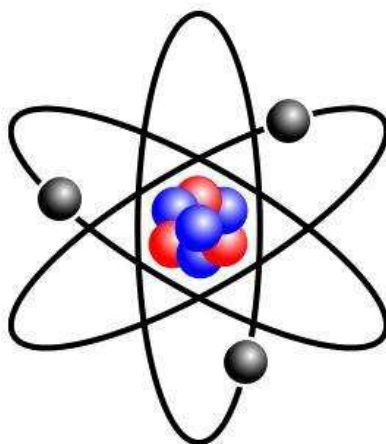


Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex



Rapport de stage ROPERS Jean-Baptiste

Master 2 Contrôle de l'Environnement Industriel

Tuteur : LECOQ Dominique

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	
ROPERS Jean-Baptiste		

Remerciements

Je tiens tout particulièrement à remercier et à témoigner toute ma reconnaissance aux personnes suivantes, pour ce stage enrichissant et pleins d'intérêts, qu'elles m'ont permis de vivre durant mes quatre mois d'immersion au sein du secteur DQSSE/RI à AREVA NC La Hague :

- Monsieur KRAMAR Raymond, responsable du secteur DQSSE/RI, pour son accueil et de m'avoir accepté en tant que stagiaire.
- Monsieur LECOQ Dominique, mon responsable de stage, mais également responsable d'activité radioprotection RM, pour m'avoir accepté comme stagiaire et de m'avoir permis de m'intégrer rapidement au secteur, de m'avoir accordé toute sa confiance durant ces quatre mois, pour le temps qu'il m'a consacré tout le long de cette période, sachant répondre à toutes mes interrogations et également d'avoir participer à la relecture de ce rapport.
- Monsieur SIMON Thierry, responsable adjoint d'activité radioprotection RM, pour le temps qu'il m'a consacré durant mon immersion, pour avoir suivi et participé au déroulement du stage, pour le temps qu'il m'a consacré tout le long de mon stage et pour avoir pris le temps de relire ce rapport de stage.
- Monsieur LOPEZ Gérald, radioprotectionniste mais également créateur du code DOSIMEX et enseignant en radioprotection, pour m'avoir suivi et conseillé tout le long de mon stage, pour son aide notamment dans la compréhension de la physique que l'on trouve dans les logiciels déterministes de radioprotection, pour m'avoir formé aux mesures de débit d'équivalent de dose et au contrôle de contamination en sortie de zone de nucléaire. Je tiens également à le remercier d'avoir pris le temps de relire ce rapport et d'avoir répondu à toutes mes interrogations.
- Les membres de l'équipe de radioprotection RM, pour m'avoir intégré à leur groupe, pour m'avoir encouragé durant la réalisation de ce travail, sachant répondre à toutes mes interrogations.

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	
ROPERS Jean-Baptiste		

Introduction	1
1 Présentation de l'entreprise	2
1.1 AREVA.....	2
1.2 AREVA NC La Hague	2
1.2.1 Les activités industrielles du site	3
1.3 Présentation du secteur DQSSE/RI.....	3
1.3.1 Ses principales missions	3
1.3.2 Son organisation	4
2 Présentation de l'usine UP2 400 et de son démantèlement	5
2.1 Présentation de l'usine UP2 400	5
2.2 L'atelier HA/DE.....	5
2.2.1 Ses missions	5
2.2.2 Les missions du SPR	6
2.2.3 Les besoins de simulation en radioprotection.....	7
3 Présentation et comparaison du mode de fonctionnement des deux logiciels.....	8
3.1 Principe général de fonctionnement et Interface Homme Machine	8
3.1.1 Interface Homme Machine sur Dosimex.....	8
3.1.2 Interface Homme Machine sur Microshield.....	10
3.1.3 Conclusion Interface Homme Machine sur les deux logiciels	12
3.2 Principe de calcul	13
3.2.1 Les grandeurs radiométriques.....	13
3.2.1.1 Le débit de fluence	13
3.2.1.2 Le débit de Kerma dans l'air.....	14
3.2.2 Les grandeurs de protection.....	15
3.2.3 Les grandeurs opérationnelles	15
3.3 Les protections biologiques	17
3.3.1 Définitions	17
3.3.1.1 Interaction des photons dans les écrans	17
3.3.1.2 Correction avec Facteur de Build Up.....	18
3.4 Cas de sources non ponctuelles.....	18
3.5 Conclusion	19
4 Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex sur des scénarii théoriques	20
4.1 Influence de la base de données	20
4.2 Influence de la distance	21
4.2.1 Cas d'une source ponctuelle	21
4.2.2 Cas d'une source fil	21
4.2.3 Conclusion	22

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	
ROPERS Jean-Baptiste		

4.3 Influence du découpage	22
4.3.1 Effet sur l'auto-absorption	22
4.3.2 Effet sur le Build Up Factor	24
4.4 Conclusion des études théoriques	24
5 Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex sur le scénario de démantèlement du dissolvant	25
5.1 Présentation de l'équipement du dissolvant cellule 906 B, ses risques radiologiques et son spectre caractéristique.....	25
5.1.1 Présentation de l'équipement du dissolvant cellule 906 B.....	25
5.1.2 Les risques radiologiques associés au dissolvant.....	25
5.1.3 Le spectre associé au dissolvant 222-51	26
5.2 Etude des cartographies et recherche des termes sources	27
5.2.1 Mesures sur le terrain et étude des cartographies.....	27
5.2.2 Mise en évidence des termes sources.....	28
5.3 Calcul des activités des termes sources	28
5.3.1 Calculs sur Dosimex.....	28
5.3.2 Calcul sur Microshield	29
5.3.3 Conclusion de l'étude des termes sources	30
5.4 Simulation du débit d'équivalent de dose au poste de travail pour six configurations du dissolvant	31
5.4.1 Présentation des six configurations	31
5.4.2 Résultats des simulations pour les six configurations et comparaison aux mesures au poste de travail	32
5.4.2.1 Résultats des simulations et origine des écarts	32
5.4.2.2 Comparaison des simulations avec les mesures H*(10) au poste de travail	33
5.4.2.2.1 Comparaison entre simulations et mesures	33
5.5 Conclusion de l'étude du dissolvant	34
6 Présentation des fonctions de calculs proposées par Microshield et Dosimex	35
6.1 Option Dosimex.....	35
6.1.1.1 Estimation du débit d'équivalent de dose du au rayonnement de freinage d'une source bêta avec Dosimex.....	36
6.1.1.2 Estimation d'une contamination surfacique pour la piscine 907	36
6.1.2 Option Microshield.....	37
7 Conclusions des comparaisons	39
Conclusion	41
Bibliographie	42
ANNEXE 1 : Démonstration du débit de fluence	43
ANNEXE 2 : Coefficients de conversion de l'ICRU 57.....	45

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	
ROPERS Jean-Baptiste		

ANNEXE 3 : Table de Build Up Factor de Taylor pour l'eau	46
ANNEXE 4 : Démonstration du débit de dose émis par une source fil isotrope.....	47
ANNEXE 5 : Spectre du Dissolveur	49
ANNEXE 6 : Dimensions de la capsule contenant la source scellée de ⁹⁰ Sr.....	50

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	
ROPERS Jean-Baptiste		

Introduction

Dans le cadre de ma deuxième année de Master professionnel « Contrôle de l'Environnement Industriel » à l'université de Caen Basse-Normandie, j'ai eu la chance de réaliser un stage du 2 février au 29 mai 2015, dans le secteur DQSSE/RI d'AREVA NC La Hague. Intéressé par la radioprotection depuis que j'ai découvert la physique de l'Interaction Rayonnement Matière en première année de Master Physique à Caen, ce stage est pour moi une occasion de mettre en pratique, d'un point de vue professionnel, les connaissances en physique nucléaire et en radioprotection que j'ai acquises durant mon cursus universitaire et de les appliquer sur des cas concrets de démantèlement.

L'objectif fixé avec mon tuteur industriel est de comparer sur des sources simples dites « théoriques » puis sur un cas concret de démantèlement, les calculs de doses fournis par deux logiciels, Dosimex et Microshield, afin de déterminer lequel des deux est le plus adapté à la simulation en radioprotection de terrain pour le démantèlement d'installations nucléaires en terme de fiabilités des résultats et de faciliter d'utilisation.

Dans un premier temps, je vais vous présenter l'entreprise, ses activités et le lieu où j'ai effectué ce stage, puis dans une seconde partie, une présentation des deux logiciels sera effectué. Dans un dernier temps, j'aborderai ma mission et les résultats que j'ai obtenu. Enfin je dresserai un bilan global de ce stage en mettant en avant les compétences que j'ai pu développer et l'expérience que j'ai acquis durant mon immersion.

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 1/50
ROPERS Jean-Baptiste		

1 Présentation de l'entreprise

1.1 AREVA

Le groupe AREVA, un des principaux acteurs du nucléaire dans le monde, propose aux électriciens une offre qui couvre toutes les étapes du cycle du combustible, la conception et la construction de réacteurs nucléaires ainsi que les services pour leur exploitation.

Le groupe participe aussi à la mise en place des énergies renouvelables (éolien, solaire, bioénergies, hydrogène et stockage). Ainsi AREVA et ses 45000 collaborateurs contribuent à bâtir le modèle énergétique de demain : fournir au plus grand nombre une énergie toujours plus sûre avec moins de CO₂.

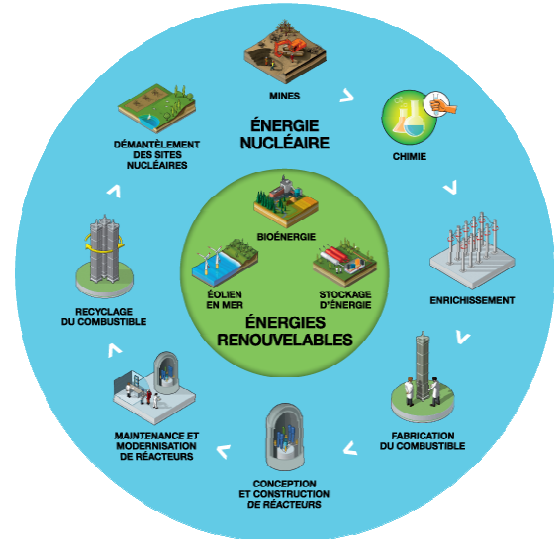


Image n°1 : Activités du groupe AREVA

La gouvernance d'AREVA SA s'articule autour d'un Conseil d'Administration et de ses Comités Spécialisés. Ces instances supervisent et pilotent les activités du groupe, elles sont divisées en cinq Business Group (BG), une Direction opérationnelle et trois Directions complémentaires :

- BG Aval
- BG Mines
- BG Amont
- BG Réacteurs et services
- BG Energies renouvelables
- Direction opérationnelle Ingénieries & Project
- Direction commerciale
- Directions fonctionnelles
- Directions régionales (Allemagne, Asie et Amérique du Nord)

Le chiffre d'affaires consolidé du groupe s'établissait à 9 240 millions d'euros en 2013.

1.2 AREVA NC La Hague

L'Etablissement d'AREVA NC La Hague fait partie de la BG Aval. Elle est composée de trois usines Unité de Production : UP2-400, UP2-800 et UP3.

UP2-800 et UP3 sont en cours d'exploitation et ont pour but la valorisation des combustibles usés, elles font partie de la BU Recyclage.



Image n°2 : Vue du ciel du site AREVA NC La Hague

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 2/50
ROPERS Jean-Baptiste		

UP2-400 fait partie de la BU Valorisation car elle est en cours de démantèlement. L'usine de la Hague est implantée sur la pointe Nord-Ouest de la presqu'île du Cotentin dans la Manche. Elle est située à une vingtaine de kilomètres de Cherbourg et s'étend sur 270 hectares, 2,7 km de long sur 850 m de large et un périmètre de 13 km.

1.2.1 Les activités industrielles du site

L'usine AREVA la Hague a pour objectif de traiter (pour les recycler) les combustibles nucléaires usés provenant des centrales nucléaires. Une fois sortie des réacteurs, les combustibles usés contiennent des résidus inutilisables (produit de fission et des actinides mineurs 4%) et des produits valorisables (Uranium 95% et Plutonium 1%).

Les clients d'AREVA NC confient leur combustible usé pour :

- séparer les différents composés des combustibles usés ;
- récupérer les matières Uranium et Plutonium valorisables ;
- Extraire les matières non valorisables (déchets ultimes) afin de les conditionner pour leur stockage.

Les étapes du retraitement du combustible usé sont présentées sur l'image suivante:

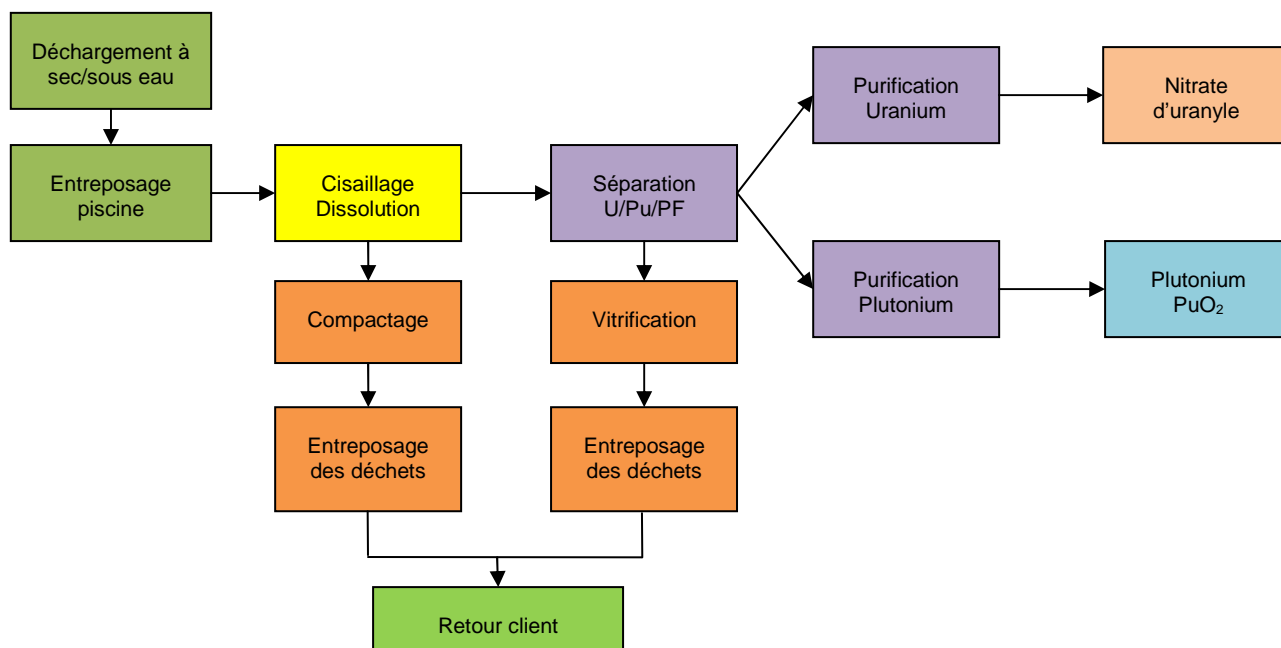


Image n°3 : Schéma du principe de fonctionnement de l'usine d'AREVA La Hague

1.3 Présentation du secteur DQSSE/RI

1.3.1 Ses principales missions

Le secteur auquel j'étais rattaché durant mon stage sur l'usine d'AREVA NC à la Hague appartient à la direction DQSSE et assure les missions de radioprotection sur les installations

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 3/50
ROPERS Jean-Baptiste		

Elle a pour principales missions de :

- Réaliser la surveillance radiologique des installations ;
- Veiller au respect des consignes de radioprotection par les intervenants
- Définir les conditions d'intervention (protections, moyens de contrôle, port de tenue...)
- Former les intervenants à la radioprotection
- Gérer les sources radioactives
- Contrôler le bon fonctionnement des appareils de mesures de radioprotection

1.3.2 Son organisation

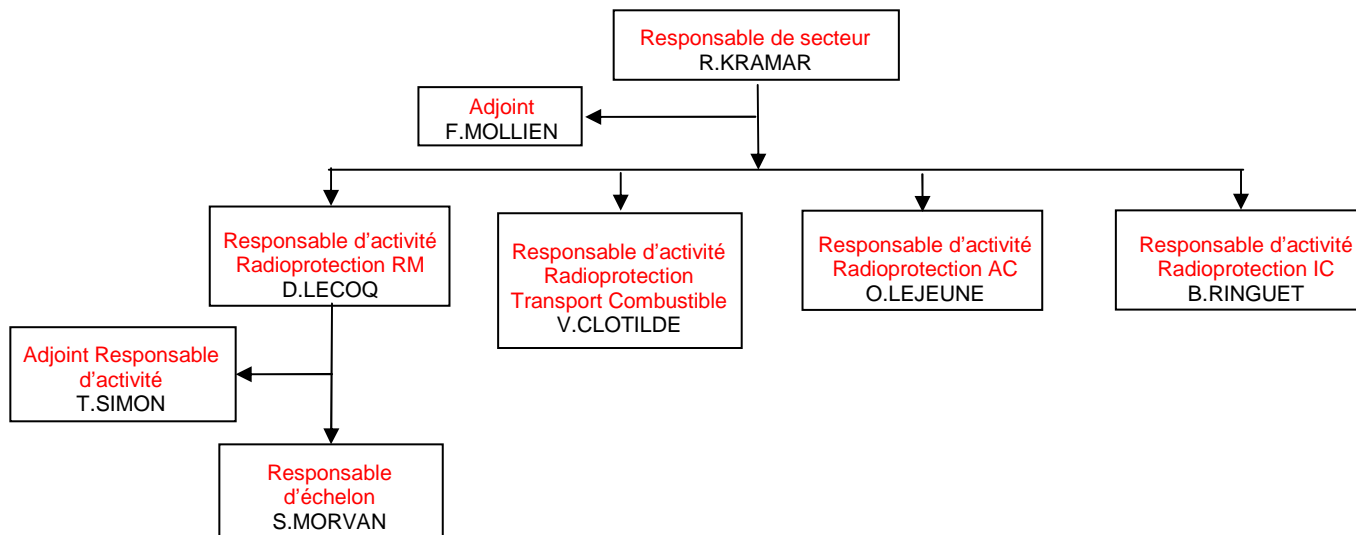


Image n°4 : Organisation du secteur DQSSE/RI

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 4/50
ROPERS Jean-Baptiste		

2 Présentation de l'usine UP2 400 et de son démantèlement

2.1 Présentation de l'usine UP2 400

Construite en 1967 sur le site de la Hague, UP2 400 avait pour fonction de réceptionner, d'entreposer et de traiter les combustibles irradiés des réacteurs électronucléaires des filières Uranium graphite gaz (UNGG) et Eau légère. Elle était composée de trois INB (Installations Nucléaire de Base) et avait pour objectif de séparer les différents composés radioactifs contenus dans les barreaux de combustibles irradiés. Les produits de fission, l'Uranium et le Plutonium y étaient séparés par différents procédés physico-chimiques.

Suite à la mise en service des usines UP3 en 1990 et UP2 800 en 1994, ayant des techniques de traitement plus évoluées, l'usine UP2 400 a été mise à l'arrêt le 30 décembre 2003, après 35 ans de production. A ce jour, cette usine est toujours en cours de démantèlement dont la fin des travaux est estimée pour 2030.

2.2 L'atelier HA/DE

2.2.1 Ses missions

L'atelier Haute Activité-Dissolution-Extraction (HA/DE) avait pour fonction de séparer Uranium/Plutonium et les produits de fission (PF).

Il est découpé en différentes Unités ayant un rôle bien particulier lors du recyclage du combustible.

Description générale du procédé

Pelage unité 221 : Cette unité avait pour fonction de débarrasser de leur gaine de magnésium les barreaux de combustibles type gaz à traiter.

Dissolution unité 222 : Une fois débarrassés de leur gaine, les barreaux d'uranium irradiés sont dissous en continu dans de l'acide nitrique maintenu à ébullition. Cependant, cette réaction chimique dégage des vapeurs nitreuses, c'est pour cela que cette unité comporte une installation pour le traitement des gaz.

Filtration unité 223 : Les solutions provenant de la dissolution subissent une décantation et une filtration avant d'être envoyées à l'unité 231.

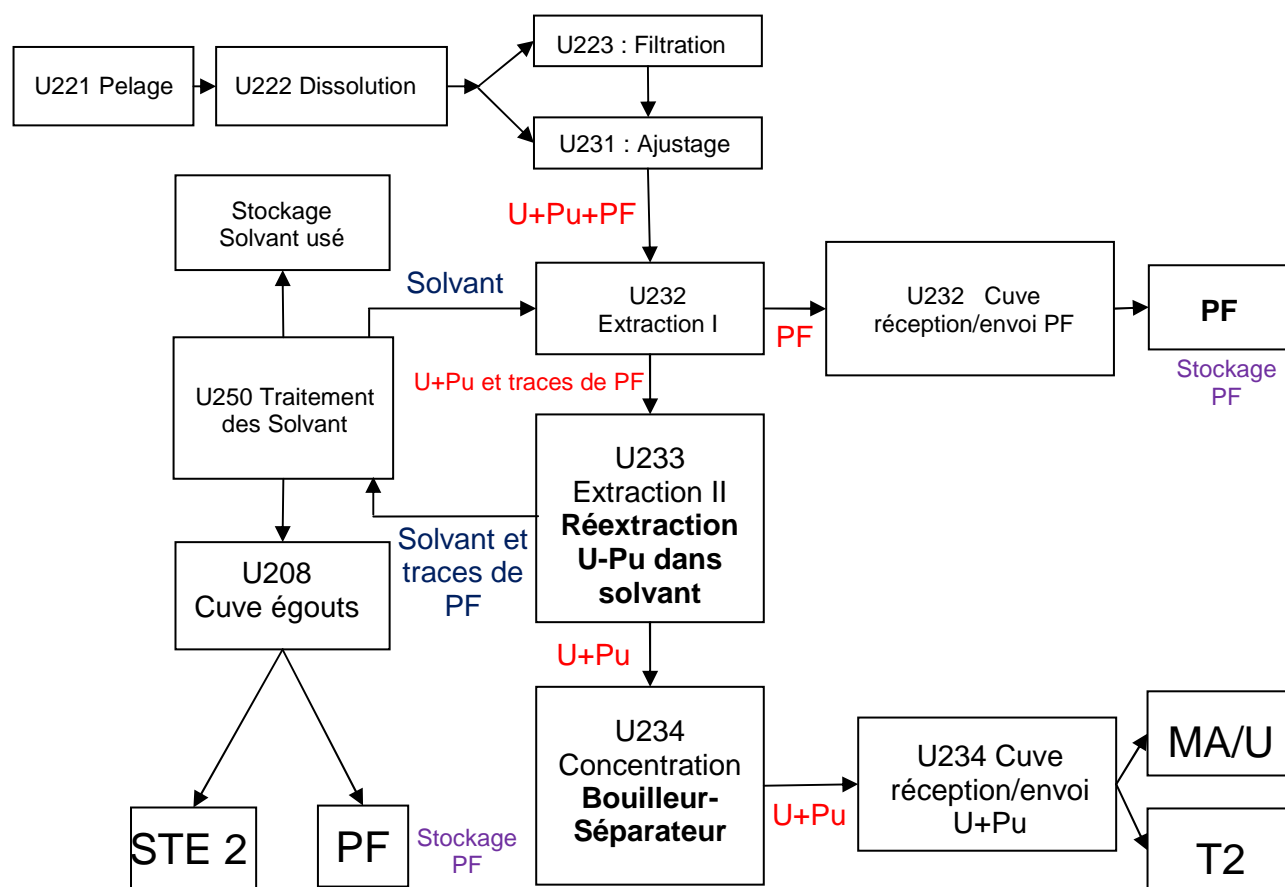
Ajustage unité 231 : Elle a pour fonction d'assurer l'homogénéisation de la solution, de l'ajuster et permet d'effectuer le bilan d'entrée.

Extraction I unité 232 : Cette unité a pour but d'extraire sélectivement par du solvant, les nitrates d'Uranium et de Plutonium de la solution nitrique et de séparer l'Uranium et le Plutonium du Produit de fission.

Extraction II unité 233 : Elle permet de remettre en solution nitrique, l'Uranium et le Plutonium à partir du solvant « chargé » sortant de l'extraction I.

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 5/50
ROPERS Jean-Baptiste		

Concentration Unité 234 : La solution nitrique sortant de l'extraction II est fortement diluée. Le rôle de cette unité est de concentrer par évaporation la solution pour permettre son traitement dans le bâtiment MA/U.



Radiamètre	Contaminamètre (ictomètre+ sonde)
Babyline FH40 Teletector CRAMAL (rayonnement neutronique)	CAB (Contrôleur Alpha Béta) IPAB (Ictomètre Portable Alpha Béta) MIP (Mini Ictomètre Portable)

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 6/50
ROPERS Jean-Baptiste		



Image n°6 : Babyline



Image n°7 : FH-40



Image n°8 : Teletector



Image n°9 : Sonde CAB

La quantification peut selon les circonstances passer par de la modélisation radiologique.

2.2.3 Les besoins de simulation en radioprotection

Certaines opérations vont conduire au fil du temps à une évolution du risque radiologique. Bien que ce risque soit mesuré en temps réel par un agent de radioprotection pendant l'intervention, cette évolution se doit d'être anticipée notamment à l'établissement du DIMR. Ce document comporte les limites d'exposition individuelle et collective auxquelles pourront être soumis les intervenants ainsi que le débit d'exposition maximum autorisé au poste de travail. C'est dans le cadre de l'anticipation de l'évolution du débit de dose au poste de travail que les agents de radioprotection du service sont amenés à effectuer des modélisations radiologiques.

Les opérations dont le prévisionnel dosimétrique conduit à plus de 10 H.mSv d'exposition font l'objet d'une étude spécifique dite ALARA (As Low As Reasonably Achievable). Ces études présentent différentes options de travail et celle présentant le meilleur rapport dose collective/ investissement est généralement retenue. Ces études sont présentées et vérifiées par les responsables du secteur DQSSE/RI. Dans le cadre de la vérification des hypothèses retenues, les responsables de ce secteur sont également amenés à effectuer des modélisations radiologiques qui leurs permettent de confirmer ou infirmer les hypothèses retenues.

Sur le périmètre du HA/DE, ce type de situation est assez fréquent car les interventions qui y sont réalisées ne sont pas des opérations d'exploitation courantes, mais des opérations liées au démantèlement pour lesquelles nous ne disposons pas de retour d'expérience. Les agents de radioprotection effectuent donc régulièrement de la modélisation radiologique.

Pour cela, aujourd'hui, ils disposent de Microshield, on leur propose un nouveau logiciel Dosimex. Afin de se prononcer sur l'utilisation éventuelle de ce logiciel, les responsables du secteur DQSSE/RI ont souhaité qu'une comparaison entre Microshield et Dosimex soit réalisée, d'où l'objet de mon stage.

J'ai choisi d'effectuer cette comparaison au travers de cas purement théoriques et au travers d'une mise en situation lors d'une opération de démantèlement d'un dissolvant de l'atelier HA/DE. Mais avant cela je me suis intéressé au mode de fonctionnement de Dosimex et Microshield.

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 7/50
ROPERS Jean-Baptiste		

3 Présentation et comparaison du mode de fonctionnement des deux logiciels

Le but de ce chapitre est de présenter les méthodes de calculs utilisées par Microshield et Dosimex afin d'identifier d'éventuelles différences de modélisation entre eux ainsi que l'interface Homme-Machine de ces deux logiciels.

3.1 Principe général de fonctionnement et Interface Homme Machine

Pour effectuer une simulation de radioprotection l'utilisateur doit généralement sélectionner :

- la géométrie de la source de rayonnement
- le ou les radionucléides qui la constituent
- l'activité de chacun de ces radionucléides
- la position du point de mesure vis-à-vis de cette source de rayonnement

Concernant les géométries de source, les deux logiciels proposent des modèles simples : ponctuelle, fil, disque, cylindre ou parallélépipède

Pour les radionucléides, les deux logiciels proposent une liste de radionucléides conséquente. La base de données à laquelle est rattaché Dosimex est celle du LNHB (Laboratoire National Henri Becquerel). Dosimex propose différentes bases de données de radionucléides : une base de données gamma avec raies regroupées et une base de données gamma complète. Sur les deux logiciels, il est possible d'importer un spectre d'émission type.

Concernant les points de mesure, Microshield permet le positionnement de un ou plusieurs points de mesure dans tous l'espace alors qu'avec Dosimex l'opérateur ne peut paramétrer que la distance source-point de mesure.

A partir de ces données d'entrée, le logiciel détermine dans un premier temps le débit de fluence particulaire puis le ou les débits de dose au point de mesure sélectionné par l'utilisateur.

3.1.1 Interface Homme Machine sur Dosimex

L'objectif est de présenter à partir d'images prises sur Dosimex, les interfaces Homme-Dosimex pour effectuer un calcul de débit de dose à partir d'une activité de source.

L'utilisateur doit sélectionner l'option de « calcul débit de dose gamma et X », une nouvelle fenêtre apparaît où il pourra sélectionner son terme source.

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 8/50
ROPERS Jean-Baptiste		

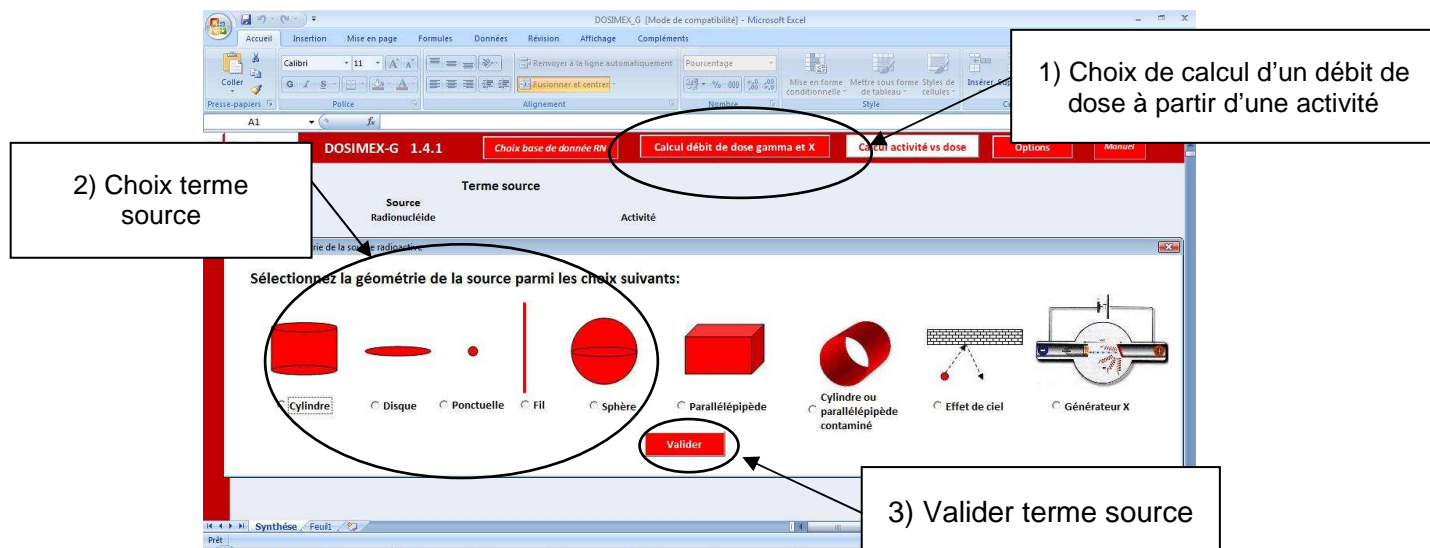


Image n°10 : Choix terme sources sur Dosimex

Une fois le terme source choisi, l'utilisateur clique sur l'onglet « valider ». Une nouvelle fenêtre apparaît demandant de saisir le radionucléide, son numéro de masse et son activité. Une fois les données intégrées, l'utilisateur doit cliquer sur « valider ».

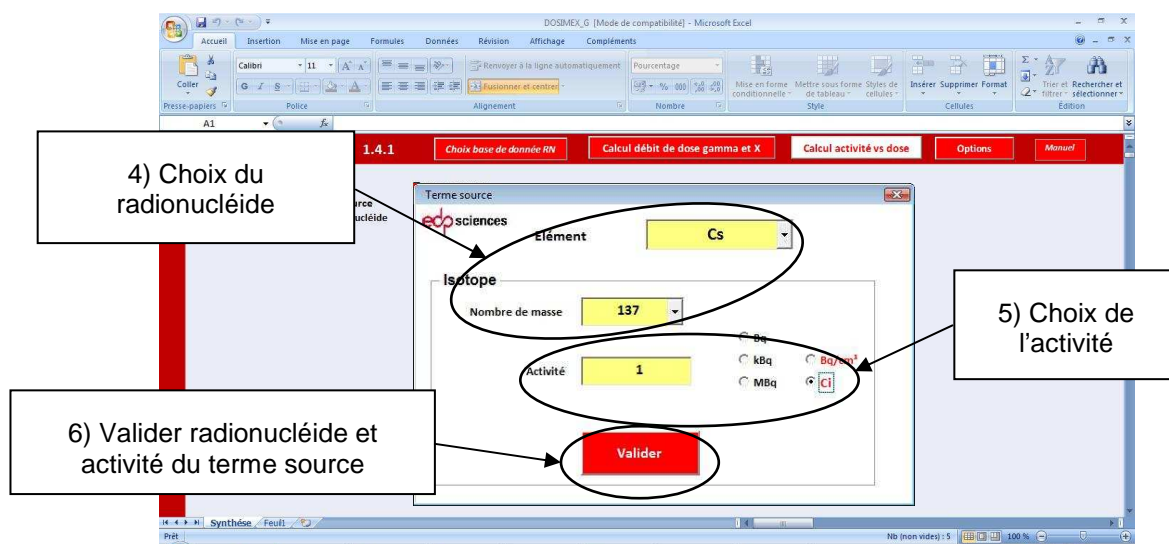


Image n°11 : Choix radionucléides sur Dosimex

Des fenêtres demandant le choix de rajouter un second radionucléide ainsi que le choix du Build Up Factor sont proposées.

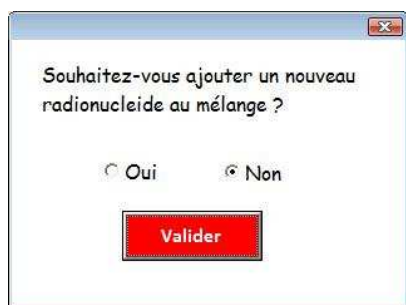


Image n°12 : Choix d'un nouveau radionucléide sur Dosimex

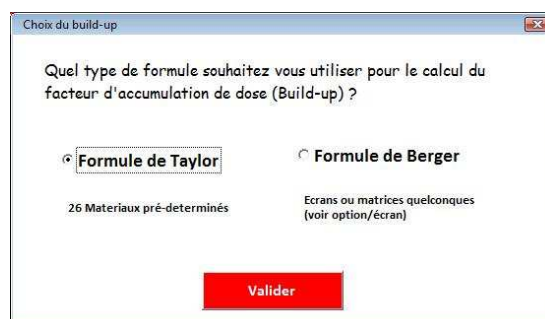


Image n°13 : Choix du Build Up sur Dosimex

Une fois le Build Up validé, une fenêtre intégrant la géométrie de simulation est affichée.

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 9/50
ROPERS Jean-Baptiste		

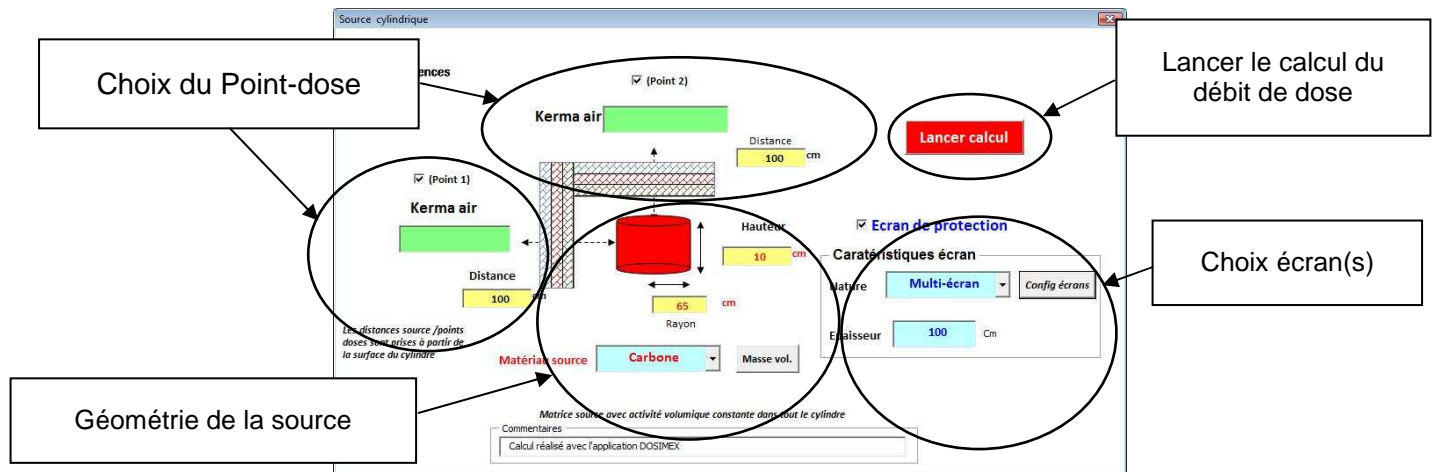


Image n°14 : Choix géométrie de simulation sur Dosi mex

Une fois le calcul effectué, le logiciel présente les résultats de la manière suivante :

Résultats de la simulation pour les points-dose choisis

Type de Build-up		Taylor		
Condition d'exposition		Cylindre R=65cm / H=10 cm de Carbone avec écran de Multi-écran de 100cm		
Distance source/Pt1		100cm	Distance source/Pt2	
			100cm	
	Avec Build-up	Sans Build-up	Build-up moyen	
Pt1	Kerma	254,4 µGy/h	87,95 µGy/h	2,89
	H*(10)	305,82 µSv/h	105,82 µSv/h	
	H*(0,07)	306,24 µSv/h	105,97 µSv/h	
	Hp(10)	308,72 µSv/h	106,82 µSv/h	
Pt2	Kerma	2,01 mGy/h	0,99 mGy/h	2,02
	H*(10)	2,42 mSv/h	1,2 mSv/h	
	H*(0,07)	2,42 mSv/h	1,2 mSv/h	
	Hp(10)	2,44 mSv/h	1,21 mSv/h	

*Le multi écran est constitué de: Air 100 cm/

Commentaires: Calcul réalisé avec l'application DOSIMEX

Image n°15 : Résultats sur Dosimex

Cette suite d'images provenant de Dosimex montre que les simulations sur celui-ci sont simples.

3.1.2 Interface Homme Machine sur Microshield

L'objectif est de présenter à partir d'images prises sur Microshield, les interfaces Homme-Microshield pour effectuer un calcul de débit de dose à partir d'une activité de source.

L'utilisateur doit sélectionner le terme source qu'il souhaite utiliser, puis donner les dimensions de la simulation.

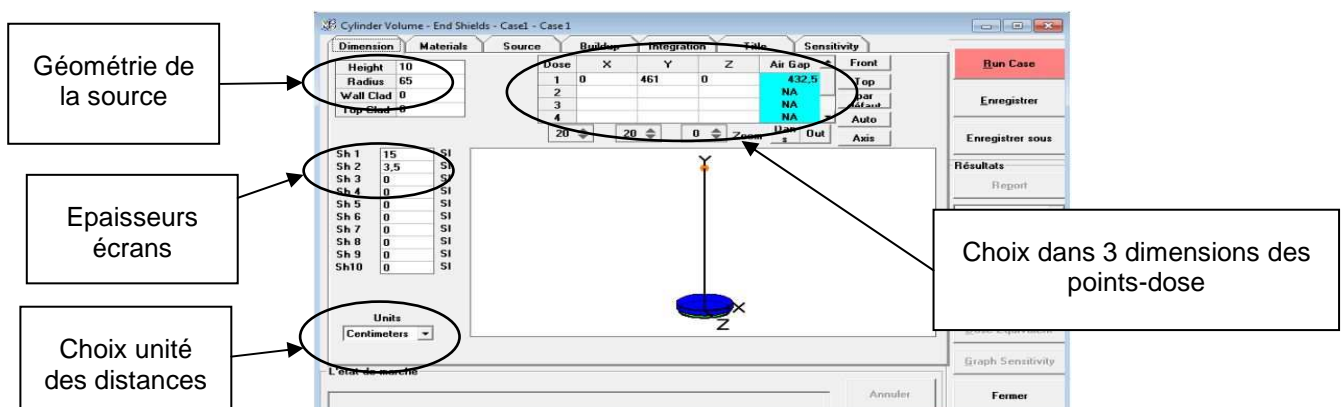


Image n°16 : Choix de la géométrie sur Microshield

Une fois les dimensions de simulation rentrées, l'utilisateur doit choisir les matériaux du terme source et des écrans.

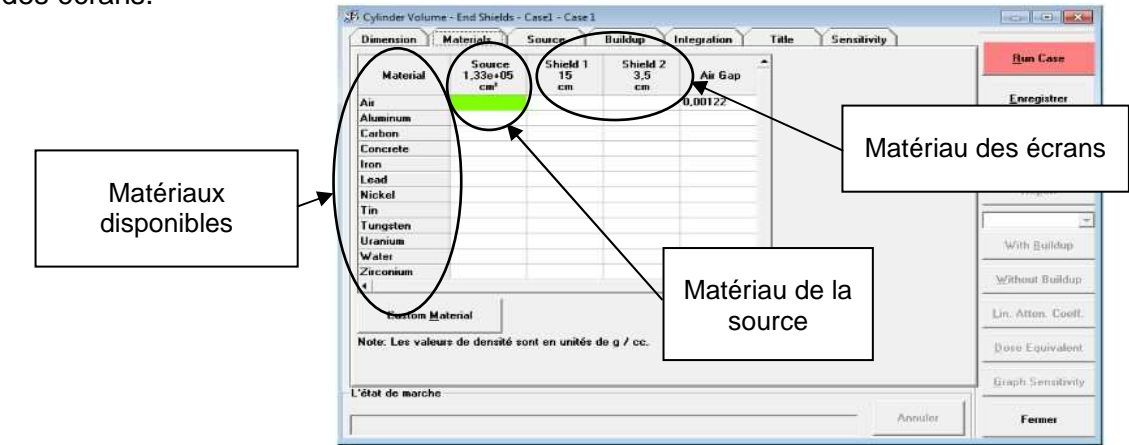


Image n°17 : Choix des matériaux sur Microshield

Ensuite, le choix du radionucléide ainsi que l'activité du terme source sont effectués.

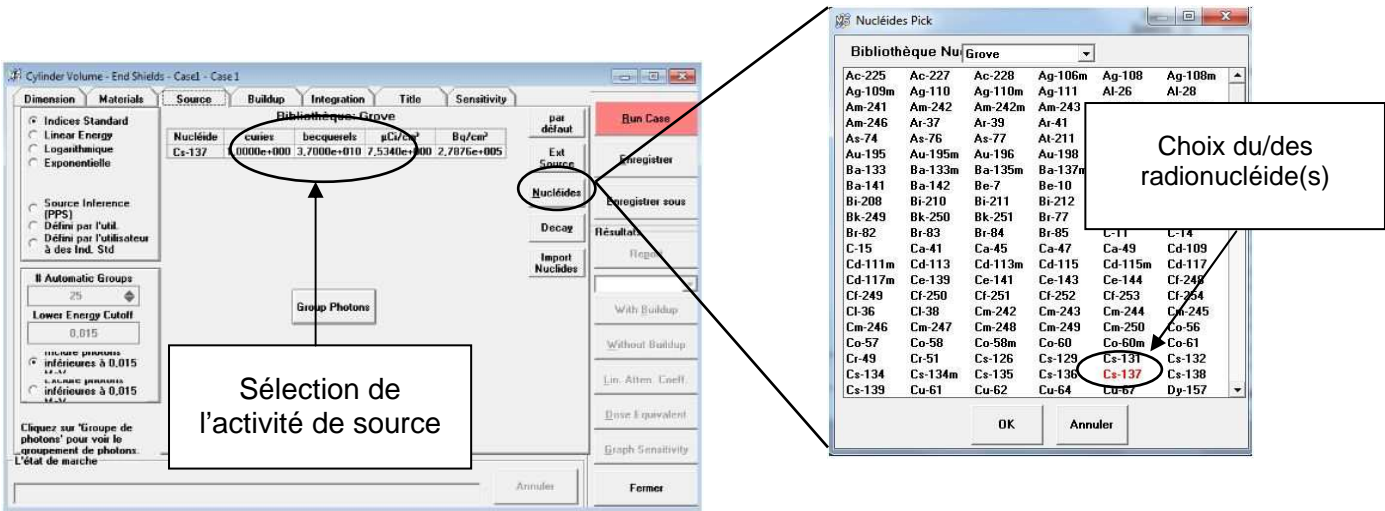


Image n°18 : Choix de l'activité et du radionucléide sur Microshield

Enfin il faut choisir quel écran générera le Build Up Factor

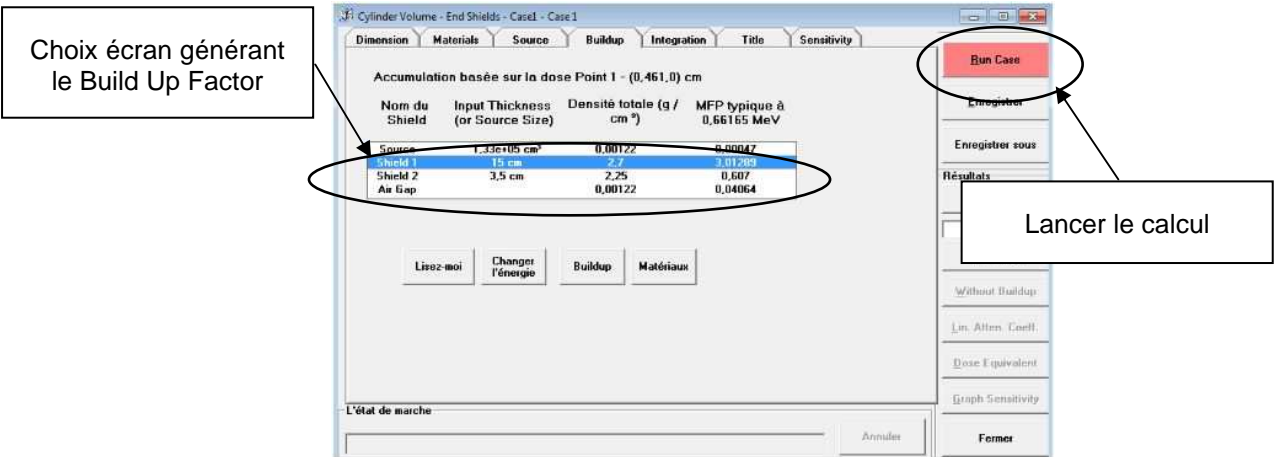


Image n°19 : Choix de l'écran générant le Build Up Factor sur Microshield

Une fois le calcul effectué, le logiciel présente les résultats de la manière suivante :

Résultats									
Énergie (MeV)	Activité (photons / s)	Débit de fluence MeV/cm²/sec Pas d'accumulation	Débit de fluence MeV/cm²/sec À l'accumulation	Exposition aux taux mR Pas d'acc	Exposition aux taux	Débit de dose absorbée	Débit de dose absorbée	Débit de dose absorbée mGy/hr Pas d'accumulation	Débit de dose absorbée mGy/hr À l'accumulation
0,0045	2,583e+09	1,849e-303	7,775e-26	1,267	Résultat du débit de Kerma simulé au point-dose			1,106e-305	4,653e-28
0,0318	5,151e+09	1,857e-36	5,437e-23	1,547				1,351e-40	3,954e-27
0,0322	9,503e+09	5,356e-35	1,100e-22	4,311e-37	8,851e-25	3,763e-37	7,727e-25	3,763e-39	7,727e-27
0,0364	3,458e+09	4,011e-25	1,454e-22	2,279e-27	8,260e-25	1,989e-27	7,211e-25	1,989e-29	7,211e-27
0,6616	2,239e+11	3,102e+03	2,029e+04	6,014e+00	3,934e+01	5,250e+00	3,434e+01	5,250e-02	3,434e-01
Totals	2,446e+11	3,102e+03	2,029e+04	6,014e+00	3,934e+01	5,250e+00	3,434e+01	5,250e-02	3,434e-01

Image n°20 : Résultats sur Microshield

Cette suite d'images provenant de Microshield nous montre que les simulations sur Microshield demandent à l'utilisateur un certain temps de pratique avant de pouvoir utiliser Microshield. La lecture des résultats peut sembler complexe pour un individu n'ayant jamais utilisé Microshield.

3.1.3 Conclusion Interface Homme Machine sur les deux logiciels

Le tableau suivant présente les différents termes de calcul de simulations soumis à une notation dont les notes sont comprises entre 0 et 2, avec 0 la note la plus basse et 2 la plus haute.

Logiciel	Microshield	Dosimex
Terme de calcul		
Interface Homme-machine	1	2
Terme source	2	2
Choix de la géométrie de la source	2	2
Choix du radionucléide	2	2
Choix de l'activité	2	2
Géométrie de la simulation	1,5	2
Choix de la nature de l'écran	2	2
Choix de l'épaisseur d'écran	1	2
Choix multi-écrans	1	2
Choix de la distance Source-Point de mesure	2	2
Facilité de lecture des résultats	1	2
Temps de calculs	2	1
Note finale	1,5	1,8

Tableau n°2 : Notation des termes de calculs pour Microshield et Dosimex.

La note de Dosimex étant supérieure à celle de Microshield, Dosimex est le logiciel le plus simple à utiliser. Cependant, ses temps de calculs sont plus longs que ceux de Microshield.

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 12/50
ROPERS Jean-Baptiste		

A présent que nous avons vu comment utiliser ces logiciels, je vous propose d'analyser leur mode de fonctionnement.

3.2 Principe de calcul

Pour effectuer des calculs, les logiciels déterministes déterminent dans un premier temps le débit de fluence particulaire parvenant au point de mesure puis les différentes valeurs de débits de « dose ».

3.2.1 Les grandeurs radiométriques

3.2.1.1 Le débit de fluence

Le rayonnement électromagnétique parvenant au point de mesure va par interaction céder de l'énergie dans l'élément de matière.

Le débit de fluence correspond au nombre d'entités arrivant par seconde et par centimètre carré au point de mesure sélectionné.

$$\dot{\phi} = \frac{d^2 N}{dt dS}$$

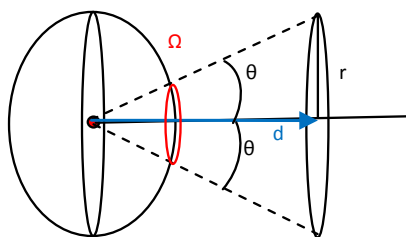


Image n°21 : Schéma représentant le nombre de photons arrivant sur la surface de rayon r pour une source ponctuelle isotrope

Dans le cas d'une source ponctuelle isotrope, Microshield et Dosimex utilisent deux modes de calcul différents du débit de fluence. La démonstration de ces débits de fluence est indiquée en annexe 1.

Microshield de son côté effectue le calcul suivant :

$$\dot{\phi} = \frac{AI}{4\pi d^2} \quad (1)$$

A étant l'activité de la source de rayonnement en Bq, I l'intensité d'émission du rayonnement gamma considéré et d la distance source / point de mesure en cm.

Dosimex quant à lui détermine le nombre d'entités qui traversent par unité de temps une surface élémentaire de 1cm² soit un rayon r = 0,5642 cm.

L'équation mathématique qui régit ce débit de fluence sur Dosimex est alors donnée par :

$$\dot{\phi} = \frac{AI}{2} \times \left(1 - \frac{d}{\sqrt{d^2 + r^2}} \right) \quad (2)$$

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 13/50
ROPERS Jean-Baptiste		

Nous observons déjà une différence entre ces deux logiciels que les études théoriques m'ont permis d'analyser.

Les logiciels convertissent ensuite ce débit de fluence en divers grandeurs tel que le débit de kerma dans l'air, le débit d'équivalent de dose ou encore le débit de dose efficace...

3.2.1.2 Le débit de Kerma dans l'air

Le Kerma (Kinetic energy released in material) représente l'énergie par unité de masse cédée par du rayonnement indirectement ionisant incident aux atomes qui constituent l'élément de matière cible. Dans le cas du kerma dans l'air cet élément constitutif est de l'air. On trouve la formule suivante :

$$K(A) = \frac{dE(A)}{dm} \quad (3)$$

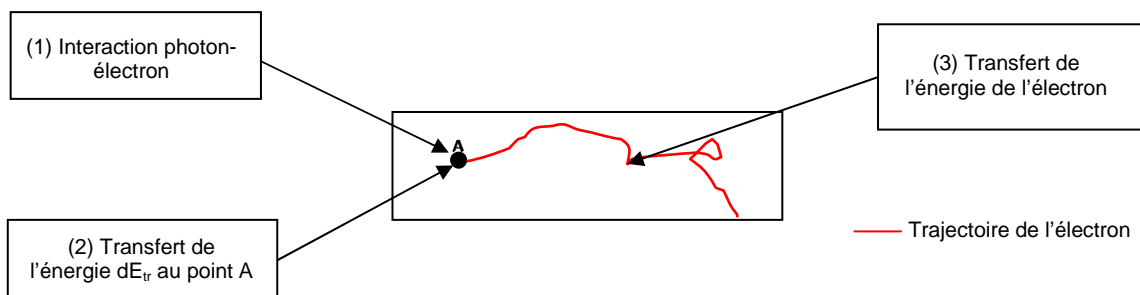


Image n°22 : Schéma du principe du transfert d'énergie photon-électron

Ce débit de Kerma s'exprime en Gray.h⁻¹ (J.kg⁻¹.h⁻¹)

Dosimex et Microshield effectue des calculs de débit de kerma. Pour cela ces logiciels multiplient le débit de fluence vu précédemment par un coefficient de conversion fluence-kerma k_ϕ issu du report 57 de l'ICRU ou de la publication 60 de la CIPR. Le débit de kerma s'exprime par la relation suivante :

$$\frac{dK}{dt} = \frac{d\phi}{dt} \times k_\phi \quad (4)$$

Pour les énergies non inscrits, les logiciels déterministes effectuent des interpolations ou extrapolations logarithmiques pour déterminer ce coefficient.

Exemple : Nous voulons déterminer ce coefficient kerma-fluence dans l'air K_ϕ pour un gamma de 661,66 keV. Selon la table de l'ICRU, nous avons les coefficients suivants pour 600 et 800 keV :

Energie du photon (keV)	K_ϕ (pGy.cm ²)
600	2,84
661,66	K_ϕ (661.66)
800	3,69

Tableau n°3 : Détermination du coefficient Kerma-fluence à 661.66 keV

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 14/50
ROPERS Jean-Baptiste		

Par interpolation logarithmique, nous pouvons déterminer le coefficient fluence-kerma pour l'énergie 661,66 keV.

$$k_{\phi} = \frac{2.34 \times \ln\left(\frac{661.66}{800}\right) + 3.69 \times \ln\left(\frac{600}{661.66}\right)}{\ln\left(\frac{600}{800}\right)} = 2.799 \text{ pGy.h}^{-1}$$

3.2.2 Les grandeurs de protection

A énergie cédée équivalente, la nature du rayonnement ionisant incident sur un élément de matière vivante aura des conséquences différentes. Les études de la CIPR ont permis de mettre en évidence 20 fois plus de mort cellulaire pour une exposition à du rayonnement alpha que du rayonnement bêta par exemple.

La grandeur de protection permettant de prendre en compte cette différence est la dose équivalente, elle se note H_T et s'exprime en Sievert (Sv).

$$H_T = D_a \times W_R \quad (5)$$

Dans cette expression, D_a représente la dose absorbée par l'élément de matière et W_R représente le facteur de pondération du au rayonnement qui permet de transcrire son détriment radiologique.

Dans le cas particulier des photons, le facteur de pondération au rayonnement est jusqu'ici constant quelque soit l'énergie et égal à 1.

Tout comme la nature du rayonnement incident présente une importance sur les conséquences de l'exposition, la nature du tissu touché présentera une importance sur la probabilité de développer un cancer radio induit et sur la qualité de vie globale de l'individu exposé. Les tissus faisant moins de mitose sont moins radiosensibles, il convient donc de prendre cela en considération pour définir le détriment biologique total.

La grandeur de protection transcrivant ce risque radiologique est la dose efficace qui se note E , elle s'exprime en Sievert (Sv) :

$$E = H_T \times W_T \quad (6)$$

Dans cette expression W_T représente le détriment biologique associé au tissu exposé.

Microshield, contrairement à Dosimex permet d'effectuer des calculs de dose efficace pour une exposition externe.

Ici le principe de calcul est similaire à celui du calcul de débit de kerma. A partir des données inscrites dans l'ICRU 57, il est possible d'obtenir à partir du débit de fluence le débit de dose efficace.

S'agissant d'exposition externe, l'ICRU considère différentes formes d'exposition externe. L'individu peut être soumis à du rayonnement lui parvenant de face, il est fait référence à une exposition antéropostérieure (AP), lui parvenant de dos, il s'agit alors d'exposition postéro-antérieure (PA), d'un individu tournant face au champ de rayonnement exposition rotationnel (ROT)...Au total se sont 6 configurations d'exposition retenues et calculées par Microshield.

3.2.3 Les grandeurs opérationnelles

Ces grandeurs correspondent aux grandeurs des appareils de mesures employés sur le terrain. Elles sont destinées à donner une estimation des grandeurs de protection.

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 15/50
ROPERS Jean-Baptiste		

Elles sont appelées équivalent de dose et se notent :

- $H_p(d)$ pour équivalent de dose individuel qui correspond à la grandeur mesurée par les appareils portés par le personnel (dosimétrie passive et opérationnelle)
- $H^*(d)$ qui correspond à la grandeur mesurée par les appareils de mesure d'ambiance comme la babyline ou le FH40.

d représente la profondeur en mm de matériau équivalent tissus qui protège le détecteur. Trois épaisseurs de référence sont utilisées :

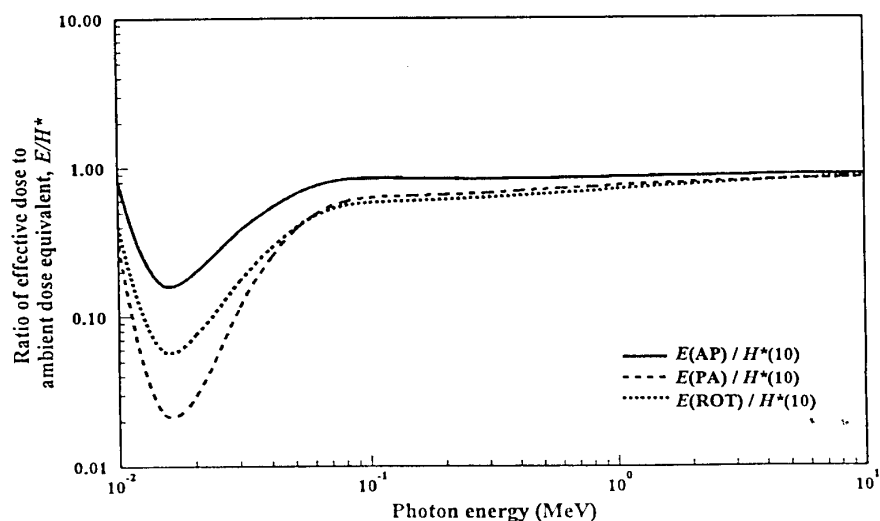
- $d = 10$ mm permet d'estimer la dose efficace au corps entier
- $d = 3$ mm permet d'estimer la dose équivalent au cristallin
- $d = 0.07$ mm permet d'estimer la dose équivalente à la peau

Ici Dosimex, contrairement à Microshield effectue des estimations de ces différentes grandeurs pour les profondeurs 10 mm et 0,07 mm. Ce calcul se fait une fois encore par l'utilisation des facteurs de conversion de l'ICRU 57 présentés en annexe 2. Deux méthodes peuvent être employées : l'utilisation des facteurs de conversion fluence / équivalent de dose ou des facteurs de conversion kerma / équivalent de dose.

Calcul du débit d'équivalent de dose ambiant : $\dot{H}^*(d) = \frac{H^*(d)}{\phi} \times \dot{\phi}$ ou $\dot{H}^*(d) = \frac{H^*(d)}{K} \times \dot{K}$

Calcul du débit d'équivalent de dose individuel : $\dot{H}_p(d) = \frac{H_p(d)}{\phi} \times \dot{\phi}$ ou $\dot{H}_p(d) = \frac{H_p(d)}{K} \times \dot{K}$

D'une manière générale les grandeurs opérationnelles se doivent d'être majorantes vis-à-vis des grandeurs de protection.



Nous constatons une nouvelle différence entre Dosimex et Microshield sur la nature des résultats.

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 16/50
ROPERS Jean-Baptiste		

3.3 Les protections biologiques

3.3.1 Définitions

3.3.1.1 Interaction des photons dans les écrans

L'objectif d'un écran est de diminuer le débit d'équivalent de dose au poste de travail. Les logiciels sont donc capables de prendre en compte les phénomènes physiques qui ont lieu lorsqu'une protection biologique est incluse dans le calcul.

Nous considérons un écran d'épaisseur x et de matière m .

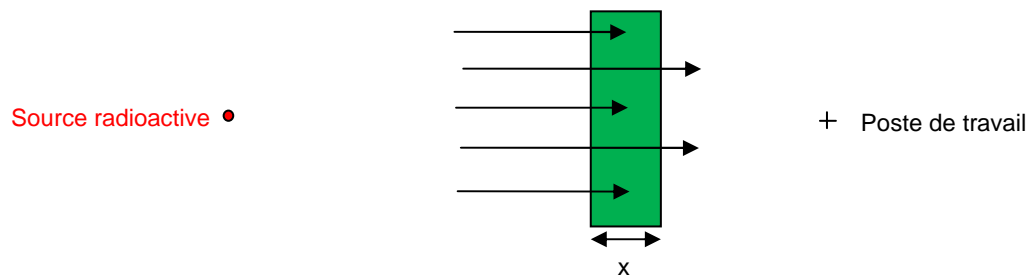


Image n°23 : Interaction des photons dans un écran

Une partie des photons incidents va interagir avec l'écran et ceux n'ayant pas interagi avec la protection biologique seront donc transmis vers le poste de travail. Il y a donc diminution du débit d'équivalent de dose au poste de travail.

La formule mathématique qui régit ce phénomène physique est :

$$\dot{H}^*(10)_{\text{écran}} = \dot{H}^*(10)_{\text{initial}} \times e^{-\mu x} \quad (7)$$

Avec

$e^{-\mu x}$: Facteur de transmission linéique.

μ : Coefficient d'absorption linéique (cm^{-1}) dépendant de l'énergie du photon et de la nature de l'écran traversé.

$\dot{H}^*(10)_{\text{initial}}$: Débit d'équivalent de dose ambiant au poste de travail sans écran.

Les données associées aux coefficients d'atténuation linéique de DOSIMEX sont issues de la base de données X-COM.

Exemple : Soit un écran de 2 cm de Plomb, traversé par un flux de photons de 661 keV.

Le coefficient d'atténuation massique de cette raie gamma dans le Plomb vaut $0,1126 \text{ cm}^2.\text{g}^{-1}$, soit un coefficient d'atténuation égal à $1,2774 \text{ cm}^{-1}$.

Nous pouvons donc calculer le facteur de transmission linéique correspondant à cette raie gamma et pour l'écran de Plomb de 2 cm d'épaisseur. On obtient :

$$e^{-\mu x} = e^{-1,2774 \times 2} = 7,77 \%$$

On en conclut que 7.77 % des photons incidents traverseront l'écran de 2 cm de Plomb.

Cependant l'expression (7) n'est pas totalement correcte, car elle doit être corrigée par un facteur appelé Build Up.

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 17/50
ROPERS Jean-Baptiste		

3.3.1.2 Correction avec Facteur de Build Up

Les interactions des photons dans l'écran conduisent à la production de rayonnement indirectement ionisant secondaire (rayonnement gamma diffusé lors d'un effet Compton, photons X de réarrangement du cortège électronique de l'atome pour un effet photo-électrique...). Ce rayonnement peut parvenir au poste de travail (point-dose) et conduire à une augmentation de la dose en ce point. Afin de prendre en compte ce phénomène physique, nous introduisons un facteur appelé Build-up et noté B dépendant de l'énergie des photons incidents et de la probabilité d'interaction de ceux-ci dans l'écran (μx).

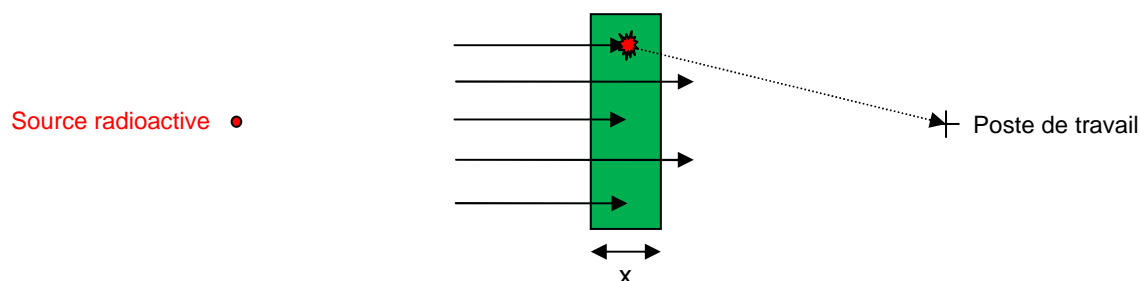


Image n°24 : Phénomène du Build Up Factor

L'expression du débit d'équivalent de dose devient alors :

$$\dot{H}^*(10)_{\text{corrigé}} = \dot{H}^*(10)_{\text{initial}} \times e^{-\mu x} \times B(\mu x) \quad (8)$$

Différents modèles de calcul de ce Build Up existent (exemple : Berger $1 + \mu x$ / Harima ou SERMA...), le plus fréquemment utilisé est celui de Taylor (1954).

Pour 26 matériaux (Eau, Plomb, Fer), Taylor a déterminé leur Build-Up, à partir de codes de calcul Monte-Carlo. La configuration de référence est un écran dit semi infini, fini en épaisseur et infini en surface, ce Build up infini est noté B_{∞} . La table des Build Up Factor de Taylor dans l'eau est présentée en annexe 3.

3.4 Cas de sources non ponctuelles

Pour les sources non ponctuelles, les logiciels effectuent un découpage en élément simple de la source. Chaque entité est alors considérée comme une source ponctuelle isotrope. Le choix de découpage des deux logiciels diffère.

Microshield effectue un découpage orthonormé, chaque élément présente les mêmes caractéristiques dimensionnelles.

Dosimex effectue un découpage en puissance, les éléments les plus proches du point de mesure sont de petite dimension et plus l'élément auquel nous nous intéressons s'éloigne de ce point, plus celui-ci est de grande dimension.

Les schémas illustrent ce mode de découpage pour le cas d'une source cylindrique :

Découpage selon Microshield	Découpage selon Dosimex

Tableau n°4 : Méthode de découpage d'une source cylindrique

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 18/50
ROPERS Jean-Baptiste		

3.5 Conclusion

Il en ressort de cette première analyse que bien qu'ils soient basés sur des modèles similaires Microshield et Dosimex présentent des différences notables sur :

	Microshield	Dosimex
Bases de données	Non connue	LNHB pour les radionucléides X-COM pour μ
Position du point de mesure	Tout l'espace	Dans l'axe de la source
Formule de calcul du débit de fluence	$\dot{\Phi} = \frac{AI}{4\pi d^2}$	$\dot{\Phi} = \frac{AI}{2} \times \left(1 - \frac{d}{\sqrt{d^2 + r^2}} \right)$
Grandeurs calculées	\dot{K}, \dot{E}	$\dot{K}, \dot{H}^*(10), \dot{H}_p(10), \dot{H}'(0.07)$
Modèles de Build-up	Taylor 26 matériaux	Taylor 26 matériaux Berger infinité de matériaux
Découpage des sources non ponctuelles	Orthonormé	Puissance

Tableau n°5 : Différences sur le mode de fonctionnement des deux logiciels

Concernant l'Interface Homme-Machine, ma préférence va vers Dosimex qui est plus intuitif dans son utilisation que Microshield.

4 Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex sur des scénarii théoriques

Afin d'analyser l'écart engendré par les différences de fonctionnement des deux logiciels, j'ai choisi d'étudier des cas de modélisation purement théoriques. J'ai volontairement choisi de ne présenter que les rares cas de figure entraînant des différences entre ces deux logiciels.

4.1 Influence de la base de données

Pour illustrer l'influence de la base de donnée gamma, j'ai effectué un calcul de débit de kerma pour une source ponctuelle d' ^{241}Am de 10^{13} Bq situé à 10 cm du point dose. Entre la source et le point dose est intercalé un écran de plomb de 2 cm.

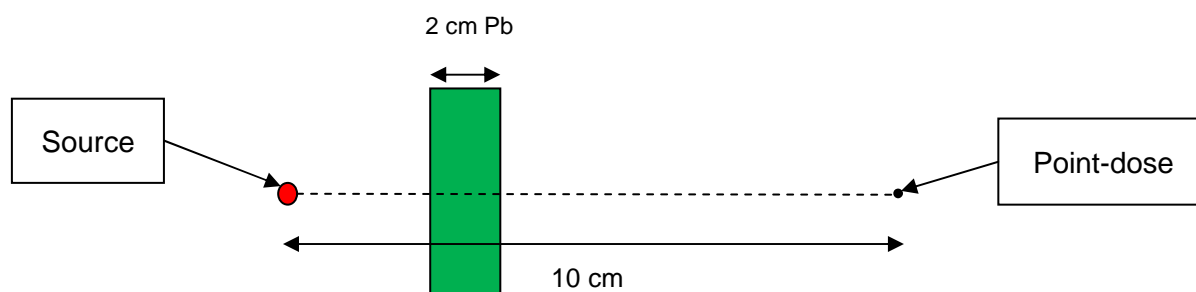


Image n°25 : Schéma de la simulation

Dans cette configuration Dosimex annonce un débit de kerma de $0,11 \text{ mGy.h}^{-1}$ alors que Microshield annonce un débit de kerma nul.

L'analyse des spectres retenus par chacune des deux applications nous indique des différences.

Dosimex			Microshield		
E (keV)	Intensité (%)	Débit de Kerma (mGy/h)	E (keV)	Intensité (%)	Débit de Kerma (mGy/h)
17,29	41,843	0	13,9	42,7	0
59,5	39,2	0	26,3	2,4	0
101,13	0,044	0	33,2	0,106	0
663,71	0,001	0,11	59,5	35,9	0
/	/	/	69,2	0,1793	0
Total		0,11	Total		0

Tableau n°6 : Contribution de chacune des raies du spectre de ^{241}Am sur le débit de Kerma pour une activité de 10^{13} Bq avec écran

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 20/50
ROPERS Jean-Baptiste		

L'analyse de la table de données du LNHB pour l'²⁴¹Am nous indique que ces deux applications ont effectué des simplifications des spectres sans doute pour limiter les itérations de calcul.

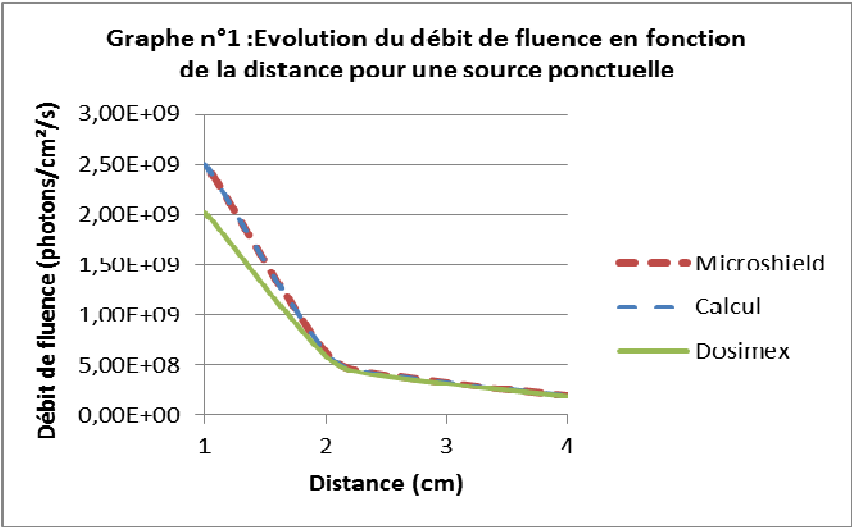
L'application Dosimex utilise par défaut une base de données gamma regroupée, si nous effectuons le même calcul avec la base de données complète nous obtenons 0,115 mGy.h⁻¹. La simplification du spectre sur Microshield semble trop radicale.

4.2 Influence de la distance

4.2.1 Cas d'une source ponctuelle

J'ai mis en évidence une différence de méthode de calcul du débit de fluence entre Microshield et Dosimex. J'ai donc étudié une configuration permettant de mettre en évidence les écarts générés par cette différence de modèle.

J'ai étudié l'évolution du débit de fluence en fonction de la distance pour une source ponctuelle émettant des gammas de 661.6 keV pour une activité de 1 Ci. J'ai fait varier la distance source-point de mesure de 1 à 4 cm. Le graphe n°1 indique les différences obtenues entre ces deux logiciels ainsi que les valeurs obtenues en effectuant le calcul du débit de fluence selon l'équation (1) :



Nous observons qu'en dessous de 2 cm, la divergence du modèle employé par Microshield conduit à surestimer le débit de fluence. Il faut noter que l'application indique à l'utilisateur un risque d'erreur pour les distances inférieures à 1 cm.

Dosimex, quant à lui, permet à l'utilisateur de calculer des débits de fluence cohérents jusqu'au contact de la source.

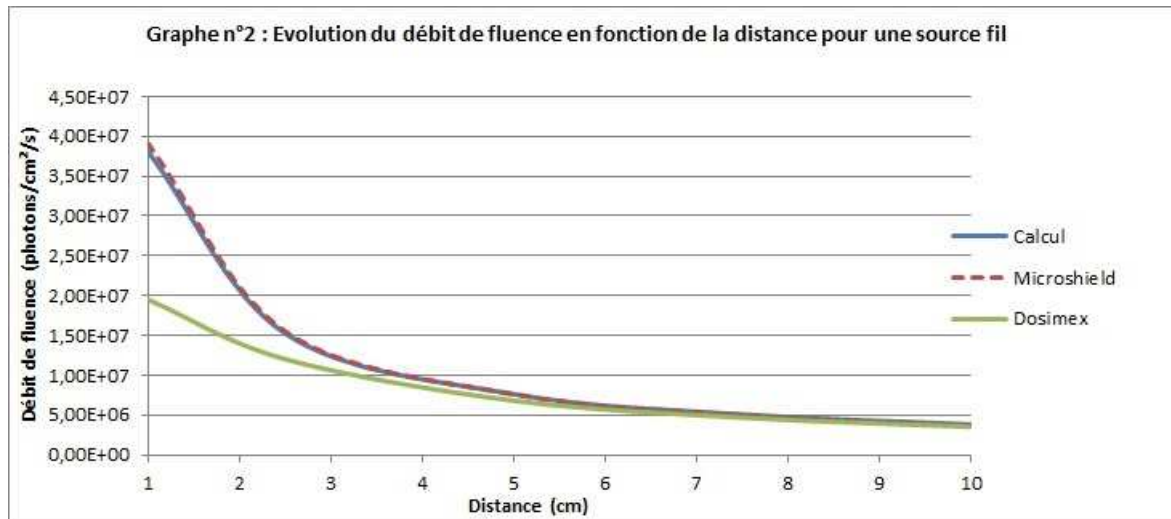
Afin de vérifier si cette différence de modèle avait une influence sur les autres configurations de source, j'ai effectué le même type de calcul pour une source fil de 200 cm de long émettant des gammas de 661.6 keV pour une activité de 1Ci.

4.2.2 Cas d'une source fil

Comme précédemment, j'ai analysé l'évolution du débit de fluence pour des distances variant ici de 1 à 10 cm. Le graphe n°2 indique les différences obtenues entre ces deux logiciels ainsi que les valeurs obtenues en effectuant le calcul du débit de fluence selon la relation (9) dont la démonstration vous est présentée en annexe 4 :

$$\dot{\phi}_{fil} = \frac{AI}{2\pi Ld} \theta \quad (9) \text{ vraie dans le cas où } d \gg r$$

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 21/50
ROPERS Jean-Baptiste		



Nous observons ici que les deux modèles divergent à partir de 5 cm. Ici Microshield n'indique pas de risque d'erreur dans la modélisation.

4.2.3 Conclusion

Le tableau suivant présente les différences de calculs du débit de fluence entre Microshield et Dosimex ainsi que leur validité pour les distances supérieures et inférieures à 5 cm.

Distance d	Microshield	Dosimex	Relation du débit de fluence à utiliser
d > 5 cm	Valide	Valide	$\dot{\Phi} = \frac{AI}{4\pi d^2}$
d < 5 cm	Non valide	Valide	$\dot{\Phi} = \frac{AI}{2} \times \left(1 - \frac{d}{\sqrt{d^2 + r^2}} \right)$

Tableau n°7 : Conclusion de l'étude du débit de fluence sur Microshield et Dosimex

J'ai identifié qu'un autre point d'écart entre Dosimex et Microshield était le découpage des sources non ponctuelles. J'ai donc défini un essai de modélisation permettant de mettre en évidence les écarts générés par les deux modèles.

4.3 Influence du découpage

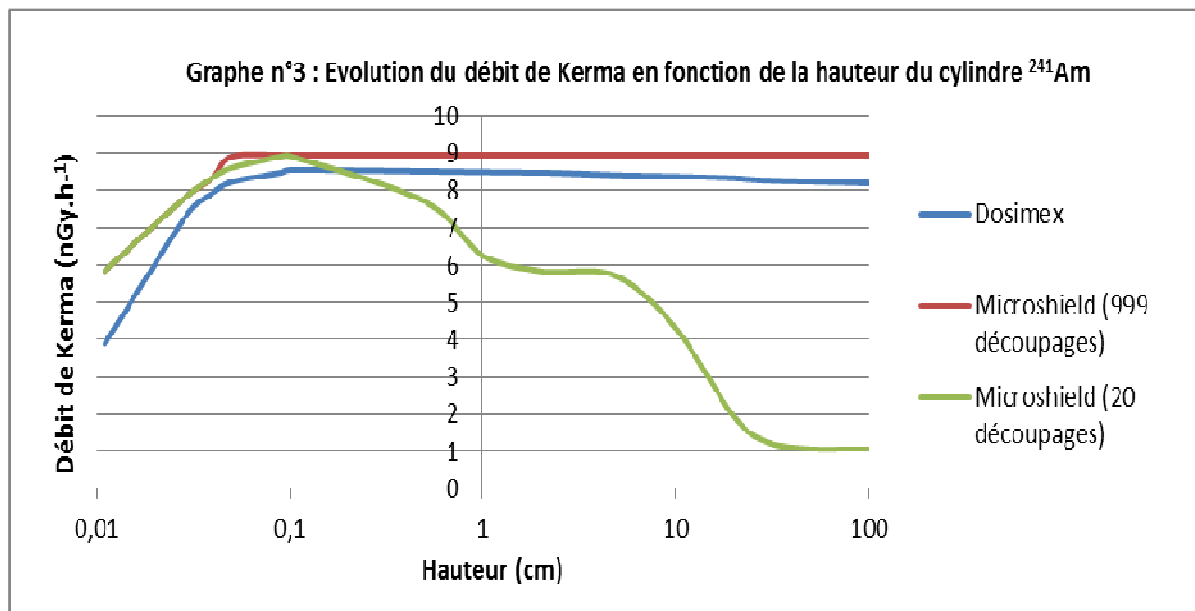
4.3.1 Effet sur l'auto-absorption

La modélisation étudiée est le cas d'une source cylindrique d'²⁴¹Am, de matrice de plomb, de rayon égal à 65 cm et d'activité volumique constante de 10⁴ Bq.cm⁻³. J'ai fait varier la hauteur du cylindre de 0,011 à 100 cm. Je calcule ensuite le débit de Kerma à 100 cm au-dessus du cylindre, avec les deux logiciels.

Sur Microshield, les calculs sont réalisés avec un pas d'intégration de 20 découpages (découpage par défaut) puis avec un pas d'intégration de 999 découpages (découpage maximum possible modifié par l'utilisateur).

Le graphe n°3 indique l'évolution de ce débit kerma en fonction de la hauteur du cylindre :

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 22/50
ROPERS Jean-Baptiste		



Microshield et Dosimex découpent le cylindre initial en plusieurs cylindres. Microshield réalise des tranches d'épaisseurs identiques et Dosimex des tranches d'épaisseurs de plus en plus grandes.

Prenons l'exemple d'un découpage par 4 du cylindre :

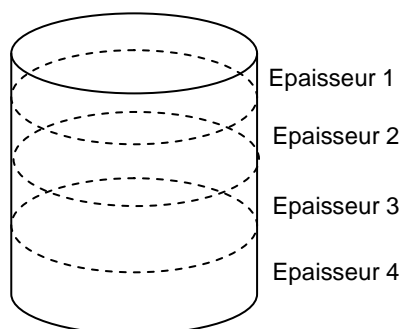


Image n°26 : Découpage en part égale du cylindre sur Microshield

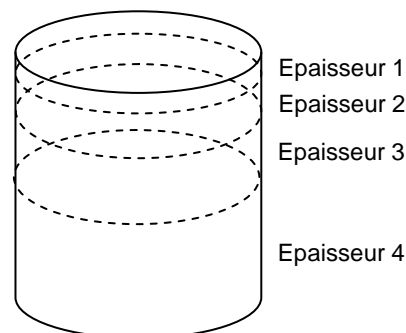


Figure n°27 : Découpage en puissance du cylindre sur Dosimex

Lors du calcul du débit de dose émis par la source cylindrique, le logiciel fait le calcul du débit de dose émis par chacune des épaisseurs de découpage, qui sont considérées comme une source unique, puis la somme des débits de dose émis par chacune des épaisseurs permet d'obtenir le débit de dose émis par la source cylindrique.

Cependant, comme nous pouvons le voir sur les images n°26 et n°27, les épaisseurs sont placées les unes sur les autres, elles se font donc écran, ce qui engendre une atténuation du rayonnement gamma émis par les épaisseurs plus profondes par celles du haut du cylindre.

La première épaisseur fait écran à la seconde, les rayonnements gammas émis par cette deuxième épaisseur seront donc atténués par la première épaisseur.

En partant d'une hauteur très faible du cylindre, 0,011 cm, jusqu'à des hauteurs très élevées, 100 cm, on s'attend à observer un débit de kerma qui augmente, puis qui finit par se stabiliser étant donné que les photons des couches profondes du découpage seront atténués par les premières couches du découpage.

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 23/50
ROPERS Jean-Baptiste		

Sur le graphe n°3, on constate que ce phénomène est visible pour Dosimex et Microshield avec un pas d'intégration de 999 découpages qui est choisi par l'utilisateur.

Cependant, pour un pas d'intégration de 20 découpages sur Microshield, qui est le pas d'intégration proposé par défaut sur ce logiciel, la stabilisation du débit de Kerma n'est pas présente. Ce découpage est donc mis en défaut pour des hauteurs de cylindres supérieures à 0,1 cm.

Ainsi, sur Microshield, pour obtenir une évolution du débit de Kerma en fonction de la hauteur du cylindre, l'utilisateur doit donc modifier le pas d'intégration du découpage du cylindre.

Le choix d'un découpage en puissance de Dosimex évite cette problématique de choix de découpage. Ce qui simplifie le calcul du débit de Kerma émis par une source cylindrique, l'utilisateur n'a pas à s'inquiéter du choix de découpage.

4.3.2 Effet sur le Build Up Factor

Le découpage génère également une incidence sur le calcul du Build-up. Pour mettre en évidence ce phénomène, j'ai choisi de faire une modélisation sur une source fil de 200 cm de longueur contenant du ¹³⁷Cs. Le point de mesure est placé à 50 cm du fil et entre les deux est interposé un écran d'eau de 15 cm.

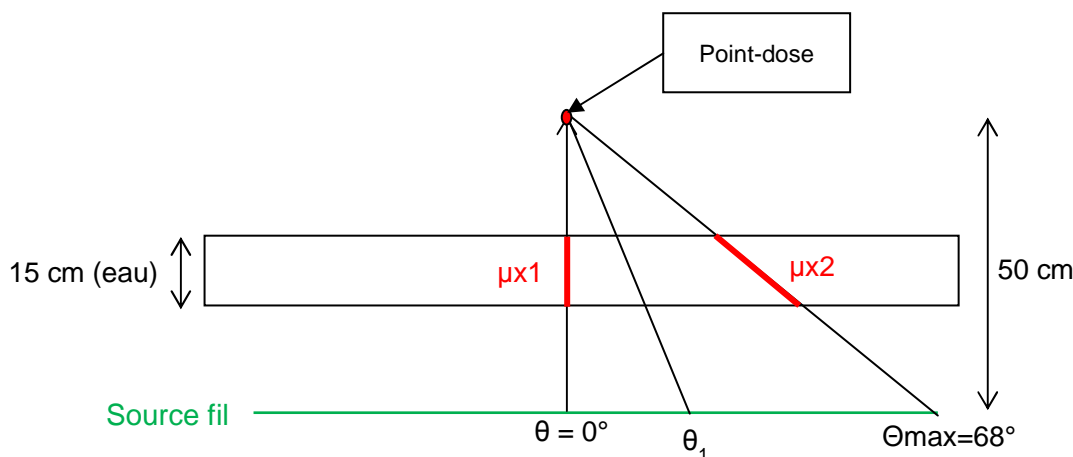


Image n°28 : Schéma de la simulation source-fil de 200 cm

J'ai effectué le calcul du Build-up théorique par intégration et relevé pour chacun des deux logiciels le Build-up calculé :

Build Up théorique	Build Up Microshield	Build Up Dosimex	Ecart théorique-Microshield	Ecart théorique-Dosimex
3.897	3.32	3,52	15 %	10 %

Tableau n°8 : Build Théorique, Microshield et Dosime x

Nous observons que le découpage génère une erreur vis-à-vis de l'intégration exacte et dans ce cas de figure les données utilisées par Dosimex sont plus proche de la valeur « Vrai ».

4.4 Conclusion des études théoriques

Les études théoriques nous font apparaitre que les différences de modélisations semblent pencher en faveur de Dosimex. Ces cas de figure restent cependant des cas anecdotiques. J'ai donc choisi de mettre en comparaison ces deux logiciels sur un cas pratique celui du démantèlement d'un équipement du périmètre HA/DE.

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 24/50
ROPERS Jean-Baptiste		

5 Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex sur le scénario de démantèlement du dissolvant

L'intérêt de cette étude de comparaison entre Dosimex et Microshield est de mettre en concurrence ces deux logiciels déterministes, pour vérifier lequel est le plus intéressant en terme de fiabilité des résultats, de facilité d'utilisation. Mais aussi lequel est le plus adapté pour effectuer des simulations radioprotection de terrain sur des scénarii de démantèlement.

5.1 Présentation de l'équipement du dissolvant cellule 906 B, ses risques radiologiques et son spectre caractéristique

5.1.1 Présentation de l'équipement du dissolvant cellule 906 B

La cellule 906 B est équipée du dissolvant 222-51 qui avait pour fonction de dissoudre les tronçons de combustibles irradiés dans de l'acide nitrique.

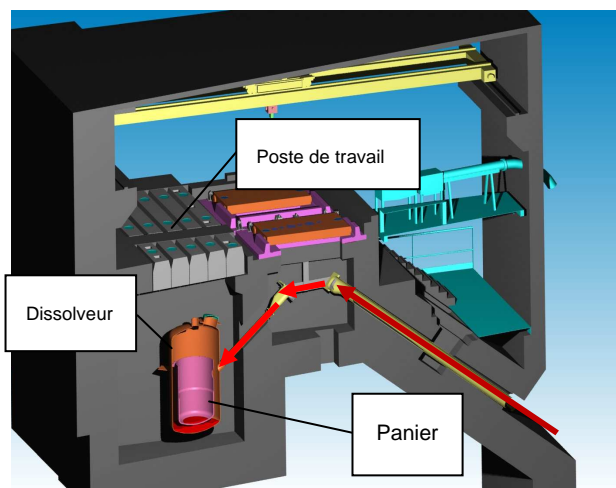


Image n°29 : Dissolvant

Une fois que les barreaux de combustibles ont été dégainés dans l'atelier dégainage, ils sont acheminés vers un dissolvant contenant un panier, pour y être dissous dans de l'acide nitrique.

Une fois la dissolution effectuée, les produits du combustible pourront être séparés dans les ateliers suivants.

L'image n°29 présente le cheminement du combustible vers le dissolvant (flèches rouges), et le panier du dissolvant.

Aujourd'hui, ce dissolvant est en cours de démantèlement. Ces opérations de démantèlement consistent à la remontée des différents éléments du dissolvant.

Les opérateurs sont situés au poste de travail au-dessus de la cellule du dissolvant. Un écran d'eau est placé au fond du dissolvant.

L'objectif des simulations radioprotection sur le scénario de démantèlement du dissolvant est de déterminer le débit d'équivalent de dose au poste de travail qui n'est le fruit que de l'exposition externe à distance. Cette détermination passe tout d'abord par l'étude du spectre des radionucléides caractéristiques du dissolvant.

5.1.2 Les risques radiologiques associés au dissolvant

Les agents travaillant dans cette pièce peuvent être exposés à trois risques radiologiques :

- Risque d'exposition externe à distance (irradiation) ;
- Risque d'exposition externe au contact (contamination externe) ;
- Risque d'exposition interne (contamination interne).

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 25/50
ROPERS Jean-Baptiste		

Les expositions internes ne peuvent être le fruit que d'une situation accidentelle car tout est mis en œuvre pour éviter ce type d'exposition sur le site avec le port d'équipements de protection individuels.

Cependant les expositions à distance sont la conséquence de l'émission de rayonnements issus des radionucléides présents dans le procédé :

- Rayonnement électronique β^- et β^+
- Rayonnement électromagnétiques (gammas, X, Rayons X)
- Rayonnement neutronique

Des analyses de caractérisation ont été réalisées sur l'ensemble du HA/DE pour définir les spectres de références associés à chaque unité. Ces spectres type, qui listent l'ensemble des radionucléides et leur pourcentage en activité, sont indispensables pour établir les analyses de risques radiologiques. Le spectre présenté correspond à celui du dissolvant 222-51 de la cellule 906-B.

5.1.3 Le spectre associé au dissolvant 222-51

Les noyaux radioactifs issus du spectre du dissolvant présenté en annexe 5, dont le pourcentage en activité est élevé sont :

Noyau	désintégration	Energie bêta (MeV)	Portée maximale dans l'eau (cm)	Emission gamma	Energie gamma (keV)	Transmission gamma dans 15 cm d'eau
^{137}Cs	β^-	0,513	0,17	oui	661,657 (84,99%)	27 %
		1,490	0,67			
^{90}Sr	β^-	0,545	0,18	non	/	/
^{90}Y (noyau fils du ^{90}Sr)	β^-	2,279	1,09	non	/	/
^{238}Pu	α		/	non	/	/
^{239}Pu	α		/	non	/	/
^{240}Pu	α		/	non	/	/
^{241}Am	α		/	oui	26.3446 (2,31%)	0 %
					59,541 (35,92%)	0 %
^{244}Cm	α		/	non	/	/

Tableau n°9 : Radionucléides présentant un risque radiologique

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 26/50
ROPERS Jean-Baptiste		

Rayonnements β^- :

Du fait de leur courte portée dans l'eau et des épaisseurs de cuve du dissolvant, ces rayonnements n'auront aucune participation au risque d'exposition externe à distance. Cependant, ils peuvent présenter un risque de contamination interne par inhalation ou ingestion. Des équipements de protection individuels permettent de protéger les opérateurs de ce risque.

Rayonnements α :

Les particules alphas ayant un parcours très court dans l'air, ne présenteront aucun risque d'irradiation. Malgré cela, le transfert des noyaux radioactifs émetteurs alpha dans l'organisme (inhalation, transcutané, et ingestion), n'ont lieu que dans des cas accidentels. Des équipements de protection individuels permettent de protéger les opérateurs de ce risque.

Rayonnements électromagnétiques :

Le tableau n°9 nous montre que les photons de l' ^{241}Am ne sont pas assez énergétiques pour présenter un risque d'exposition externe pour le personnel, leur facteur de transmission vaut 0 %. « Aucun » de ces rayonnements électromagnétiques ne pourra traverser les différents écrans présents dans l'équipement du dissolvant.

Seuls les gammas du ^{137}Cs présentent un risque sur le personnel, son facteur de transmission est de 27 % dans le cas où l'écran d'eau au fond du dissolvant est épais de 15 cm.

Pour conclure cette analyse, seul le ^{137}Cs présente un risque d'exposition externe.

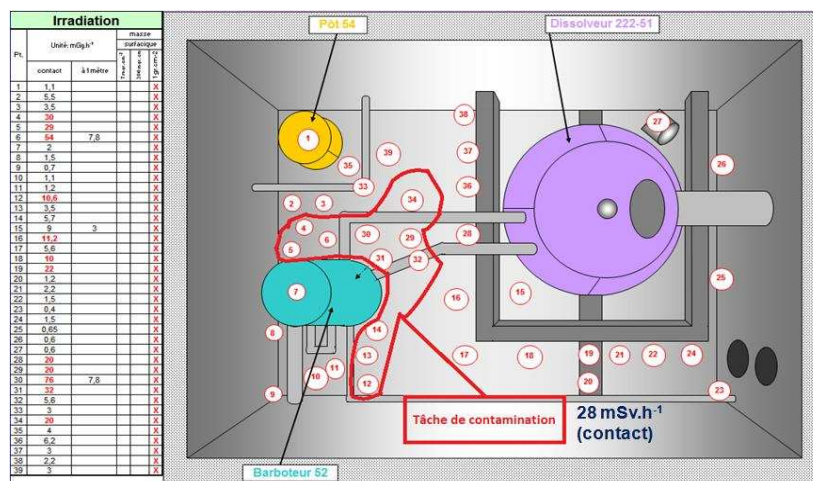
Maintenant, avant d'effectuer les simulations sur Dosimex et Microshield des débits d'équivalent de dose, il est important et indispensable de rechercher les différents termes sources que l'on trouve dans la cellule 906-B où le dissolvant est placé. Les mesures sur le terrain, ainsi que les cartographies sur le dissolvant vont permettre l'identification de ces termes sources.

5.2 Etude des cartographies et recherche des termes sources

L'étude des cartographies, regroupant les points de mesure de débit de dose, permet de caractériser les différents termes sources contribuant au débit d'équivalent de dose présent au poste de travail.

5.2.1 Mesures sur le terrain et étude des cartographies

Les mesures dans les équipements, effectuées par les radioprotectionnistes, leur permettent d'élaborer des cartographies où sont regroupés les points de mesure de débit d'équivalent de dose. Ces cartographies vont permettre de mettre en évidence les termes sources qui auront une influence sur le débit d'équivalent de dose au poste de travail.



Cartographie n°1 : Vue de dessus de la cellule 906 B et du dissolvant 222-51

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 27/50
ROPERS Jean-Baptiste		

La cartographie n°1, représentant une vue de dessus de la cellule 906 B et du dissolvant 222-51, permet de mettre en évidence une tache de contamination dans cette pièce (en rouge). Le débit d'équivalent de dose au « contact » est de 28 mSv.h⁻¹.

5.2.2 Mise en évidence des termes sources

L'étude des cartographies a permis de mettre en évidence trois termes sources :

- Une tache de contamination
- Le fond du dissolvant
- Le panier

L'image n°30 présente l'emplacement de ces termes sources du dissolvant.

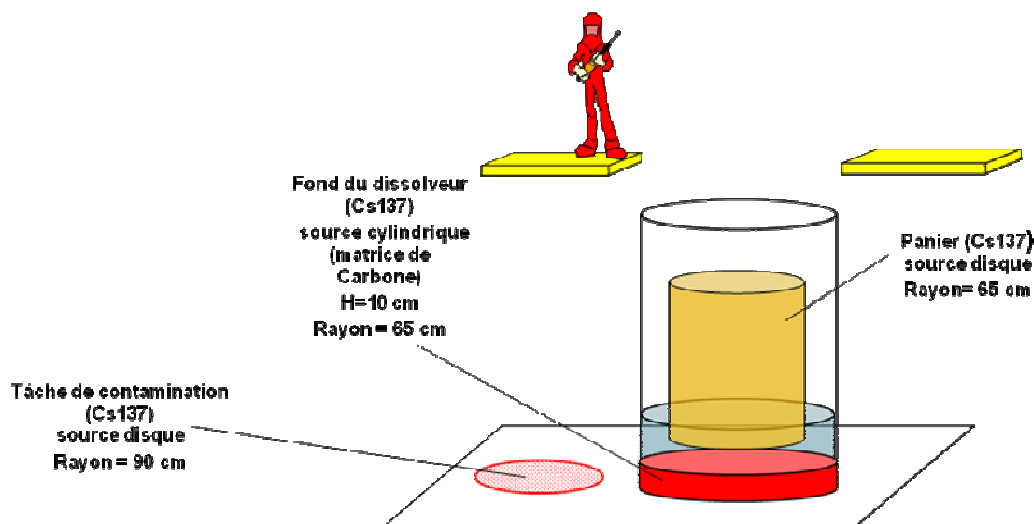


Image n°30 : Terme source du dissolvant

Désormais, les calculs des activités de ces termes sources peuvent être effectués avec les deux logiciels.

5.3 Calcul des activités des termes sources

5.3.1 Calculs sur Dosimex

Pour effectuer les calculs d'activités de ces termes sources, l'opération sur Dosimex est la suivante.

Il suffit de rentrer dans le logiciel les paramètres demandés qui sont :

- Le radionucléide (¹³⁷Cs dans le cadre de l'étude)
- La distance source-point de mesure
- La géométrie du terme source simulé
- La mesure du débit d'équivalent de dose H*(10) en μSv.h⁻¹

Tout d'abord l'utilisateur clique sur l'onglet « calcul activité vs dose » entouré en bleu sur l'image n°31.



Image n°31 : Option de calcul d'activité de source à partir d'une mesure H*(10)

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 28/50
ROPERS Jean-Baptiste		

Une fois cette manipulation effectuée, l'utilisateur choisi la géométrie du terme source et donne le/les radionucléide(s) de sa source. Ensuite il saisit les différents paramètres indiqués pour que le logiciel puisse effectuer son calcul.

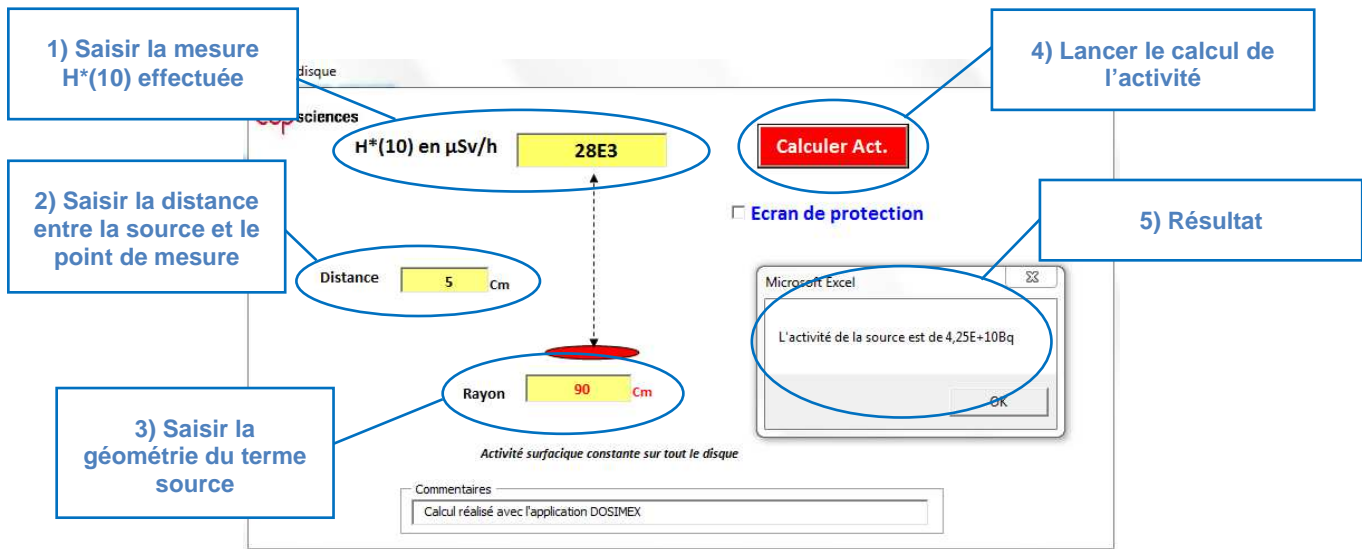


Image n°32 : Calcul de l'activité de la tache de contamination sur Dosimex

Pour l'exemple du calcul de l'activité de la tache de contamination présenté sur l'image n°32, Dosimex nous donne une activité de 4,25.10¹⁰ Bq.

5.3.2 Calcul sur Microshield

Pour déterminer les activités des termes sources sur Microshield, la méthode est plus complexe. Ce logiciel n'effectue que des calculs de débit de Kerma à partir d'une activité et non l'inverse.

Pour pouvoir remédier à cette problématique et déterminer l'activité d'un terme source, l'utilisateur doit simuler pour une activité arbitraire (1 Ci par exemple) le débit de Kerma pour la géométrie choisie du terme source.

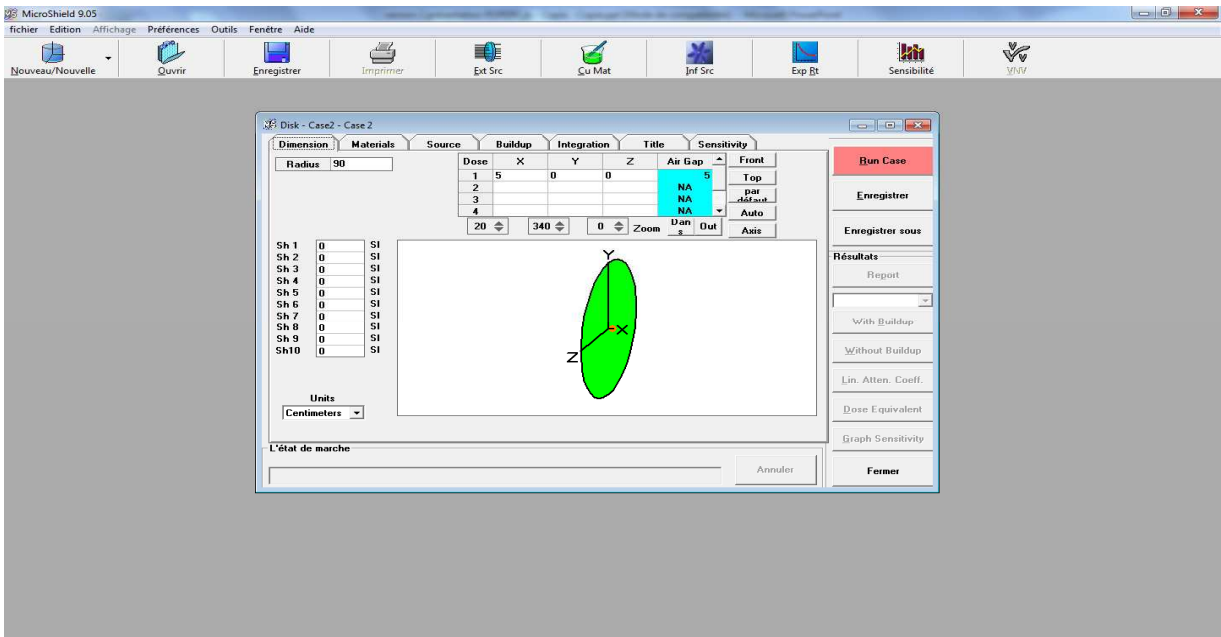


Image n°33 : Simulation du calcul de l'activité de la tache de contamination sur Microshield

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 29/50
ROPERS Jean-Baptiste		

Il devra donc résoudre l'égalité suivante :

$$A_{tache} = \frac{\dot{H}^*(10)_{mesuré} \times 1 \text{ Ci}}{\text{Débit Kerma}_{simulé}} = \frac{28 \text{ (mSv.h}^{-1}\text{)}}{20,88 \text{ (mGy.h}^{-1}\text{)}} = 1,34 \text{ Ci} = 4,96.10^{10} \text{ Bq}$$

Cependant ce calcul est erroné car les deux grandeurs $\dot{H}^*(10)$ et le Débit de Kerma ne sont pas identiques. Pour corriger ce problème, l'utilisateur doit donc effectuer la conversion du débit de Kerma simulé vers le débit d'équivalent de dose ambiant $\dot{H}^*(10)$ pour chaque raie gamma.

L'équation devient donc :

$$A_{tache} = \frac{\dot{H}^*(10)_{mesuré} \times 1 \text{ Ci}}{\text{Débit de Kerma}_{simulé} \times FCD} = \frac{\dot{H}^*(10)_{mesuré} \times 1 \text{ Ci}}{\dot{H}^*(10)_{simulé}}$$

$$A_{tache} = \frac{28 \text{ (mSv.h}^{-1}\text{)}}{24,4852 \text{ (mSv.h}^{-1}\text{)}} = 1,14 \text{ Ci} = 4,23.10^{10} \text{ Bq}$$

5.3.3 Conclusion de l'étude des termes sources

Pour conclure, nous obtenons les activités des termes sources suivant :

Logiciel	Dosimex	Microshield		Ecart avec conversion (%)	Ecart sans conversion (%)
		Avec conversion	Sans conversion		
Activité du panier (Bq)	$3,57.10^{10}$	$3,55.10^{10}$	$4,16.10^{10}$	-0,56	14,18
Activité du fond du dissolvant (Bq)	$4,81.10^{11}$	$4,23.10^{11}$	$5,36.10^{11}$	-14	29
Activité du panier assaini (Bq)	$1,78.10^{10}$	$1,7788.10^{10}$	$2,08.10^{10}$	-0,24	14
Activité de la tache (Bq)	$4,25.10^{10}$	$4,23.10^{10}$	$4,96.10^{10}$	-0,45	14,3

Tableau n°10 : Termes source avec leur activité pour Microshield et Dosimex

Explication des écarts :

On observe entre Dosimex et Microshield sans conversion, des écarts variant de 14 à 29 %. L'origine de ces écarts provient de la non conversion du débit de Kerma en débit d'équivalent de dose ambiant $\dot{H}^*(10)$.

Entre Dosimex et Microshield avec conversion, les écarts pour le panier, le panier assaini et la tache de contamination sont négligeables. Cependant, pour le fond du dissolvant, l'écart entre les activités vaut 14 %, ce qui est causé par les Build Up utilisés par Dosimex et Microshield. Dosimex utilise un Build Up de 2.88 alors que celui de Microshield est de 2.52, ce qui représente un écart de 14 %, et donc un écart de 14 % sur l'activité.

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 30/50
ROPERs Jean-Baptiste		

Nous savons que les deux logiciels utilisent le même modèle de Build Up, cependant on remarque que dans le cas du dissolvant, ces Build Up ne sont pas identiques. Ces écarts viennent de la méthode de calcul de découpage des sources cylindriques sur Microshield et Dosimex.

Maintenant, les simulations vont être effectuées sur Dosimex et Microshield pour les activités calculées avec et sans conversion du débit de Kerma sur six configurations de remontée du panier du dissolvant. Puis comparer ces résultats aux mesures effectuées au poste de travail et donner les origines des écarts que nous allons trouver.

5.4 Simulation du débit d'équivalent de dose au poste de travail pour six configurations du dissolvant

5.4.1 Présentation des six configurations

Pour six configurations de remontée du panier dans le dissolvant, l'objectif est de calculer le débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ avec Microshield et Dosimex.

La première configuration est la suivante : Le panier et le fond du dissolvant sont noyés sous un écran d'eau de 15 cm. Le but de la simulation sur cette configuration est de déterminer le débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ au poste de travail.

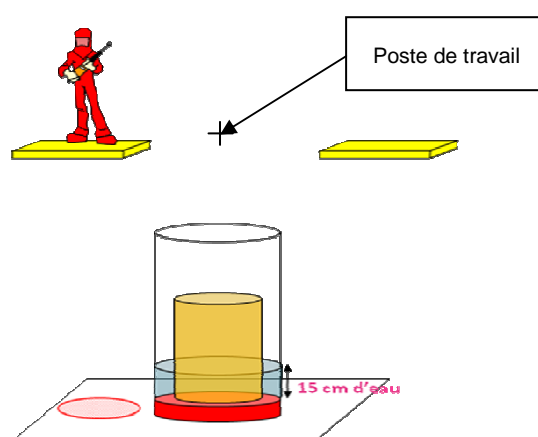


Image n°34 : Configuration 1

Au fil des configurations, le panier est remonté, puis assaini (évacuation des matières radioactives) sur la configuration 5, qui est la suivante :

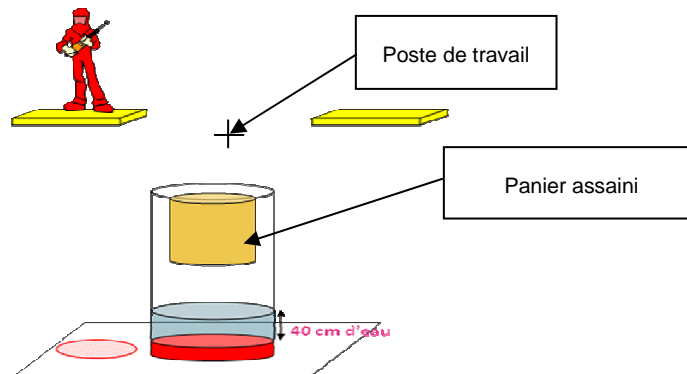


Image n°35 : Configuration 5

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 31/50
ROPERS Jean-Baptiste		

Enfin la sixième et dernière configuration consiste à la remontée de 30 cm du panier assaini de la configuration 5.

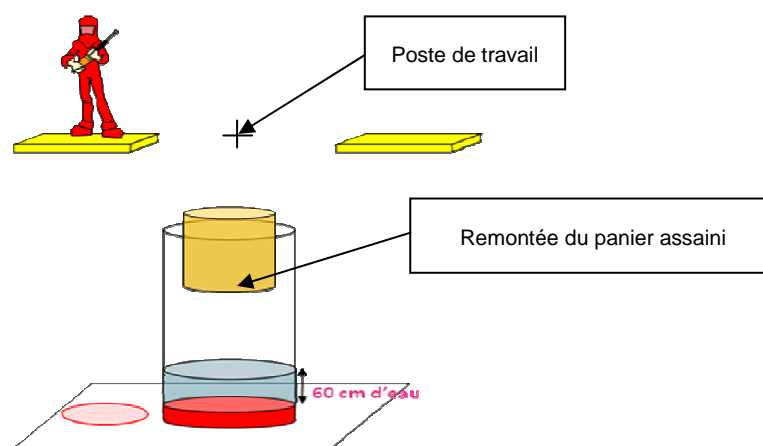


Image n°36 : Configuration 6

Comme il est précisé précédemment, l'objectif est de déterminer pour ces six configurations le débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ pour chacune de ces configurations. Le chapitre suivant va présenter les résultats obtenus avec Dosimex et Microshield ainsi que l'origine des écarts entre ces deux logiciels.

5.4.2 Résultats des simulations pour les six configurations et comparaison aux mesures au poste de travail

5.4.2.1 Résultats des simulations et origine des écarts

Les résultats des simulations du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ au poste de travail pour Dosimex, Microshield sans conversion et Microshield avec conversion, sont présentés dans le tableau suivant :

Configuration	$H^*(10)$ Dosimex (mSv/h)	$H^*(10)$ Microshield sans conversion	$H^*(10)$ Microshield avec conversion (mSv/h)	Ecart Dosimex- Microshield sans conversion	Ecart Dosimex- Microshield avec conversion
1	0,563	1,128	0.560	50 %	-1 %
2	1.227	1.492	1.201	18 %	-2 %
3	0.434	0.602	0.492	28 %	12 %
4	0.640	0.846	0.700	24 %	9 %
5	0.415	0.544	0.452	24 %	8 %
6	0.352	0.480	0.362	27 %	3 %

Tableau n°11 : Résultats des simulations sur Microshield et Dosimex

Origine des écarts entre Dosimex et Microshield avec conversion :

Lors des simulations, le fond du dissolvant, représenté par une source cylindrique, est noyé sous un écran d'eau. Cet écran, ainsi que la source elle-même, vont générer un Build Up, qui est à l'origine des écarts que l'on retrouve sur les simulations entre Microshield et Dosimex. Durant les simulations le même modèle de Build Up qui a été utilisé est celui de Taylor.

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 32/50
ROPERS Jean-Baptiste		

La méthode de calcul du débit de « dose » pour une source cylindrique diffère entre Microshield et Dosimex. Le tableau suivant donne les différences de calcul que l'on trouve entre les deux logiciels.

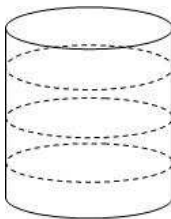
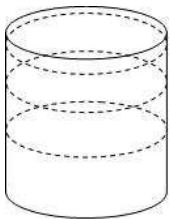
	Microshield	Dosimex
Méthode de calcul source cylindrique	Découpage en part égale du cylindre	Découpage en puissance du cylindre
Image du découpage		

Tableau n°12 : Méthode de calcul pour une source cylindrique

Selon la méthode de découpage de la source cylindrique, les Build Up générés seront différents. L'origine de l'écart sur les simulations entre Microshield et Dosimex est donc cette différence de méthode de découpage qui va induire des Build Up différents.

Origine des écarts entre Dosimex et Microshield sans conversion :

Les écarts entre Dosimex et Microshield sont dus à la surestimation des activités calculées sans prendre en compte la conversion du débit de Kerma en Débit d'équivalent de dose $H^*(10)$. Ces calculs effectués avec les activités des sources déterminées sans effectuer la conversion du débit de Kerma en débit d'équivalent de dose $H^*(10)$ sont mathématiquement faux.

Il est donc important effectuer cette conversion du débit de Kerma en $H^*(10)$ pour éviter des surestimations d'activités qui généreront des écarts de simulations entre deux logiciels.

5.4.2.2 Comparaison des simulations avec les mesures $H^*(10)$ au poste de travail

Des mesures au poste de travail ont été réalisées.

5.4.2.2.1 Comparaison entre simulations et mesures

Le tableau suivant présente les écarts entre les simulations et les mesures :

Configuration	$H^*(10)$ Dosimex (mSv/h)	$H^*(10)$ Microshield (mSv/h)	Mesure $H^*(10)$ (mSv/h)	Ecart Dosimex-mesure	Ecart Microshield-mesure
1	0,563	0.560	0.450	-25 %	- 24%
2	1.227	1.201	1.200	-2 %	-0.1 %
3	0.434	0.492	0.400	-8 %	-23%
4	0.640	0.700	0.800	20 %	13 %
5	0.415	0.452	0.400	- 4 %	-13 %
6	0.352	0.362	0.400	12 %	10 %

Tableau n°13 : Comparaison des résultats trouvés sur Dosimex et Microshield avec les mesures effectuées pour les activités de sources calculées avec conversion du Débit de Kerma

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 33/50
ROPERS Jean-Baptiste		

On calcule un écart moyen de :

- 11,9 % entre Dosimex et les mesures réalisées
- 13,7 % entre Microshield et les mesures réalisées

Les écarts entre les deux logiciels et les mesures sont proches et corrects pour une étude de radioprotection de terrain.

Il est important de préciser que la mesure reste l'élément le plus important lors d'opérations de démantèlements, on peut effectuer autant de simulations que l'on souhaite. L'ensemble des hypothèses prises par l'opérateur pour effectuer ses calculs ne représente pas la réalité physique du terrain (cas de la tache de contamination simulée par un disque de 90 cm, alors que sa forme géométrique réelle est différente).

Les logiciels permettent simplement d'estimer les débits d'équivalent de dose à partir de mesures sur le terrain.

5.5 Conclusion de l'étude du dissolvreur

L'étude de ses six configurations avec l'aide de Microshield et Dosimex montre que les deux logiciels apportent des résultats corrects par rapport aux mesures effectuées, pour des études de radioprotection terrain.

Le tableau suivant résume l'étude sur le dissolvreur :

	Microshield	Dosimex	Commentaire
Simulation par rapport aux mesures	Correct	Correct	Ecart moyen inférieur à 15 %
Grandeurs calculées	$\dot{K}; \dot{E}$	$\dot{K}; \dot{H}^*(10); \dot{H}_p(10); \dot{H}'(0,07)$	Utiliser les coefficients de Conversion ICRU 57 pour calculer les autres grandeurs sur Microshield
Calcul d'une activité à partir d'une mesure $H^*(10)$	Indirect	Direct	Calculs supplémentaires sur Microshield avec coefficients de conversion de l'ICRU 57

Tableau n°14 : Conclusion de l'étude sur le Dissolvreur

Microshield calcule un débit de Kerma, mais ne permet pas le calcul du débit d'équivalent de dose $H^*(10)$, qui lui est mesuré sur le terrain. Il n'est donc pas possible de comparer un débit de Kerma avec une mesure terrain $H^*(10)$.

Pour cela, l'utilisateur de Microshield est dans l'obligation de procéder à la conversion du Débit de Kerma vers le Débit d'équivalent de dose pour chaque raie gamma en utilisant les coefficients $H^*(10)$ sur Kerma reportés dans le REPORT 57 de l'ICRU. Malheureusement, ce calcul nécessite d'avoir à disposition ce document.

De plus, pour déterminer les activités des termes sources identifiés, l'opérateur doit effectuer des calculs supplémentaires à la main, alors que Dosimex calcule ces activités lui-même.

Dosimex est donc le logiciel le plus adapté des deux pour les simulations radiologiques terrain dans le cas d'opérations de démantèlement. Dans le cadre de cette étude du Dissolvreur, il est le logiciel qui apporte des résultats les plus proches des valeurs mesurées sur le terrain et ne nécessitent pas de calculs supplémentaires chez l'utilisateur pour déterminer un débit d'équivalent de dose ambiant.

Pour me prononcer totalement sur le choix du logiciel, j'ai également étudié les options complémentaires proposées par chacun des deux logiciels.

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 34/50
ROPERS Jean-Baptiste		

6 Présentation des fonctions de calculs proposées par Microshield et Dosimex

L'objectif de ce chapitre est de présenter les différentes options de calculs que Dosimex et Microshield disposent.

6.1 Option Dosimex

En plus de la capacité de calculer des débits d'équivalent de dose à partir d'une activité et de faire le calcul inverse, ce logiciel dispose de nombreuses options de calculs. Pour les utiliser, l'utilisateur doit cliquer sur l'icône « option » dans Dosimex (encadré en noir sur l'image).



Image n°37 : Choix des options sur Dosimex

Les possibilités de calculs qui apparaissent et qui peuvent être utiles en radioprotection sur le terrain sont entourées en noir sur les images :

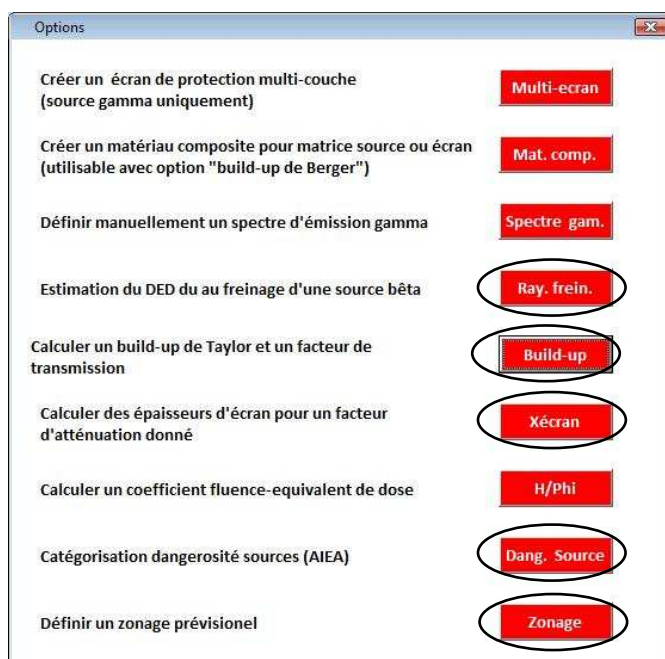


Image n°38 : Options sur Dosimex

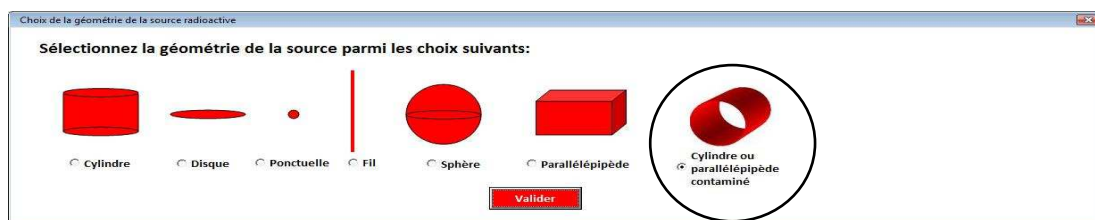


Image n°39 : Choix d'un calcul de contamination sur facique sur Dosimex

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 35/50
ROPERS Jean-Baptiste		

Nous allons prendre deux exemples concrets qui nous ont permis d'utiliser les options « Estimation du débit d'équivalent de dose du au rayonnement de freinage d'une source bêta » et « Estimation d'une contamination surfacique ».

6.1.1.1 Estimation du débit d'équivalent de dose du au rayonnement de freinage d'une source bêta avec Dosimex

Nous disposons d'une source de ⁹⁰Sr scellée dans deux capsules en inox d'épaisseurs de 1,6 mm et 1,65 mm, un conteneur de stockage en inox d'épaisseur égale à 5 mm. L'ensemble est entouré par un château de plomb d'épaisseur de 10 cm (dimension des capsules en annexe 6).

L'objectif de la simulation est d'estimer par simulation le débit d'équivalent de dose à 1 mètre de cette source scellée.

Nous disposons des informations suivantes : Le ⁹⁰Sr et son noyau fils l'⁹⁰Y sont toujours dans des proportions égales, de plus l'activité de cette source était de 10⁴ Curie en 1989. Par décroissance radioactive, les activités de ces deux noyaux sont aujourd'hui égales à 9,89.10¹³ Bq. Par simulation, nous obtenons un débit de dose égal à 0 µSv/h pour le ⁹⁰Sr, et 78,15 µSv.h⁻¹ pour l'⁹⁰Y. Une mesure photon à 1 mètre de la source a été effectuée, l'appareil de mesure nous indique 60 µSv.h⁻¹.

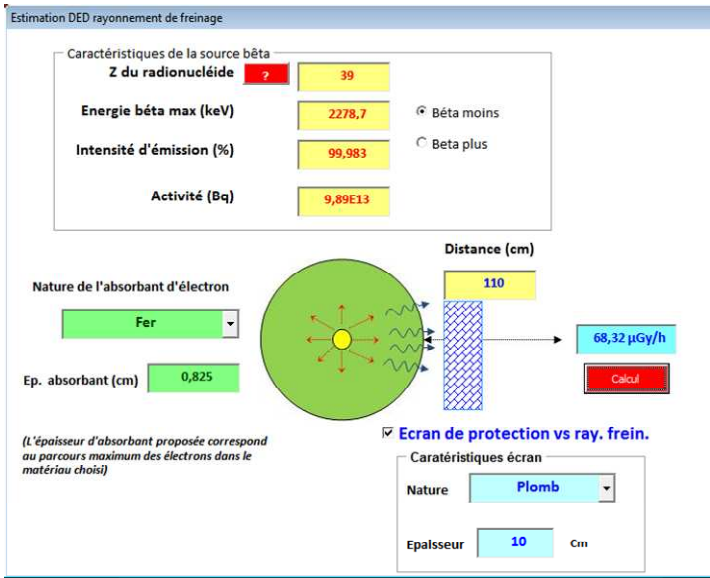


Image n°40 : Simulation du rayonnement de freinage s ur Dosimex

Sur l'image représentant la simulation du rayonnement de freinage des β⁻ de l'⁹⁰Y, la valeur calculée est un débit de Kerma, Dosimex donne également la valeur H*(10).

6.1.1.2 Estimation d'une contamination surfacique pour la piscine 907

L'objectif de cette simulation est d'estimer la contamination surfacique, après assainissement de la piscine 907, pour obtenir un débit d'équivalent de dose H*(10) égal à 150 µSv/h au centre de la piscine.

Les Dimensions de la piscine 907 sont 11,57 m de longueur, 4,34 m de largeur et 4,3 m de hauteur. Elle est simulée comme étant un parallélépipède ayant les dimensions décrites précédemment.

Après calcul, Dosimex nous indique une activité de 1,77.10¹⁰ Bq sur la surface totale de la piscine qui vaut 1,87.10⁶ cm². Ainsi la contamination surfacique ne doit pas dépasser 9463.2 Bq.cm⁻² pour que le débit d'équivalent de dose ambiant H*(10) ne dépasse pas 150 µSv/h au centre de cette piscine. La simulation peut également être effectuée avec plusieurs radionucléides.

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 36/50
ROPERS Jean-Baptiste		

Cette fonction sur Dosimex permet également d'estimer le débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ à 1 m du fond de la piscine, qui vaut 191,67 $\mu\text{Sv/h}$.

Comme nous pouvons le voir, Dosimex possède plusieurs options qui s'avèrent intéressantes dans le cas de simulations en radioprotection. Des estimations de contaminations surfaciques sont parfois utiles, notamment dans le cadre d'assainissement.

6.1.2 Option Microshield

Microshield, contrairement à Dosimex possède la capacité de déterminer le débit de Kerma en tout point dans l'espace.

Pour une source cylindrique de rayon de 30 cm et de 40 cm de hauteur, on cherche le débit de Kerma au point-dose situé à 10 cm du cylindre sur l'axe x et à 30 cm du cylindre sur l'axe y.

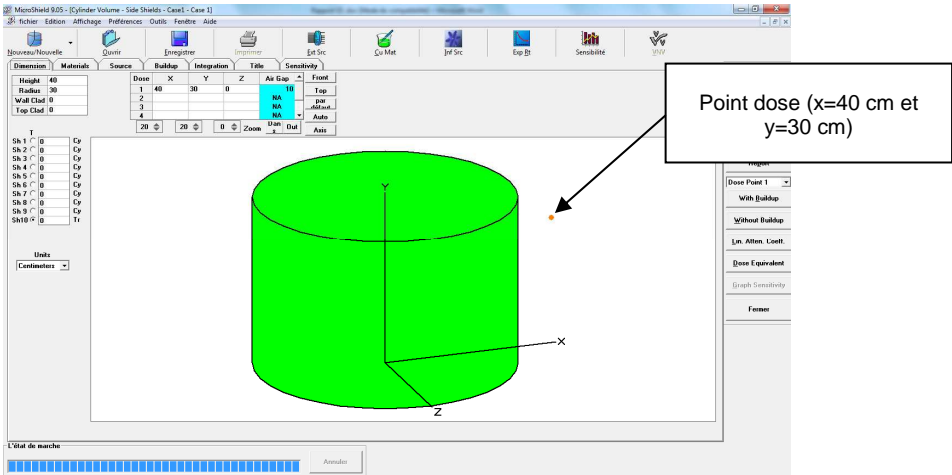


Image n°42 : Simulation sur Microshield pour un point dose désaxé

La simulation nous donne un débit de Kerma de 8,794 mGy.h⁻¹.

Sur Dosimex, cette option n'existe pas, mais il est tout à fait possible d'effectuer ce type de simulation avec des calculs supplémentaires pour l'utilisateur. Dosimex n'effectue des calculs de débit de Kerma que sur l'axe x et y et non en tout point de l'espace.

Pour réaliser le même calcul que sur Microshield, tout d'abord il faut simuler sur Dosimex, le débit de Kerma à 10 cm de la source cylindrique.

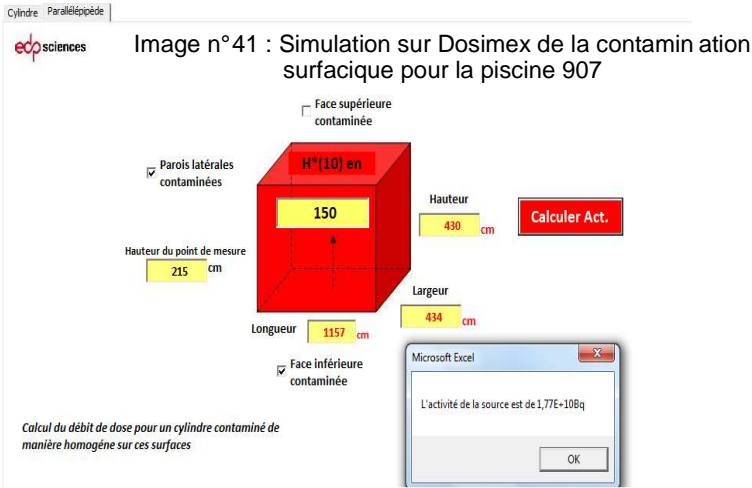


Image n°41 : Simulation sur Dosimex de la contamination surfacique pour la piscine 907

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 37/50
ROPERS Jean-Baptiste		

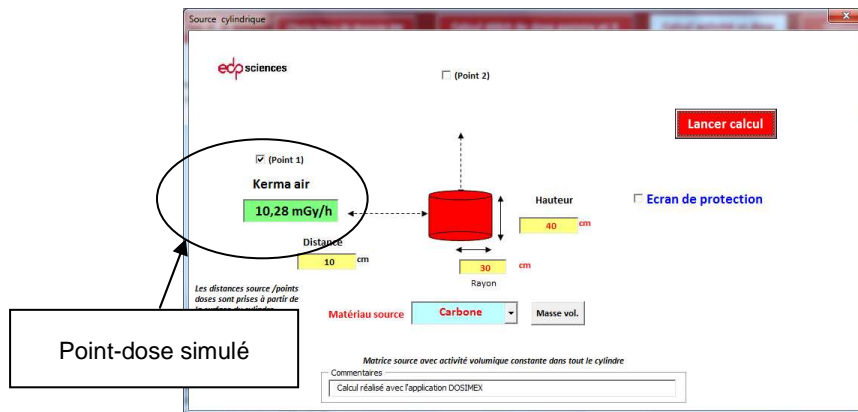


Image n°43 : Simulation sur Dosimex pour un point-dose axé

Ensuite, pour déterminer le Débit de Kerma sur le point-dose décalé, l'utilisateur doit calculer un facteur de correction F_c qui est le suivant :

$$F_c = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2\theta}$$

Les schémas suivant représentent les angles θ ; θ_1 et θ_2 .

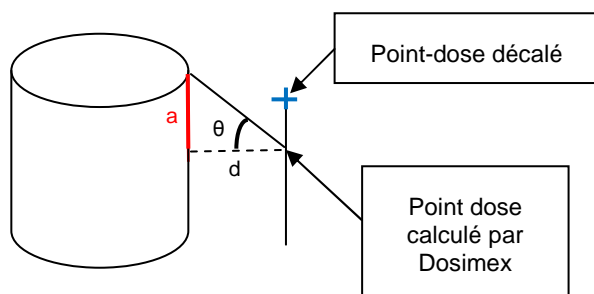


Image n°44 : Schéma représentant l'angle θ

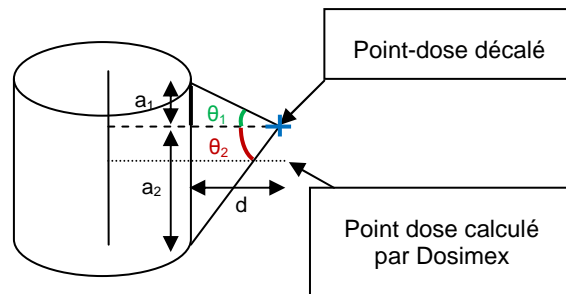


Image n°45 : Schéma représentant les angles θ_1 et θ_2

A partir de l'image n°44, on détermine l'angle θ

On trouve $\tan \theta = \frac{a}{d} = \frac{20}{10} = 2$ soit $\theta = 1,107 \text{ rad}$

A partir de l'image n°45 : on détermine les angles θ_1 et θ_2 .

On trouve $\tan \theta_1 = \frac{a_1}{d} = \frac{10}{10} = 1$ soit $\theta_1 = 0,78 \text{ rad}$

$\tan \theta_2 = \frac{a_2}{d} = \frac{30}{10} = 3$ soit $\theta_2 = 1,25 \text{ rad}$

Ainsi le facteur de correction est donc :

$$F_c = \frac{0,78 + 1,25}{2 \times 1,107} = 0,919$$

Il ne reste plus qu'à multiplier ce facteur de correction au débit de Kerma simulé sur Dosimex :

$$\dot{K}_{\text{corrigé}} = 10,28 \times 0,919 \text{ mGy.h}^{-1}$$

$$\dot{K}_{\text{corrigé}} = 9,447 \text{ mGy.h}^{-1}$$

La valeur sur Microshield est de $8,794 \text{ mGy.h}^{-1}$, on trouve un écart de - 7 % entre les deux logiciels.

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 38/50
ROPERS Jean-Baptiste		

7 Conclusions des comparaisons

Le tableau suivant présente les conclusions sur l'ensemble des comparaisons :

Etude	Critère	Microshield	Dosimex
Comparaison fonctionnement des logiciels	Calcul $\dot{\phi}$ d > 5 cm	Valide	Valide
	Calcul $\dot{\phi}$ d < 5 cm	Non valide	Valide
	Grandeurs calculées directement	$\dot{K}; \dot{E}$	$\dot{K}; \dot{H}^*(10); \dot{H}_p(10); \dot{H}'(0,07)$
	Modèle de Build Up Factor	Modèle de Taylor (26 écrans)	Modèle de Berger (infinité d'écran) Modèle de Taylor (26 écrans)
Comparaison Dissolveur	Simulation par rapport aux mesures	Correct	Correct
	Calcul d'une activité à partir d'une mesure $H^*(10)$	Indirect	Direct
Comparaison sources simples	Source cylindrique	Découpage en part égale du cylindre	Découpage en puissance du cylindre
	Source ponctuelle d' ^{241}Am avec écran de Plomb	Non valide	Valide
Ergonomie	Facilité d'utilisation	Complexe	Simple
Options	Point-dose tout espace	Direct	Indirect
	Estimation du débit d'équivalent de dose du au rayonnement de freinage d'une source bêta	non	oui
	Estimation d'une contamination surfacique	non	oui

Tableau n°15 : Conclusions des études de comparaisons

Dans le cas de l'étude sur le dissolvant, les deux logiciels déterministes apportent des résultats corrects par rapport aux mesures effectuées, pour des études de radioprotection terrain. Cependant, pour Microshield, l'utilisateur est dans l'obligation de réaliser des calculs supplémentaires pour convertir le débit de kerma en débit d'équivalent de dose $H^*(10)$ qui représente la mesure sur le terrain, en utilisant les coefficients $H^*(10)$ sur Kerma reportés dans le REPORT 57 de l'ICRU.

Dosimex, quant à lui, effectue lui-même cette conversion, et donne à l'utilisateur ce débit d'équivalent de dose $H^*(10)$ en plus du débit de Kerma. En dehors de ce calcul supplémentaire pour Microshield, les

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 39/50
ROPERS Jean-Baptiste		

deux logiciels apportent des résultats acceptables pour de la radioprotection de terrain (11.9 % d'écart entre Dosimex et les mesures, et 13.7 % d'écart entre Microshield et les mesures).

L'étude de l'évolution du débit de Kerma en fonction de l'activité pour une source ^{241}Am , nous montre que le choix du spectre d'émission gamma est important. Il peut différer selon les logiciels et donc apporter des calculs de débit de dose non fiables, notamment lorsqu'un écran de protection est mis en place entre cette source et le point-dose. Cette étude nous a montré que Microshield oublie la raie de 663,71 keV, qui malgré sa faible intensité d'émission, aura un débit de fluence non négligeable lorsque l'activité de la source sera de l'ordre de 10^{13} Bq. Cette raie de 663,71 keV, par sa nature d'interaction rayonnement matière, aura un facteur de transmission de 0,0779, soit 7.79 % des gammas incidents traverseront l'écran et pourront donc transférer leur énergie au point-dose. Dosimex n'oublie pas cette raie, ce qui lui permet de ne pas sous-estimer le débit de Kerma au point-dose et d'apporter à l'utilisateur des résultats fiables.

Enfin, Dosimex est un logiciel qui permet à l'utilisateur de simuler un grand nombre de cas concrets, que Microshield version 9.05 ne peut pas effectuer. Les estimations du débit d'équivalent de dose du au rayonnement de freinage de la source de ^{90}Sr et l'estimation de la contamination surfacique de la piscine 907 sont des exemples concrets qui ont pu être simulés à l'aide de Dosimex.

Ainsi, cette étude montre que Dosimex est le logiciel le mieux adapté au besoin de simulations en radioprotection terrain. Il est tout à fait capable de donner des résultats fiables et il est d'une simplicité d'utilisation. Il possède également des fonctions de calculs supplémentaires qui peuvent s'avérer fortement utiles dans le cadre de simulation radioprotection terrain.

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 40/50
ROPERS Jean-Baptiste		

Conclusion

Durant mon immersion dans le secteur DQSSE/RI à AREVA NC La Hague, j'ai eu l'occasion de mettre en pratique les connaissances en radioprotection que j'ai acquises durant mon cursus universitaire. J'ai également eu la chance d'approfondir ces connaissances afin de comprendre le fonctionnement physique des logiciels de calculs de doses que j'ai utilisés durant ce stage. Ce travail va me permettre dans mes activités professionnelles futures d'avoir un regard critique sur les résultats que les logiciels de radioprotection apportent. Comprendre leur fonctionnement physique permet à l'utilisateur d'avoir ce jugement critique qui peut parfois être utile et important, comme nous avons pu le voir sur certaines études présentées dans ce rapport.

De plus, j'ai pu effectuer des mesures sur le terrain, ce qui m'a permis d'utiliser le matériel de mesure de radioprotection opérationnelle, de comprendre que ces mesures sont d'une importance capitale pour le radioprotectionniste. Celui-ci peut effectuer autant de simulations qu'il le désire, ses simulations ne seront pas équivalentes à la réalité du terrain.

J'ai également eu l'occasion de comprendre les risques auxquels les travailleurs du nucléaire sont exposés et y être confronté durant mon travail en zone nucléaire réglementée. Ainsi l'exposition à ces risques m'a obligé à porter les équipements de protection individuel adaptés à ces risques. Dans le cas d'un risque d'exposition interne, ils furent le masque à cartouche, une tenue active, trois paires de sur bottes et trois paires de gants. J'ai également porté les dosimètres passifs et le dosimètre opérationnel.

Enfin, mes passages en zone nucléaire réglementée m'ont permis d'avoir un avant-goût des bonnes pratiques que les opérateurs doivent avoir pour travailler en zone réglementée, soit : comprendre, connaître les signalisations présentant les risques et avoir les bons réflexes en cas de situations dangereuses, comme le port du masque à cartouche lors d'une évacuation de zone réglementée. Ainsi ce stage m'a permis d'acquérir une expérience sur le terrain, mais aussi d'utiliser des logiciels de calculs de dose, comprendre leur fonctionnement physique et de travailler sur un sujet passionnant.

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 41/50
ROPERS Jean-Baptiste		

Bibliographie

- Calculs de doses générées par les rayonnements ionisants – Principes et utilitaires, Vivier. A, Lopez.G, 2012
- Capsules de titanate de strontium-ELAN II B, Hemery.Ph, 2009
- Code de calcul de dose Gamma et X- Manuel d'utilisation et dossier de validation, Vivier.A, Lopez.G, 2013
- Conversion Coefficient for use in Radiological Protection against External Radiation, ICRU Report 57, 1998
- Cours de génie atomique-Protection contre l'exposition externe, Diop.C, CEA/SACLAY
- Les logiciels de radioprotection-Licence AGEDDEN, Lopez.G,
- Modes opératoires labos cours de fabrication
- Perfectionnement en spectrométrie gamma Modélisation-Code Monte-Carlo, Huot.N, CEA/SACLAY
- Préparation des dissolveurs 222-51 et 222-01 pour les opérations de reprise des déchets sur l'atelier HADE Phase 1, Descamps.F, 2013
- Procédure-Spectres, codes types spectre et paramètres de calcul associés pour la détermination de l'activité dans les déchets-campagne retraitement 2013, Tondut.L, 2014

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 42/50
ROPERS Jean-Baptiste		

ANNEXE 1 : Démonstration du débit de fluence

Soit une source gamma ponctuelle, d'activité A (Bq), positionnée au centre d'une sphère, émettant AI_γ photons par seconde. Cependant, ce nombre de photons correspond au nombre de photons émis tout autour de la source soit dans une sphère entourant la source (cas d'une source ponctuelle).

L'objectif est de déterminer le nombre de photons arrivant sur une surface P par unité de temps.

Nous définissons l'angle solide : $\Omega = \frac{S}{r^2} = 2\pi(1 - \cos \theta)$

Or $\cos \theta = \frac{d}{a}$ et $a^2 = d^2 + r^2$

On peut donc écrire $\cos \theta = \frac{d}{\sqrt{d^2 + r^2}}$

Ainsi l'angle solide se note : $\Omega = 2\pi \left(1 - \frac{d}{\sqrt{d^2 + r^2}}\right)$

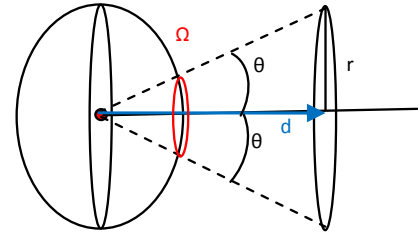


Image n°46 : Schéma représentant le nombre d'entités arrivant sur la surface de rayon r

Nombre d'entités arrivant sur la surface par unité de temps :

$$\frac{dNa}{dt} = \frac{dN}{dt} \times \frac{\Omega}{4\pi}$$

$$\frac{dNa}{dt} = \frac{dN}{dt} \times \frac{2\pi}{4\pi} \times \left(1 - \frac{d}{\sqrt{d^2 + r^2}}\right)$$

$$\frac{dNa}{dt} = \frac{AI}{2} \times \left(1 - \frac{d}{\sqrt{d^2 + r^2}}\right)$$

$$\frac{dNa}{dt} = \frac{AI}{2} \times \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{r^2}{d^2}}}\right)$$

Cas particulier

- Si $d \gg r$

Développement limité à l'ordre 1

$$\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{r^2}{d^2}}} = 1 - \frac{1}{2} \frac{r^2}{d^2}$$

Soit

$$\frac{dNa}{dt} = \frac{AI}{2} \times \left(1 - 1 + \frac{1}{2} \frac{r^2}{d^2}\right)$$

$$\frac{dNa}{dt} = \frac{AI}{2} \times \frac{1}{2} \frac{r^2}{d^2}$$

$$\frac{dNa}{dt} = \frac{AI}{4} \times \frac{r^2}{d^2}$$

$$\frac{dNa}{dt} = \frac{AI}{4\pi d^2} \times \pi r^2$$

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 43/50
ROPERS Jean-Baptiste		

$\pi \cdot d^2$ correspond à la surface S ciblée

$\frac{AI}{4\pi d^2}$ correspond au débit de fluence $\frac{d\phi}{dt} = \frac{d^2N}{dtds}$ qui s'exprime en photons.cm⁻².s⁻¹.

On a donc :

$$\frac{dNa}{dt} = \frac{d\phi}{dt} \times S$$

Ce nombre d'entités s'exprime en photons.cm⁻².s⁻¹.

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 44/50
ROPERS Jean-Baptiste		

TABLE A.21 – Conversion coefficients^a for the ambient dose equivalent, $H^*(10)$, and directional dose equivalent, $H'(0.07, 0^\circ)$, from photon fluence and air kerma free-in-air

Photon energy (MeV)	$H^*(10)/K_a$ (Sv/Gy)	$H'(0.07, 0^\circ)/K_a$ (Sv/Gy)	K_a/Φ (pGy cm ²)	$H^*(10)/\Phi$ (pSv cm ²)	$H'(0.07, 0^\circ)/\Phi$ (pSv cm ²)
0.010	0.008	0.95	7.60	0.061	7.20
0.015	0.26	0.99	3.21	0.83	3.19
0.020	0.61	1.05	1.73	1.05	1.81
0.030	1.10	1.22	0.739	0.81	0.90
0.040	1.47	1.41	0.438	0.64	0.62
0.050	1.67	1.53	0.328	0.55	0.50
0.060	1.74	1.59	0.292	0.51	0.47
0.080	1.72	1.61	0.308	0.53	0.49
0.100	1.65	1.55	0.372	0.61	0.58
0.150	1.49	1.42	0.600	0.89	0.85
0.200	1.40	1.34	0.856	1.20	1.15
0.300	1.31	1.31	1.38	1.80	1.80
0.400	1.26	1.26	1.89	2.38	2.38
0.500	1.23	1.23	2.38	2.93	2.93
0.600	1.21	1.21	2.84	3.44	3.44
0.800	1.19	1.19	3.69	4.38	4.38
1	1.17	1.17	4.47	5.20	5.20
1.5	1.15	1.15	6.12	6.90	6.90
2	1.14	1.14	7.51	8.60	8.60
3	1.13	1.13	9.89	11.1	11.1
4	1.12	1.12	12.0	13.4	13.4
5	1.11	1.11	13.9	15.5	15.5
6	1.11	1.11	15.8	17.6	17.6
8	1.11	1.11	19.5	21.6	21.6
10	1.10	1.10	23.2	25.6	25.6

ANNEXE 3 : Table de Build Up Factor de Taylor pour l'eau

Table 4
Energy Absorption Buildup Factors
Water

R(mfp)	Energy (MeV)								
	15	10	8	6	5	4	3	2	1.5
0.5	1.16	1.21	1.23	1.27	1.29	1.31	1.34	1.38	1.42
1.0	1.29	1.38	1.44	1.55	1.57	1.63	1.71	1.83	1.93
2.0	1.51	1.70	1.82	1.98	2.10	2.26	2.47	2.82	3.11
3.0	1.72	2.00	2.17	2.43	2.62	2.87	3.24	3.87	4.44
4.0	1.93	2.29	2.52	2.87	3.12	3.48	4.01	4.99	5.90
5.0	2.14	2.57	2.86	3.31	3.63	4.09	4.81	6.16	7.47
6.0	2.34	2.85	3.20	3.74	4.14	4.71	5.62	7.38	9.14
7.0	2.53	3.13	3.53	4.16	4.64	5.33	6.45	8.66	10.9
8.0	2.73	3.40	3.86	4.59	5.14	5.95	7.28	9.97	12.8
10.0	3.11	3.94	4.51	5.43	6.14	7.20	8.98	12.7	16.8
15.0	4.04	5.24	6.08	7.49	8.62	10.3	13.4	20.1	27.9
20.0	4.93	6.51	7.61	9.52	11.1	13.5	17.8	28.0	40.4
25.0	5.81	7.75	9.10	11.5	13.5	16.6	22.4	36.4	54.1
30.0	6.64	8.97	10.6	13.5	15.9	19.8	27.1	45.2	68.8
35.0	7.42	10.2	12.2	15.5	18.3	23.0	31.8	54.3	84.4
40.0	8.09	11.3	14.1	17.9	20.7	26.1	36.5	63.6	101.

R(mfp)	Energy (MeV)								
	1	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.15	0.1
0.5	1.47	1.51	1.56	1.61	1.66	1.75	1.92	2.07	2.36
1.0	2.08	2.18	2.34	2.45	2.60	2.84	3.42	3.91	4.52
2.0	3.62	3.96	4.48	4.87	5.42	6.25	8.22	9.36	1.17E1
3.0	5.50	6.24	7.40	8.29	9.56	1.15E1	1.57E1	1.86E1	2.35E1
4.0	7.66	8.96	1.11E1	1.27E1	1.51E1	1.90E1	2.64E1	3.25E1	4.06E1
5.0	1.01E1	1.21E1	1.54E1	1.81E1	2.22E1	2.88E1	4.13E1	5.20E1	6.40E1
6.0	1.28E1	1.56E1	2.06E1	2.46E1	3.08E1	4.12E1	6.10E1	7.79E1	9.48E1
7.0	1.57E1	1.96E1	2.64E1	3.22E1	4.11E1	5.65E1	8.62E1	1.11E2	1.34E2
8.0	1.89E1	2.40E1	3.30E1	4.08E1	5.32E1	7.50E1	1.18E2	1.53E2	1.83E2
10.0	2.60E1	3.39E1	4.87E1	6.18E1	8.32E1	1.22E2	2.02E2	2.68E2	3.14E2
15.0	4.74E1	6.56E1	1.02E2	1.37E2	1.97E2	3.18E2	5.82E2	8.05E2	9.17E2
20.0	7.35E1	1.06E2	1.76E2	2.47E2	3.77E2	6.56E2	1.31E3	1.89E3	2.12E3
25.0	1.04E2	1.56E2	2.72E2	3.95E2	6.32E2	1.18E3	2.58E3	3.84E3	4.26E3
30.0	1.38E2	2.13E2	3.88E2	5.82E2	9.72E2	1.93E3	4.64E3	7.05E3	7.78E3
35.0	1.75E2	2.77E2	5.25E2	8.09E2	1.40E3	2.95E3	7.89E3	1.21E4	1.31E4
40.0	2.14E2	3.49E2	6.83E2	1.08E3	1.94E3	4.28E3	1.28E4	1.96E4	2.03E4

R(mfp)	Energy (MeV)						
	0.08	0.06	0.05	0.04	0.03	0.02	0.015
0.5	2.54	2.63	2.55	2.27	1.81	1.29	1.13
1.0	4.93	4.94	4.51	3.58	2.43	1.45	1.19
2.0	1.25E1	1.15E1	9.49	6.41	3.46	1.70	1.28
3.0	2.43E1	2.06E1	1.57E1	9.50	4.41	1.89	1.34
4.0	4.08E1	3.24E1	2.32E1	1.28E1	5.32	2.05	1.40
5.0	6.27E1	4.69E1	3.18E1	1.63E1	6.18	2.19	1.44
6.0	9.06E1	6.43E1	4.16E1	1.99E1	7.01	2.31	1.48
7.0	1.25E2	8.48E1	5.26E1	2.38E1	7.81	2.43	1.51
8.0	1.67E2	1.09E2	6.49E1	2.78E1	8.61	2.53	1.54
10.0	2.78E2	1.67E2	9.33E1	3.65E1	1.02E1	2.72	1.59
15.0	7.54E2	3.90E2	1.90E2	6.16E1	1.41E1	3.13	1.69
20.0	1.65E3	7.58E2	3.31E2	9.21E1	1.81E1	3.47	1.77
25.0	3.16E3	1.32E3	5.25E2	1.28E2	2.23E1	3.76	1.83
30.0	5.56E3	2.14E3	7.79E2	1.69E2	2.67E1	4.03	1.88
35.0	9.19E3	3.27E3	1.10E3	2.16E2	3.13E1	4.25	1.93
40.0	1.45E4	4.82E3	1.51E3	2.69E2	3.59E1	4.43	1.96

ANNEXE 4 : Démonstration du débit de dose émis par une source fil isotrope

Nous considérons une source fil de longueur L émettant $\dot{N} = AI$ gammas dans tout autour d'elle (4π). On place un point de mesure P à la distance d dans le plan médian de la source.

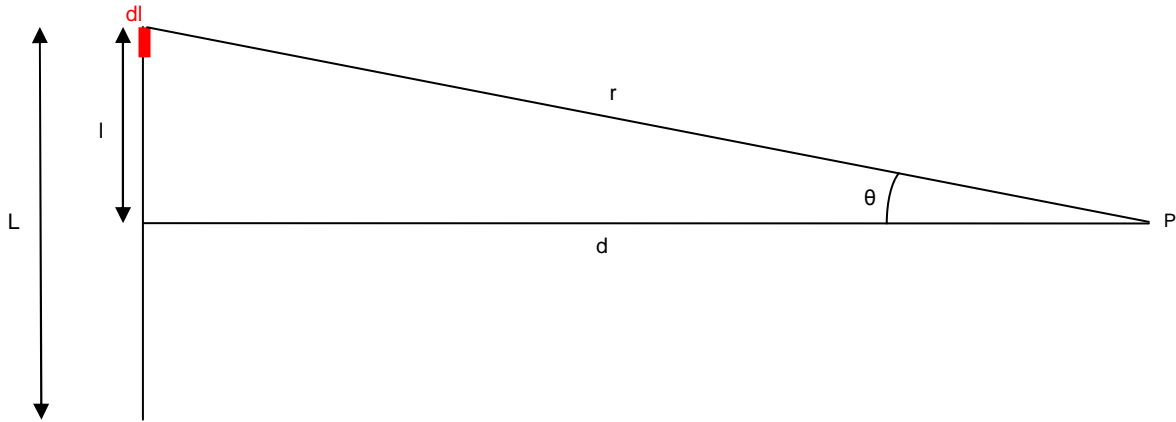


Image n°47 : Schéma représentant la source fil et le point-dose P

On pose $l = \frac{L}{2}$ soit la moitié de la longueur du fil.

Pour un élément dl de la moitié du fil, le débit de dose émis par celui-ci est :

$$\dot{D}_{dl} = \frac{IE_{\gamma}}{4\pi r^2} \times \frac{Adl}{L} \times \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right) \quad (1)$$

$\frac{Adl}{L}$: Activité d'un élément dl de la source fil

Cette égalité est valable que dans le cas où $d \gg r$ (angle solide).

Sur le schéma, on remarque que :

$$r^2 = l^2 + d^2$$

$$l = d \tan \theta$$

$$dl = d \frac{d\theta}{\cos^2 \theta}$$

$$\frac{d}{r} = \cos \theta$$

On obtient donc le débit de dose émis par un élément dl de la moitié du fil :

$$\dot{D}_{dl} = \frac{AIE_{\gamma}}{4\pi L(l^2 + d^2)} \times \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right) dl \quad (2)$$

Pour déterminer le débit de dose émis par le fil entier, il faut donc intégrer entre 0 et L l'ensemble des dl du fil, on obtient :

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 47/50
ROPERS Jean-Baptiste		

$$\dot{D}_{fil} = 2 \int_0^L \frac{AIE_{\gamma}}{4\pi(l^2 + d^2)} \times \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right) dl \quad (3)$$

On procède à un changement de variable, on obtient l'intégrale variant en θ :

$$\dot{D}_{fil} = 2 \frac{AIE_{\gamma}}{4\pi L} \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right) \int_0^{\theta} \frac{d \times d\theta}{\cos^2 \theta \times (l^2 + d^2)} \quad (4)$$

Par simplification d'écriture de l'égalité, on pose :

$$Cst = 2 \frac{AIE_{\gamma}}{4\pi L} \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right)$$

On a :

$$\dot{D}_{fil} = Cst \int_0^{\theta} \frac{d^2 \times d\theta}{d \times \cos^2 \theta \times (l^2 + d^2)}$$

$$\text{Or } \frac{d}{r} = \cos \theta$$

On obtient l'égalité suivante à partir de l'équation :

$$\dot{D}_{fil} = Cst \int_0^{\theta} \frac{\cos^2 \theta \times d\theta}{d \times \cos^2 \theta}$$

On obtient donc le débit de dose reçu au point P :

$$\dot{D}_{fil} = 2 \frac{AIE_{\gamma}}{4\pi L d} \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right) \theta$$

Cette égalité n'est vraie que dans le cas où $d \gg r$.

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 48/50
ROPERS Jean-Baptiste		

ANNEXE 5 : Spectre du Dissolveur

Spectre BETA		Spectre ALPHA		Composition Isotopique Pu. et U	
Radioéléments	%Activité	Radioéléments	%Activité	%Masse	%Masse
Mn 54		Np 237	3.511E-03	5.810E-02	
Co 60	3.513E+00	Pu 238	3.826E+01	2.606E-02	2.387E+00
Ru 106	1.535E+01	Pu 239	3.135E+00	5.895E-01	5.400E+01
Sb 125	8.615E+00	Pu 240	5.481E+00	2.817E-01	2.581E+01
Cs 134	2.988E+00	Pu 241	2.466E-02	1.140E-01	1.044E+01
Cs 137	3.520E+01	Pu 242	2.725E-02	8.037E-02	7.363E+00
Ce 144		Am 241	1.633E+01	5.556E-02	5.089E+00
Pm 147	8.099E+00	Am 243	2.987E-01	1.744E-02	
Eu 154	6.885E-01	Cm 242	7.481E-02	2.635E-07	
Sr 90	2.325E+01	Cm 243	1.920E-01	4.577E-05	
Ni 59	3.513E-03	Cm 244	3.616E+01	5.211E-03	
Ni 63	2.108E+00	U 232	3.627E-04	1.916E-07	1.940E-07
Nb 94	1.757E-03	U 233	4.007E-07	4.852E-07	4.912E-07
Zr 93	9.500E-04	U 234	1.091E-02	2.048E-02	2.073E-02
C 14	8.168E-05	U 235	1.367E-04	7.378E-01	7.469E-01
Tc 99	5.240E-03	U 236	2.719E-03	4.904E-01	4.965E-01
I 129	1.190E-07	U 238	2.811E-03	9.752E+01	9.874E+01
Pd 107	7.039E-05				
Cs 135	2.358E-04				
Sm 151	1.760E-01				
Se 79	2.429E-05				
Sn 126	1.656E-04				
Be 10	1.691E-05				
Cl 36	9.196E-04				
Ca 41	1.288E-04				
Sn 121m	2.109E-03				
Ag 108m	9.052E-07				
Mo 93	3.062E-04				
Ag 110m	6.675E-04				
Eu 152	1.670E-04				
total	1.000E+02	total	1.000E+02	1.000E+02	
Rapport Act.ALPHA / Act Béta.....:		3.472E-02			

* Spectres BETA vies courtes , BETA Complémentaires , ALPHA trans.U , ALPHA U

Spectre BETA vies courtes		Spectre BETA Complémentaires		Spectre ALPHA trans.U		Spectre ALPHA U	
Radioéléments	% d'Act.	Radioéléments	% d'Act.	Radioéléments	% d'Act.	Radioéléments	% d'Act.
Mn 54		Ni59	0.1527%	Np 237	0.0035%	U 232	2.1403%
Co 60	3.5957%	Ni63	91.6381%	Pu 238	38.2650%	U 233	0.0024%
Ru 106	15.7105%	Nb94	0.0764%	Pu 239	3.1354%	U 234	64.4144%
Sb 125	8.8183%	Zr93	0.0413%	Pu240	5.4821%	U 235	0.8068%
Cs 134	3.0581%	C14	0.0036%	Pu241	0.0247%	U 236	16.0491%
Cs 137	36.0251%	Tc99	0.2278%	Pu242	0.0273%	U 238	16.5871%
Ce 144		I129	0.0000%	Am 241	16.3294%		
Pm 147	8.2902%	Pd107	0.0031%	Am 243	0.2987%		
Eu 154	0.7047%	Cs135	0.0103%	Cm 242	0.0748%		
Sr 90	23.7974%	Sm151	7.6509%	Cm243	0.1920%		
		Se79	0.0011%	Cm 244	36.1671%		
		Sn126	0.0072%				
		Be10	0.0007%				
		Cl36	0.0400%				
		Ca41	0.0056%				
		Sn121m	0.0917%				
		Ag108m	0.0000%				
		Mo93	0.0133%				
		Ag110m	0.0290%				
		Eu152	0.0073%				
Rapport Act.Béta Complém./Act Béta Vie Crt						2.354E-02	
Rapport Act.ALPHA trans.U/Act Béta Vie Crt:						3.553E-02	
Rapport Act.ALPHA U/Act Béta Vie Crt						6.021E-06	

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 49/50
ROPERS Jean-Baptiste		

ANNEXE 6 : Dimensions de la capsule contenant la source scellée de ^{90}Sr

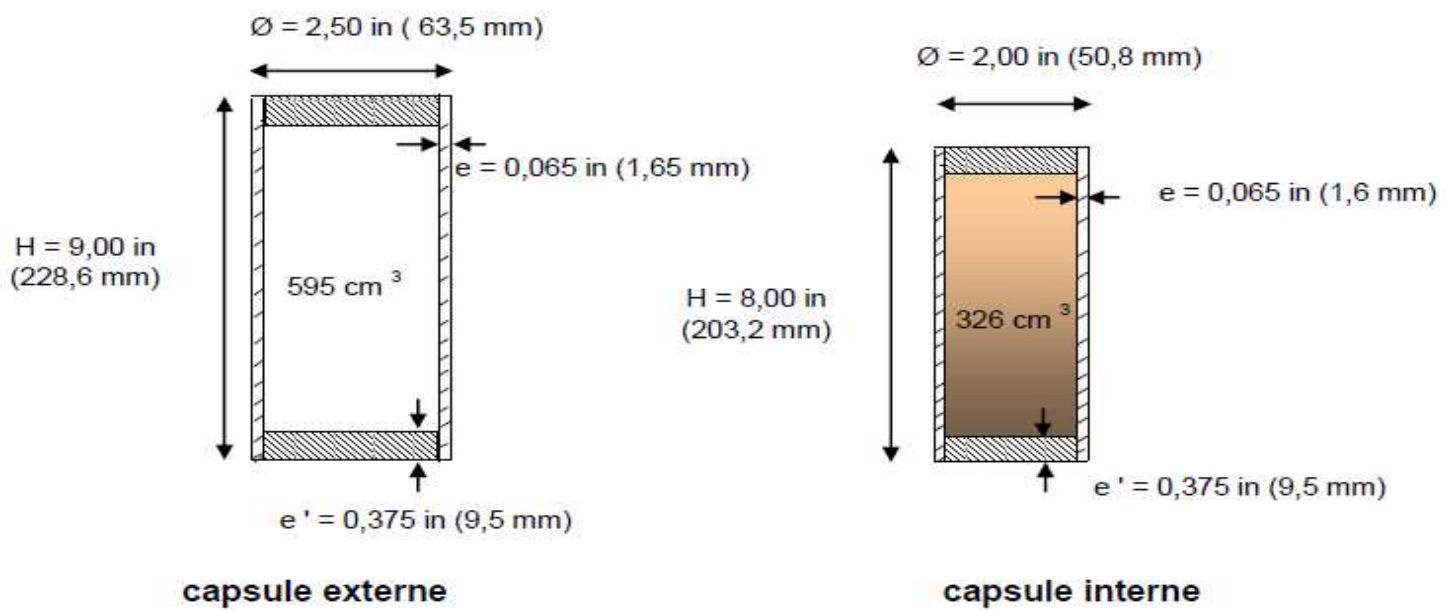


Image n°48 : Dimensions de la capsule

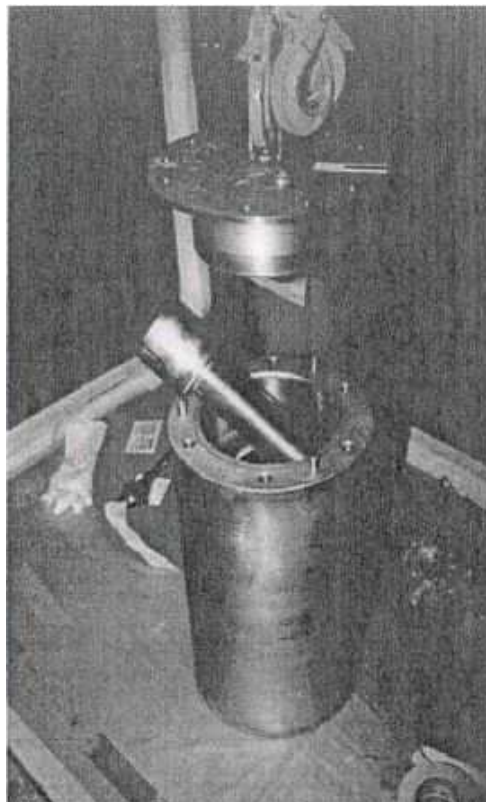


Image n°49 : Château de Plomb et conteneur de la source

Comparaison des logiciels de calculs de dose Microshield et Dosimex	26/05/2015	Page : 50/50
ROPERS Jean-Baptiste		