effet, pour ce projet, nous travaillons (métier calculs) en interface avec trois autres métiers : procédé, sûreté et mécanique. Chaque métier a une part importante dans le projet et les échanges avec ces derniers, nous ont permis de réunir les données d'entrée nécessaires pour réaliser les calculs tels que les caractéristiques radiologiques, les activités, les matériaux considérés, les critères radiologiques ainsi que les caractéristiques géométriques des contenantants.

Nos calculs permettent ainsi de fournir des résultats nécessaires à l'élaboration du projet tels que :

- des épaisseurs, à prendre en compte par la mécanique dans leur modèle ;
- des DED, à fournir à la sûreté afin de vérifier le respect de la réglementation ;
- des activités maximales, à considérer pour concevoir le procédé.

6.2 Objectif

L'objectif est de présenter une synthèse des calculs de DED (Débit d'Équivalent de Dose) que j'ai réalisés dans le cadre du projet RECURE Na.

Dans ce projet, six configurations de calculs sont étudiées :

- un calcul déterminant l'activité maximale en ^{137}Cs afin de respecter 10 mSv.h^{-1} à 3 m d'une colonne sans protection ;
- un calcul de DED au contact (5 cm) d'une colonne sans protection ;
- un calcul de DED au contact (5 cm) d'un sur-conteneur ;
- un calcul déterminant l'activité maximale contenue dans une colonne permettant d'assurer un DED inférieur à 2 mSv.h^{-1} au contact (5 cm) d'un sur-conteneur ;
- un calcul de dimensionnement d'un caisson pré-bétonné pouvant recevoir 4 colonnes permettant d'assurer un DED inférieur à 2 mSv.h^{-1} au contact (5 cm) ;
- un calcul de DED à 1 m de trois échantillons respectifs contenant des effluents HA (Haute Activité).

6.3 Amont de l'étude

En amont, il est important de collecter toutes les données d'entrée nécessaire au lancement des calculs. Ces données sont les informations concernant le terme source, les caractéristiques géométriques et les configurations de calculs.

6.3.1 Caractéristiques radiologiques du terme source

Dans le cas du projet RECURE Na, le terme source retenu pour la colonne et les échantillons est un spectre 100 % ^{137}Cs . Le **tableau 6** ci-dessous présente le spectre d'émission gamma.

Énergie (MeV)	Indice de désintégration ($\text{Bq}^{-1}.\text{s}^{-1}$)
$6,62.10^{-1}$	$8,5.10^{-1}$

Tableau 6 : Spectre d'émission gamma

6.3.2 Caractéristiques géométriques

Ce projet demande des calculs à proximité d'une colonne, d'un sur-conteneur, d'un caisson pré-bétonné et de flacon. De plus, le sur-conteneur contient une poubelle avec une colonne à l'intérieur. Les caractéristiques géométriques de ces derniers sont présentées ci-après.

Géométrie	Hauteur interne (cm)	Diamètre interne (cm)	Epaisseur d'acier (cm)		
			Couvercle	Virole	Fond
Colonne	10	5	négligeable		
Poubelle	61,2	29	0,8	0,15	0,15
Sur-conteneur	63,35	36,3	0,5	0,1	0,15
Flacon	10,839	5,419	négligeable		

Tableau 7 : Caractéristiques géométriques

Le caisson présente les caractéristiques suivantes :

- longueur externe : 156 cm ;
- largeur externe : 156 cm ;
- hauteur externe : 142 cm.

Les caissons sont entourés par une protection en béton dont l'épaisseur sera dimensionnée dans cette étude.

Nota : Les caractéristiques externes du caisson pré-béton sont fixes, seules les caractéristiques internes varient en fonction de l'épaisseur de béton à considérer.

Trois volumes d'échantillons contenus dans les flacons sont étudiés : 2 mL, 10 mL et 100 mL. J'ai donc calculé la hauteur de chacun de ces échantillons à partir de la géométrie du flacon. Le **tableau 8** ci-dessous présente la hauteur de la source pour chaque échantillon.

Volume de l'échantillon (mL)	2	10	100
Hauteur de la source (cm)	0,087	0,434	4,335

Tableau 8 : Caractéristiques géométriques des flacons

De manière pénalisante, l'épaisseur du flacon est négligée.

6.3.3 Configurations de calculs et modélisations

La distance entre le point de calcul et la source est définie par le client contrairement à l'emplacement de ces derniers qui n'est pas identifié. Le but est donc de prendre en compte le point le plus pénalisant à la distance considérée. J'ai donc placé plusieurs points autour de mes configurations.

« *Tous les modèles sont faux, certains sont utiles* » (G. Box), qui illustre bien qu'un modèle n'est pas conçu pour être vrai et représenter parfaitement la réalité mais pour répondre à un besoin. Un modèle va décrire la réalité avec un certain filtre, en utilisant certains concepts permettant de classer la réalité observée.

Les calculs de DED gamma ont été réalisés à l'aide du code MERCURAD.

Après avoir réuni l'ensemble de mes données d'entrée, j'ai créé les modèles de calculs des configurations décrites dans les paragraphes ci-après.

6.3.3.1 Colonne

Pour la colonne seule contenant le ^{137}Cs , deux configurations de calculs sont étudiées :

- un calcul déterminant l'activité maximale en ^{137}Cs afin de respecter 10 mSv.h^{-1} à 3 m d'une colonne sans protection ;
- un calcul de DED au contact (5 cm) d'une colonne contenant une activité de 0,462 TBq.

La **figure 11** ci-dessous présente les configurations étudiées pour la colonne seule.

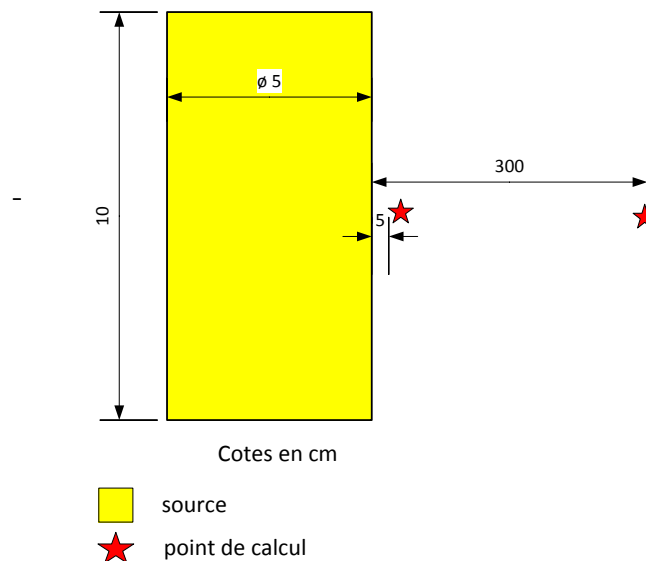


Figure 11 : Modélisation de la colonne

6.3.3.2 Sur-conteneur

Le sur-conteneur est utilisé car il constitue la seconde barrière de confinement du déchet. Ainsi, la poubelle contenue dans le sur-conteneur constitue la première barrière de confinement du déchet.

Pour le sur-conteneur, deux configurations de calculs sont étudiées :

- un calcul de DED au contact (5 cm) d'un sur-conteneur contenant une poubelle avec une colonne à l'intérieur à l'activité maximale de 3,2 TBq ;
- un calcul déterminant l'activité maximale contenue dans une colonne permettant de respecter un DED inférieur à 2 mSv.h^{-1} au contact (5 cm) d'un sur-conteneur contenant une poubelle avec une colonne à l'intérieur.

Pour chaque configuration, la colonne et la poubelle sont considérées centrées.

La **figure 12** ci-après présente la modélisation retenue pour les calculs.

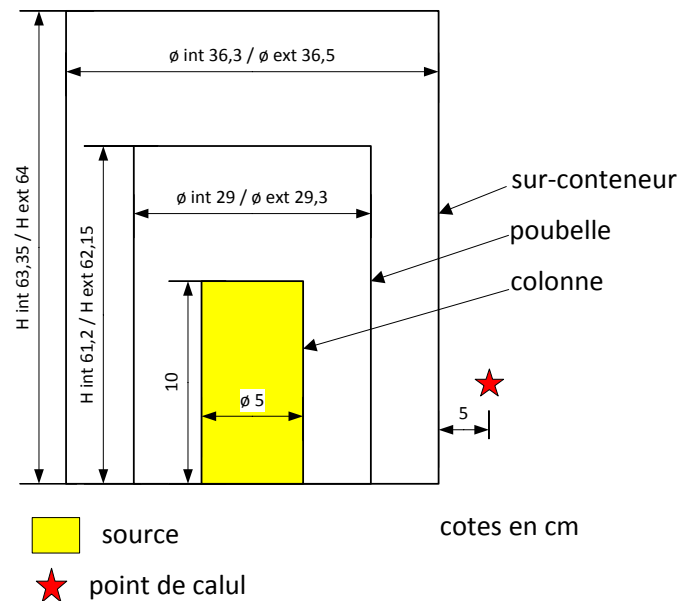


Figure 12 : Modélisation du sur-conteneur

La poubelle et le sur-conteneur sont en acier noir. La poubelle et la colonne sont considérées centrées.

6.3.3.3 Caisson pré-bétonné

Lors du transport des colonnes, il est important de déterminer le type de colis à utiliser pour respecter les limites réglementaire en termes de DED. Dans cette étude, le type de colis à considérer est un caisson pré-béton.

Les caissons pré-béton possèdent des épaisseurs de béton standardisées. Le calcul consiste à déterminer le caisson pré-bétonné permettant de recevoir 4 colonnes à une activité individuelle de 0,1 TBq et respectant un DED inférieur à 2 mSv.h⁻¹ au contact (5 cm).

Un caisson est chargé avec 4 paniers horizontaux. Nous avons donc une colonne par panier pour éviter de concentrer un point chaud en un point particulier du caisson. Les paniers sont utilisés pour favoriser l'enrobage des déchets et réduire le vide du caisson.

L'activité individuelle des colonnes (0,1 TBq) a été définie car elle représente la limite en activité ¹³⁷Cs dans un panier.

Deux caissons sont étudiés :

- un caisson pré-bétonné d'épaisseur 30 cm ;
- un caisson pré-bétonné d'épaisseur 40 cm.

Configuration n°1 :

La **figure 13** ci-dessous présente la modélisation relative à un caisson pré-bétonné d'épaisseur 30 cm.

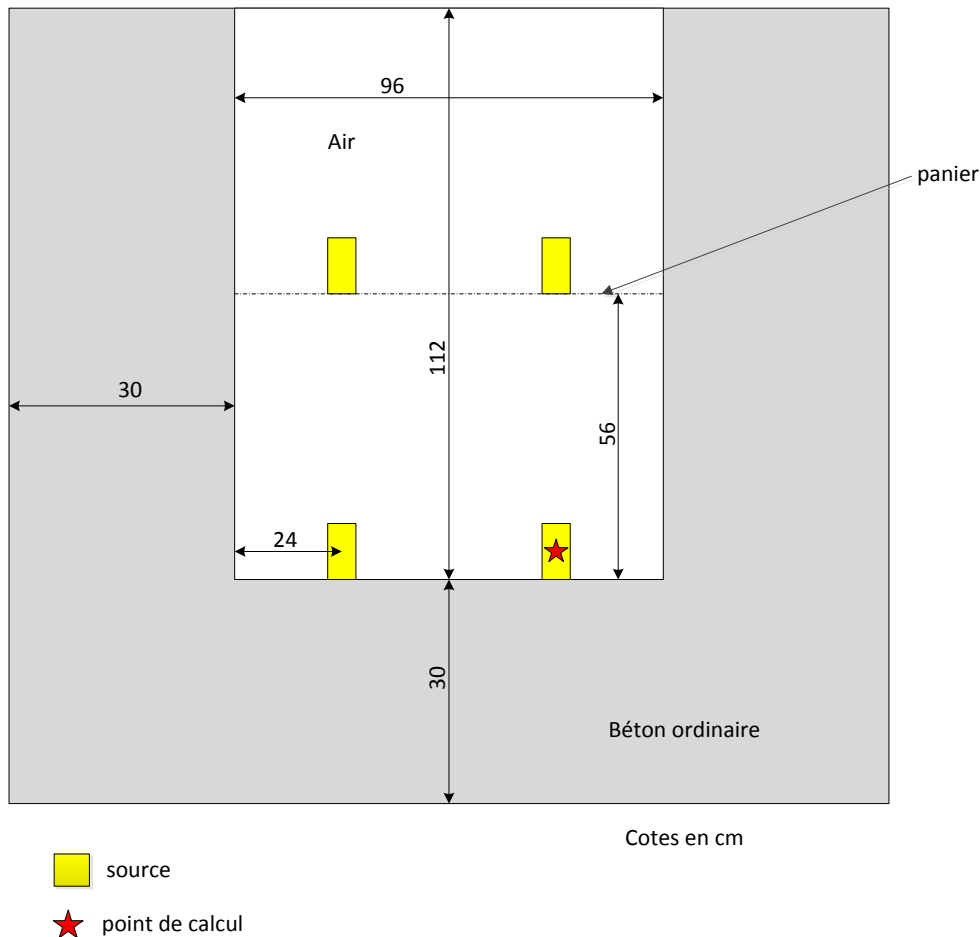


Figure 13 : Modélisation du caisson pré-bétonné d'épaisseur 30 cm

Le point de calcul est placé au contact (5 cm) du caisson pré-béton, à mi-hauteur de la source de l'une des colonnes. C'est le point le plus pénalisant.

Configuration n°2 :

La **figure 14** ci-après présente la modélisation relative à un caisson pré-bétonné d'épaisseur 40 cm.

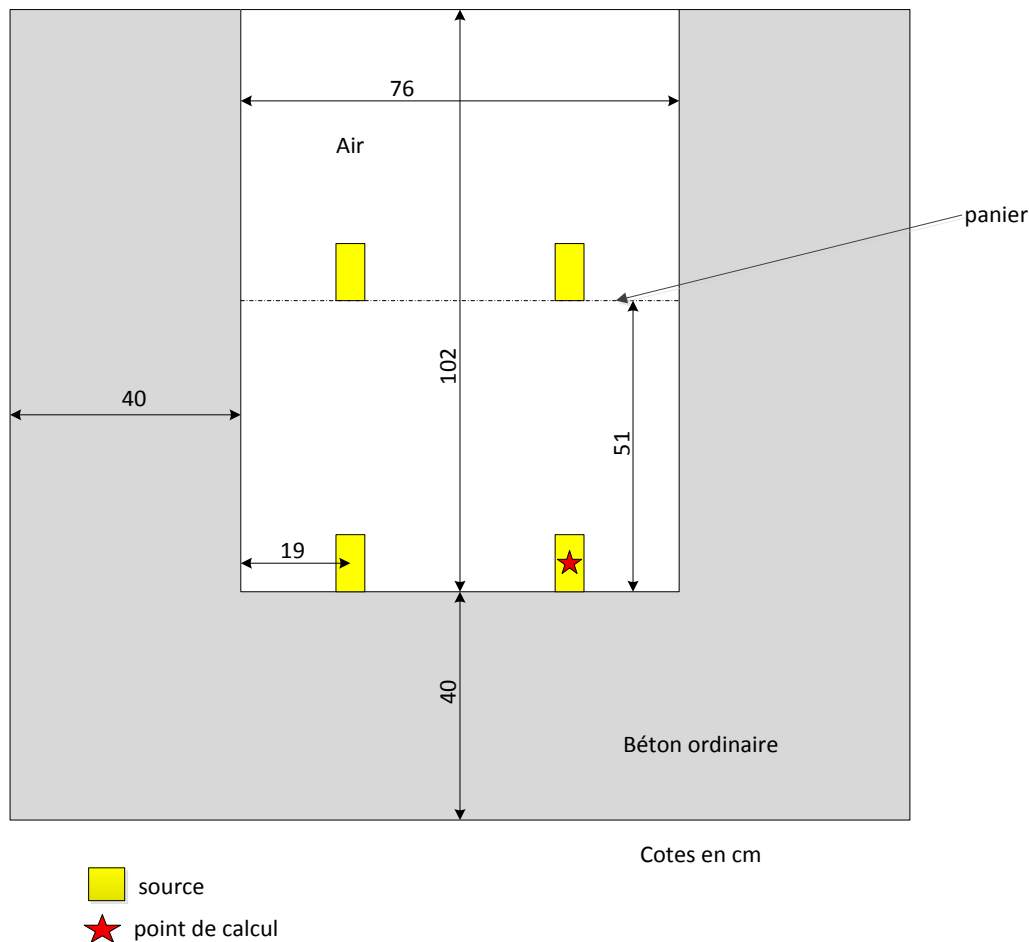


Figure 14 : Modélisation du caisson pré-bétonné d'épaisseur 40 cm

Le point de calcul est placé au contact (5 cm) du caisson pré-béton, à mi-hauteur de la source de l'une des colonnes. C'est le point le plus pénalisant.

6.3.3.4 Échantillon

Les échantillons sont contenus dans des flacons dont les caractéristiques géométriques sont présentées dans le **tableau 7**.

Le but est de calculer une estimation de DED à 1 m de trois volumes d'échantillon, vis-à-vis des contraintes de limite réglementaire de transport.

La **figure 15** ci-dessous présente la modélisation du calcul de DED à 1 m d'un flacon.

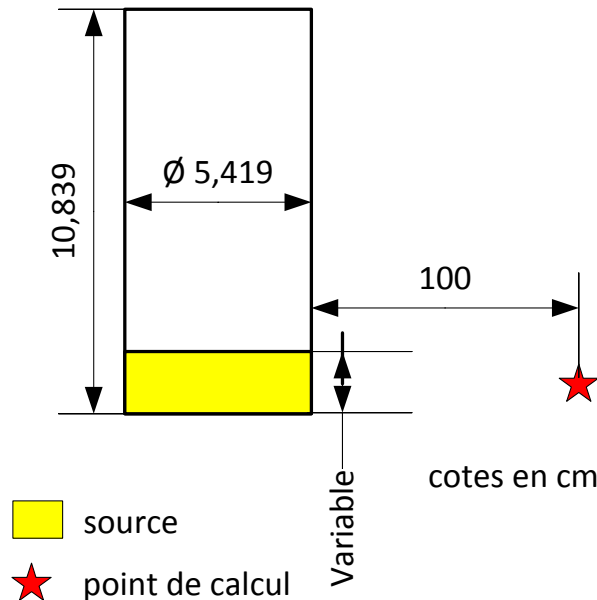


Figure 15 : Modélisation de l'échantillon

Cette modélisation a été étudiée pour des échantillons de 2 mL, 10 mL et 100 mL dont la hauteur de la source de chaque échantillon est présentée dans le **tableau 8**.

6.4 Résultats

6.4.1 Colonne

L'activité maximale en ^{137}Cs afin de respecter 10 mSv.h^{-1} à 3 mètres d'une colonne sans protection est de **1 TBq**.

Le DED au contact (5 cm) d'une colonne contenant une activité de 0,462 TBq est de **6,83 Sv.h⁻¹**.

6.4.2 Poubelle et sur-conteneur

Le DED au contact du sur-conteneur contenant la poubelle avec une colonne à l'intérieur à l'activité maximale en ^{137}Cs soit 3,2 TBq est de **5,17 Sv.h⁻¹**.

L'activité maximale contenue dans la colonne pour respecter un DED de 2 mSv.h^{-1} au contact du sur-conteneur est de **1,24 GBq**.

6.4.3 Caisson pré-bétonné

Le **tableau 9** ci-après présente les résultats des calculs de DED des caissons pré-bétonné d'épaisseur 30 et 40 cm.

Type caisson	Épaisseur béton	DED au contact (mSv.h ⁻¹)
Pré-bétonné 30	30 cm	3,56
Pré-bétonné 40	40 cm	0,60

Tableau 9 : Résultat de calcul de la configuration étudiée

Les résultats du tableau ci-dessus montrent que le critère de DED de 2 mSv.h⁻¹ au contact (5 cm) est respecté pour un **caisson pré-bétonné de 40 cm**.

6.4.4 Échantillon

Le **tableau 10** ci-dessous présente les résultats des calculs de DED réalisés.

	Point de calcul	DED (μSv.h ⁻¹)
Échantillon de 2 mL	1 m	0,055
Échantillon de 10 mL		0,275
Échantillon de 100 mL		2,74

Tableau 10 : Résultats de calcul des échantillons étudiés

Après avoir obtenu les résultats, j'ai rédigé une note technique présentée en **annexe F** reprenant l'ensemble des informations décrites précédemment.

Cette note sert de livrable au client. Elle concentre l'ensemble de l'étude réalisée. Elle est vérifiée puis validée avant d'être envoyée au client.

6.5 Conclusion

Les calculs effectués permettent, en interface avec les différents métiers, d'élaborer au mieux le projet en tenant compte des techniques et des coûts dont dispose le client.

Nos calculs ont donc un réel impact. Ils ont permis notamment de déterminer la filière de déchet la plus adaptée pour les colonnes en fonction des activités calculées. Mais aussi de déterminer le type de colis permettant de respecter les limites réglementaires de transport fournies ainsi que de réaliser des calculs de DED pour mesurer l'impact du travail à proximité de ces déchets et de mettre en place des moyens de protections tels que des épaisseurs de protection biologique pour atténuer le DED ou encore la manipulation des déchets à une certaine distance.

«La connaissance s'acquiert par l'expérience, tout le reste n'est que de l'information.»
(A. Einstein)

Conclusion

Conclusion du projet

Protéger le travailleur, compte tenu des risques encourus, passe d'abord par l'évaluation des risques, en prenant en compte les caractéristiques de la source d'émission et les conditions d'exposition des personnes. Cela passe également par l'application de mesures de prévention qui visent à maîtriser les risques d'exposition aux rayonnements ionisants.

C'est pourquoi les calculs de radioprotection sont effectués en amont pour répondre aux besoins liés aux risques d'exposition externe et ainsi permettre la mise en place de mesures de prévention adéquates pour protéger la santé des personnes et de l'environnement.

Afin de répondre aux attentes du service, j'ai dû travailler sur la problématique liée au rayonnement de freinage. En effet, il peut avoir une part importante dans le DED total. Pour évaluer avec précision le risque d'exposition externe, il peut donc être nécessaire de le prendre en compte dans les calculs de radioprotection.

Le développement de la méthodologie d'établissement des spectres d'émission gamma permettant de prendre en compte le rayonnement de freinage pour faire gagner du temps ingénieur au service et de prendre en compte le phénomène systématiquement a donc un véritable enjeu pour le service Calculs Sûreté.

Ce projet a permis de mettre en évidence que selon les cas rencontrés, le rayonnement de freinage pouvait être plus ou moins important et donc potentiellement impactés nos résultats de calculs. Cependant, il a été constaté que ce phénomène ne remettait pas en cause la sûreté des installations compte-tenu des marges de modélisation considérées. Après des recherches, nous avons réussi à développer un spectre satisfaisant pour le service dans le cas d'un milieu uranifère. Toutefois, le problème subsiste dans le cas d'un milieu non uranifère. Après avoir écarté de nombreuses pistes et avoir avancé considérablement sur le sujet, un travail d'investigation conséquent reste tout de même à réaliser.

En parallèle, le projet RECURE Na a permis de répondre aux besoins du client à travers de nombreux calculs. Le projet s'est divisé en plusieurs parties avec la collecte des données d'entrée, le lancement des calculs ainsi que la rédaction de la note technique. Cette note rassemble l'ensemble des éléments à prendre en compte dans cette étude.

Conclusion personnelle

D'un point de vue personnel, la réalisation de ce projet m'a été d'un grand apprentissage, et ceux pour différentes raisons.

Premièrement, la réalisation de différentes études de radioprotection, de la modélisation à la rédaction de la note technique, m'a permis de me former au métier d'ingénieur calculs de radioprotection et de prendre en main différents codes de calculs. Cela m'a également permis de synthétiser les données d'entrée avant le lancement des calculs. J'ai ainsi pu améliorer mon organisation et structurer mes fichiers Excel.

De plus, menant mon projet en autonomie, j'ai été contrainte de prendre de la hauteur sur la problématique. En effet, ce manque de recul dès le début de mon projet ainsi que le manque d'expérience a été contraignant pour avancer sur un sujet technique. Cependant, avec l'aide de mon tuteur entreprise que je remercie une nouvelle fois, j'ai pu acquérir le maximum d'expérience et à travers sa pédagogie, appréhender aux mieux certains phénomènes physiques. Aussi, ma tutrice universitaire que je remercie également une nouvelle fois, m'a permis de prendre plus de recul sur le sujet par ses nombreux conseils, ce qui m'a aidé à avancer davantage.

Enfin, la recherche d'une nouvelle méthodologie m'a permis d'acquérir des connaissances et des compétences en radioprotection en complément de ceux acquis lors de mes formations. Cela m'a permis de me poser les bonnes questions ce qui va m'aider pour la suite.

En outre, ces deux dernières années furent également enrichissantes de par le contenu varié et complet de la formation diplômante du Master IS-PRNT ainsi que par les enseignements de qualité des intervenants extérieurs et des professeurs.

Bibliographie

Documents :

- Manuel d'utilisation MCNP
- Manuel d'utilisation MERCURAD
- Enclenchement étude RECURE Na

Sites Internet :

- <http://www.orano.group/>
- <http://www.georisques.gouv.fr/>
- <http://www.laradioactivite.com/>
- <https://www.irsn.fr/>
- <https://www.asn.fr/>

Glossaire

Activité : L'activité d'une source radioactive se mesure en becquerels. L'activité est une grandeur représentant le nombre de désintégrations par seconde au sein d'une matière radioactive. Comme la désintégration d'un élément s'accompagne de rayonnement, plus l'activité mesurée est forte, plus il y a de rayonnements et donc d'énergie émise.

ALARA : « As Low As Reasonably Achievable » que l'on peut traduire en Français par « Aussi basse que raisonnablement possible ». Le principe ALARA est un des principes de base de la protection contre les rayonnements ionisants. L'objectif étant de réduire la dose individuelle et collective au sein des entreprises nucléaires.

BU : Business Units

CASPER : Création Automatisée de SPEctre de Rayonnements β^-

CSP : Centre de Spécialité Partagée

DC : Direction Centrale

DED : Débit d'Équivalent de Dose. C'est le Débit de quantité de dose absorbée, pondérée quant aux effets biologiques par des facteurs de qualité différents selon les rayonnements. S'exprime en Sievert par seconde (Sv/s).

Exposition externe : Exposition résultant de produits radioactifs situés en dehors de l'organisme.

Exposition interne : Exposition résultant de sources situées dans l'organisme.

MCNP : Monte Carlo N-Particle

Rayonnement ionisant : Processus de transmission d'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques (photons gamma) ou de particules (alpha, bêta, neutrons) capable de produire directement ou indirectement des ions en traversant la matière. Les rayonnements ionisants sont produits par des sources radioactives. En traversant les tissus vivants, les ions provoquent des phénomènes biologiques pouvant entraîner des lésions dans les cellules de l'organisme.

Tally : C'est un estimateur, qui enregistre une grandeur physique (flux de particule, énergie déposée, etc.) suivant le problème posé par l'utilisateur.

Terme source : C'est l'ensemble des radionucléides pouvant émettre des rayonnements ionisants et contribuant aux doses aux postes de travail.

UO₂ : Oxyde d'uranium.

U₃O₈ : Octaoxyde de triuranium. C'est un composé solide stable permettant de garantir des conditions d'entreposage de l'uranium plus sûres que sous forme liquide ou gazeuse

Annexes

Annexe A : Fichier de données d'entrée (gamma) MCNP du DV70

```

1 C
2 C =====
3 C Développement d'une méthodologie d'établissement des spectres d'émission gamma
4 C ..... DED GAMMA
5 C =====
6 C
7 C *****
8 C ..... CELLULE
9 C *****
10 C univers
11 1 0 999 ..... imp:p=0 $ Exterieur
12 C
13 2 1 -2.65 -1 ..... imp:p=1 $ source du DV70
14 3 3 -7.8 -2 1 ..... imp:p=1 $ épaisseur de fer autour du DV70
15 5 4 -1.0 -999 -9 ..... imp:p=1 $ terre
16 4 2 -1.3e-3 -999 2 #5 100 101 ..... imp:p=1 $ air autour du DV70
17 100 2 -1.3e-3 -100 ..... imp:p=1 $ point de calcul 50 cm en air
18 101 2 -1.3e-3 -101 ..... imp:p=1 $ point de calcul 5 m en air
19
20 C *****
21 C ..... SURFACES
22 C *****
23 C courbes de niveaux
24 1 rpp 0 161.5 0 134 0 157.5
25 2 rpp -0.4 161.9 -0.4 134.4 -0.4 157.9
26 9 PZ -0.4
27 C univers
28 999 rpp -1000 1000 -1000 1000 -1140 100000
29 C tally
30 100 S 80.75 -50.4 78.75 5 ..... $ position du point de calcul à 50 cm
31 101 S 80.75 -500.4 78.75 5 ..... $ position du point de calcul à 5 m
32
33 C *****
34 C ..... MATERIAUX
35 C *****
36 M1 92000 3 ..... 8000 8 ..... $ U308
37 M2 7000 -7.8848E-01 8000 -2.1152E-01 ..... $ Air
38 M3 26000 1 ..... $ Fer
39 M4 12000 -0.0054 ..... 25000 -0.0003 & ..... $ Terre en beton PMDS
40 ..... 8000 -0.5028 ..... 13000 -0.0382 &
41 ..... 82000 -0.0020 ..... 1000 -0.0050 &
42 ..... 17000 -0.0032 ..... 19000 -0.0114 &
43 ..... 14000 -0.2675 ..... 20000 -0.1144 &
44 ..... 11000 -0.0102 ..... 6000 -0.0218 &
45 ..... 26000 -0.0178
46 C *****
47 C ..... DEFINITION SOURCE
48 C *****
49 MODE P
50 PHYS:P J J 1 $ permet de modifier les traitements physiques utilisés
51 SDEF CEL=D1
52 ..... X=D2
53 ..... Y=D3
54 ..... Z=D4
55 ..... ERG=D6
56 ..... WGT=1
57 C
58 SI1 1 2 $ indique la cellule source
59 SP1 1
60 C
61 SI2 0 161.5 $ indique les coordonnées du DV70 en x
62 SP2 0 1
63 C
64 SI3 0 134 $ indique les coordonnées du DV70 en y
65 SP3 0 1
66 C

```

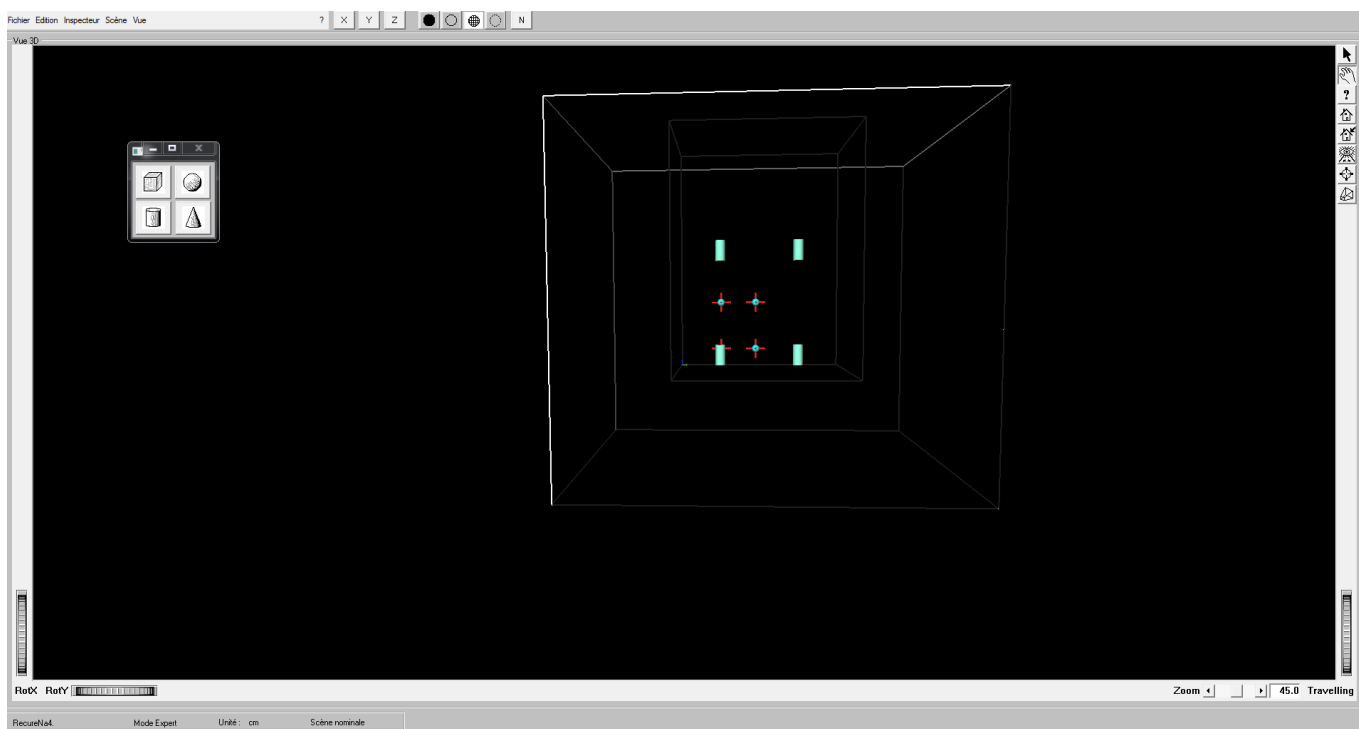
Annexe A : Fichier de données d'entrée (gamma) MCNP du DV70 (suite)

```

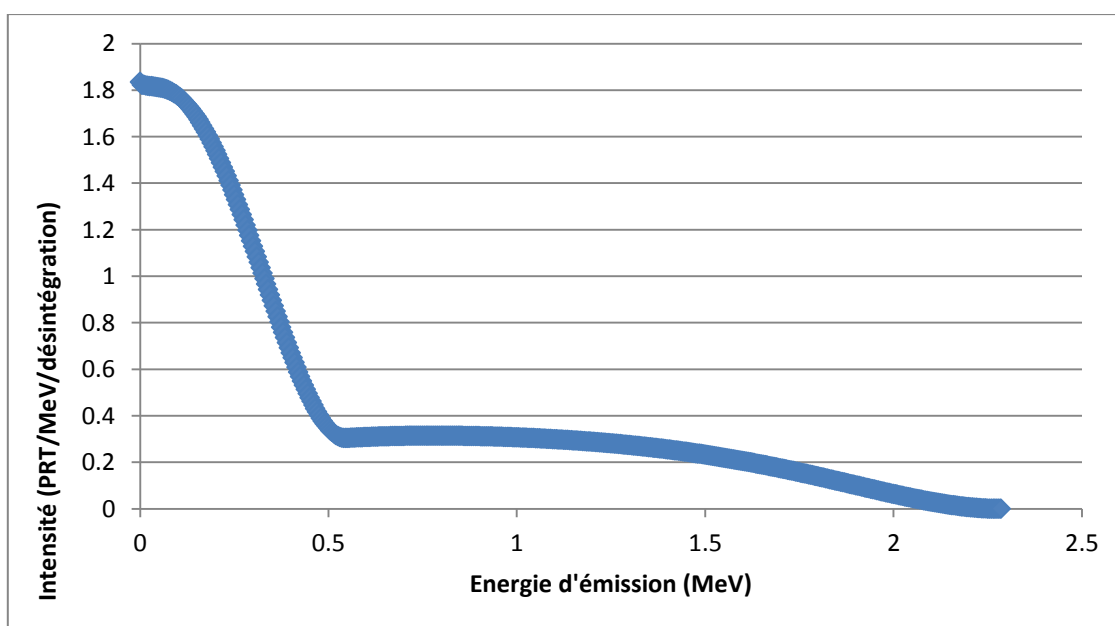
66 C$
67 SI4 0 157.5 -$ indique les coordonnées du DV70 en z$
68 SP4 0 1$
69 C$
70 #... SI6 ..... SP6 ..... $ indique le spectre d'émission gamma$
71 ..... L ..... D$
72 --1.50E-02--4.92E-08$
73 --2.50E-02--4.79E-07$
74 --3.75E-02--3.55E-07$
75 --5.75E-02--7.15E-07$
76 --8.50E-02--2.05E-06$
77 --1.25E-01--8.47E-06$
78 --2.25E-01--7.79E-06$
79 --3.75E-01--8.99E-06$
80 --5.75E-01--9.93E-06$
81 --8.50E-01--4.90E-06$
82 --1.25E+00--1.66E-06$
83 --1.75E+00--1.19E-07$
84 --2.25E+00--0.00E+00$
85 --2.75E+00--0.00E+00$
86 --3.50E+00--0.00E+00$
87 --5.00E+00--0.00E+00$
88 --7.00E+00--0.00E+00$
89 --9.50E+00--0.00E+00$
90 C$
91 C *****$
92 C ..... TALLIES .....$
93 C *****$
94 C$
95 C e0 0 398i 4$
96 C$
97 C *facteurs conv. Flux / Equivalent dose H*10(µSv/h) CIPR74 *$
98 C$
99 de0 lin 1.00E-02 1.50E-02 2.00E-02 3.00E-02 4.00E-02 &$
100 ..... 5.00E-02 6.00E-02 8.00E-02 1.00E-01 1.50E-01 &$
101 ..... 2.00E-01 3.00E-01 4.00E-01 5.00E-01 6.00E-01 &$
102 ..... 8.00E-01 1.00E+00 1.50E+00 2.00E+00 3.00E+00 &$
103 ..... 4.00E+00 5.00E+00 6.00E+00 8.00E+00 1.00E+01$
104 df0 lin 2.1960E-04 2.9880E-03 3.7800E-03 2.9160E-03 2.3040E-03 &$
105 ..... 1.9800E-03 1.8360E-03 1.9080E-03 2.1960E-03 3.2040E-03 &$
106 ..... 4.3200E-03 6.4800E-03 8.5680E-03 1.0548E-02 1.2384E-02 &$
107 ..... 1.5768E-02 1.8720E-02 2.4840E-02 3.0960E-02 3.9960E-02 &$
108 ..... 4.8240E-02 5.5800E-02 6.3360E-02 7.7760E-02 9.2160E-02$
109 C$
110 F4:P 100$
111 FC4 axe 50cm$
112 C$
113 F14:P 101$
114 FC14 axe 5m$
115 C$
116 C *****$
117 C ..... PARAMETRES DE CALCUL .....$
118 C *****$
119 NPS 2.0E+09 -$ indique le nombre de particule maximum$
120 PRINT 10 30 40 50 60 110 120 126 130 160 170 $ indique les tables à faire apparaître dans le fichier de sortie$
121 PRDMP J J J 5 $ permet de sauver les résultats intermédiaires$
122 $
123

```

Annexe B : Modélisation MERCURAD



Annexe C : Spectre d'émission bêta complet

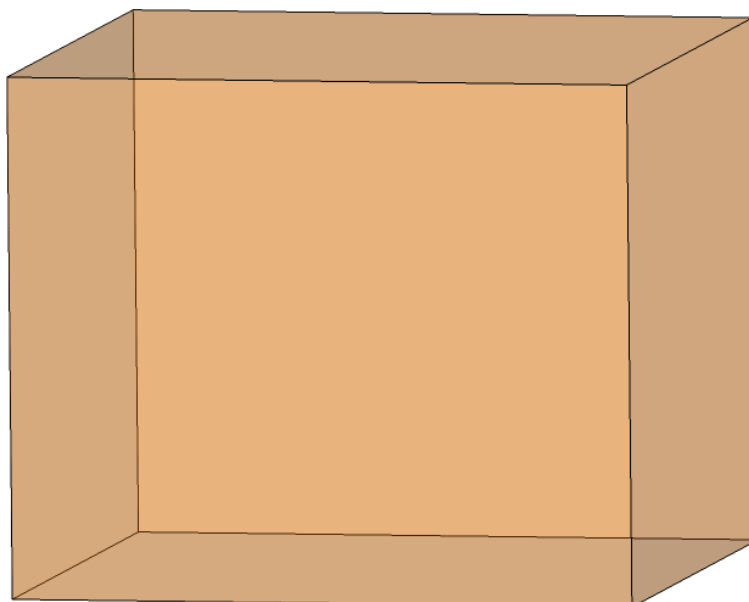


Annexe D : Rayon présentant le plus de rayonnement de freinage retenu pour chaque milieu

Milieu	Géométrie	Rayon de la sphère (en cm)
Eau	Cuve	24
Boues	Réacteur procédé	22
Nitrate	Cuve	14
UO ₂	Fût	12
Eau	Fût	24
U ₃ O ₈	DV70	8
Hexafluorure d'uranium	Cylindre 30B	8
Poudre de titanate de strontium	Capsule	8

Annexe E : Caractéristiques géométriques

1. DV70



2. Cylindre 30B



Annexe E : Caractéristiques géométriques (suite)

3. Fût



4. Cuve

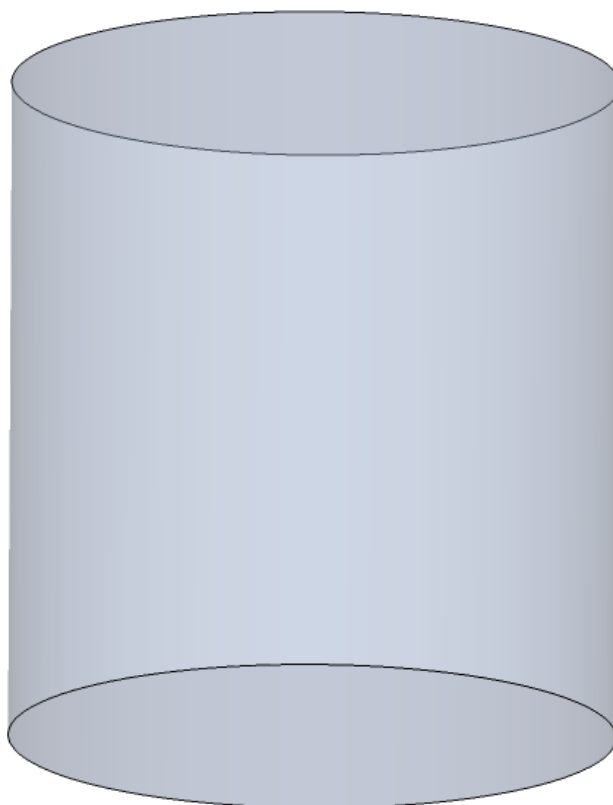


Annexe E : Caractéristiques géométriques (suite)

5. Capsule



6. Réacteur procédé



Annexe F : Note technique



DIFFUSION LIMITEE

OP

Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision
XXX	000000	00	0000	A

REF

CLIENT

Page : 1 / 24

NOTE TECHNIQUE

RECURE Na Synthèse des calculs de DED

CARACTERISANTS D'INSTALLATION	
UNITE CHAINE	
REPERE EQUIPEMENT	
BATIMENT BLOC	
NIVEAU	
SALLE	
SECTEUR (site)	
AIRE (site)	
CODE ARTICLE	
CARACTERISANTS CLIENT	
RESERVE CLIENT	
RESERVE CLIENT	
RESERVE CLIENT	
RESERVE CLIENT	

Rév.	Rédaction	Vérification	Approbation
A	A. CHOUOU	A. HUGUES	J. J

Orano Projets
GA 1278 Rev.D – 03.20

Page 52 sur 55

L'information contenue dans ce mémoire est la propriété d'ORANO
La reproduction et la rediffusion sont interdites.

Annexe F : Note technique (suite)



orano

DIFFUSION LIMITEE

OP

CLIENT

Type Doc.	Activité	Cal.MT	N° Ordre	Révision
XXX	000000	00	0000	A

REF

REF

Page : 3 / 24

SOMMAIRE

1	OBJET	5
2	DONNEES DE BASE.....	6
2.1	CARACTERISTIQUES RADIOLOGIQUES DU TERME SOURCE	6
2.2	CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES	6
2.2.1	Colonne.....	6
2.2.2	Poubelle LECA PV2E	6
2.2.3	Sur-conteneur LECA SCV2C	7
2.2.4	Caisson pré-bétonné.....	7
2.2.5	Échantillon.....	7
2.3	CONFIGURATIONS DE CALCULS.....	8
2.3.1	Colonne.....	8
2.3.2	Poubelle LECA PV2E et sur-conteneur LECA SCV2C.....	9
2.3.3	Caisson pré-bétonné.....	10
2.3.4	Échantillon.....	12
3	MOYEN DE CALCUL	15
4	MODELISATION.....	16
4.1	COLONNE	16
4.2	POUBELLE LECA PV2E ET SUR-CONTENEUR LECA SCV2C	16
4.3	CAISSON PRE-BETONNE.....	17
4.4	ÉCHANTILLON.....	18
4.5	MATERIAUX	19

Orano Projets
GA 1278 Rev.D - 03.20

OP	Type Doc. Activite CalMT N° Ordre Revision	REF
	XXX 000000 00 0000 A	
CLIENT		REF

5	RESULTATS.....	20
5.1	COLONNE	20
5.2	POUBELLE LECA PV2E ET SUR-CONTENEUR LECA SCV2C	20
5.3	CAISSON PRE-BETONNE.....	20
5.4	ÉCHANTILLON.....	21
6	CONCLUSION	22
7	REFERENCES.....	23

Page 54 sur 55



Faculté
de Pharmacie
Aix-Marseille Université



C F A
É P U R E
M É D I T E R R A N É E

Faculté de Pharmacie | 27, boulevard Jean Moulin | 13005 Marseille
+33 (0)4 91 83 55 33 | www.master-prnt.com

Résumé

À travers ce mémoire, vous découvrirez mes deux projets qui concernent le développement d'une méthodologie d'établissement des spectres d'émission gamma prenant en compte le rayonnement de freinage pour les études de radioprotection et l'étude sur le projet RECURE Na.

Le développement de la nouvelle méthodologie a un réel intérêt à répondre aux besoins du service CSP36 car elle leur permettrait de gagner du temps lors de leurs différents projets et de pouvoir prendre en compte le rayonnement de freinage sans les négliger.

Le développement de cette méthodologie via MCNP a permis d'obtenir des résultats concluants en milieu uranifère. Toutefois, en milieu non uranifère les résultats ne sont pas satisfaisants. En effet, le milieu a un réel impact sur notre méthodologie. Le projet a permis d'écarter plusieurs pistes mais il doit encore faire l'objet d'investigations.

En parallèle, j'ai réalisé l'étude sur le projet RECURE Na. Cette étude s'est déroulée en plusieurs phases. Une première qui consistait à collecter les données d'entrée fournie par différents métiers. Par la suite, le lancement des calculs ainsi que le traitement des résultats. Et enfin, la rédaction de la note technique.

Mots clés : étude de radioprotection, rayonnement de freinage, spectre d'émission gamma, MCNP

Abstract

Through this thesis, I will introduce my two projects which concerns the development of a methodology for establishing gamma spectra taking into account the braking radiation for radiation protection studies and the study of the RECURE Na project.

The development of the new methodology has a real interest for the CSP36 service because it will increase efficiency during their various projects. Indeed, the goal is to be able to take into account the braking radiation without neglecting them.

The methodology was developed with MCNP and conclusive results were obtained for sources in uranium. However, for sources which were not represented by uranium, the results are not as satisfying as wishes. Indeed, the medialization of the source has a real impact on our methodology. The project has ruled out several leads but it still needs to be investigated.

In parallel, I carried out the study for the RECURE Na project. This study took place in several phases. First of all, I needed to collect the input data provided by different services. Then, I realized calculations and the analyses of results. And finally, I had to write the technical note.