

# **Caractérisation et modélisation d'un site radioactif par usage combiné du scanner gamma unidirectionnel EDR et de l'outil de planification VISIPLAN 3D.**

**F. Vermeersch and P. Deboodt**  
**Service Interne de Protection et Prévention au Travail,**  
**SCK•CEN, Boeretang 200, B 2400 Mol, Belgique**

## **Résumé**

*Une méthode est présentée, et illustrée, pour caractériser un site radioactif à partir d'une approche intégrée utilisant un scanner gamma et un outil de calcul de dose en trois dimensions basé sur la méthode point – kernel.*

## **1. Introduction**

La préparation du planning pour des travaux en zone nucléaire demande non seulement la description technique du travail, mais aussi, une estimation et une optimisation des doses. L'estimation des doses dans des installations nucléaires complexes est difficile à cause de l'influence de la géométrie du blindage, de la distribution des sources et finalement, de l'organisation du travail. Le premier pas dans une évaluation des doses est la caractérisation radiologique, c'est à dire la détermination de la dose au poste de travail. On peut se baser sur des mesures de dose mais aussi, sur une simulation radiologique du site. La première approche est pratique dans les cas où la géométrie et la distribution des sources restent pratiquement fixes pendant le travail. Les choses deviennent plus difficiles quand la géométrie et la distribution des sources changent pendant les opérations, comme c'est le cas lors du démantèlement d'installations nucléaires. Dans pareille éventualité, on peut estimer la dose en utilisant un logiciel 3D capable de simuler les changements consécutifs de la géométrie et des sources. Dans ce but, le SCK•CEN a développé le logiciel de planification ALARA VISIPLAN 3D pour assister l'analyste ALARA dans l'estimation et l'optimisation des doses (1). L'outil calcule les doses à partir des données relatives à la géométrie, aux matériaux et aux sources en se basant sur la méthode « point-kernel » avec correction de build-up. VISIPLAN a prouvé, dans les années récentes, être un outil important pour l'analyste ALARA (2-6).

Avant d'entamer les calculs, il faut, premièrement, établir un modèle radiologique et géométrique adéquat du poste de travail, en ce sens que le modèle doit avoir un niveau de détail suffisant pour arriver à une précision acceptable pour le calcul des doses, mais pas trop, afin de ne pas accroître le temps de calcul. Le modèle en question doit comporter des données sur la géométrie, sur les matériaux et sur les sources à ce poste. Les informations relatives à la géométrie et aux matériaux peuvent être obtenues sur base des plans et de données techniques ; lorsque les plans ne sont pas disponibles, on peut faire appel à des techniques d'analyse laser pour établir le modèle géométrique dans un format CAO.

La caractérisation radiologique d'un site est plus difficile à réaliser. Traditionnellement, elle est faite en utilisant un ensemble de mesures de doses  $4\pi$  en différentes positions, réalisées simultanément avec une analyse spectroscopique d'échantillons issus des sources.

Cette méthode peut être très fastidieuse et coûteuse en dose dans le cas d'installations industrielles complexes, et ceci plus particulièrement, s'il y a peu d'informations disponibles quant à la distribution géométrique de ces sources.

Ces dernières années ont vu apparaître sur le marché des équipements tels les caméras gamma et autres analyseurs gamma rendant plus aisée la localisation des sources ou points chauds sur le site.

Dans cet article, nous présentons une méthode qui combine l'utilisation d'un analyseur gamma et du logiciel VISIPLAN, permettant une caractérisation radiologique rapide et précise d'un poste de travail. Cette méthode est illustrée à partir de données portant sur un site industriel. Le travail présenté ici a été réalisé comme une des phases du projet VRIMOR dans le cadre du 5ème programme européen portant sur « Réalité virtuelle pour l'Inspection, la Maintenance, l'Opération et la Réparation ». La faisabilité de l'intégration de technologies différentes telles que la cartographie gamma, la cartographie géométrique, la modélisation radiologique et géométrique ainsi que la simulation du déplacement humain y sont étudiées (7-8). Les résultats présentés ici portent l'accent sur les aspects de la modélisation radiologique du travail.

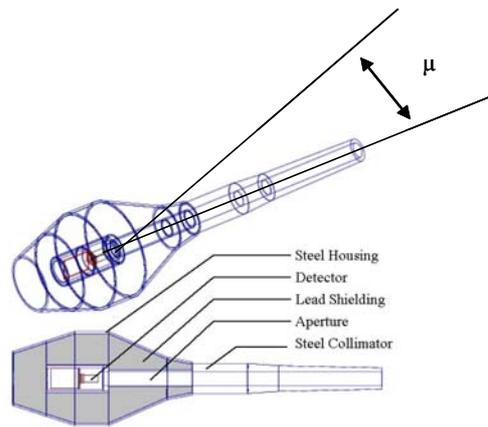
Nous donnerons d'abord une brève description de l'équipement d'analyse gamma utilisé et introduirons la méthode de calibration que nous avons développée pour analyser les données gammamétriques par le logiciel VISIPLAN. Ensuite, nous proposerons la méthodologie générale retenue pour caractériser le site.

Enfin, nous illustrerons cette méthode lors de la caractérisation d'un site industriel nucléaire appartenant à une centrale nucléaire.

## **2. Equipement de cartographie gamma et calibration**

### ***L'analyseur gamma***

La cartographie gamma est réalisée en utilisant l'analyseur EDR développé par le CIEMAT (Espagne)(7-8). L'analyseur est basé sur l'intégration de trois senseurs, d'un détecteur gamma collimaté, d'une caméra vidéo et d'un instrument de mesure laser des distances. Le détecteur gamma est un cristal Cs(Tl) couplé à une photodiode avec un seuil en énergie compris entre 150 et 200 keV. Le détecteur est placé dans un boîtier en acier inoxydable comportant un blindage en plomb comme indiqué à la figure 1.



**Fig.1** : Schéma de l'analyseur gamma EDR ;  $\mu$  indique l'angle entre la direction du collimateur et celle de la source ponctuelle.

Le blindage effectif est d'environ 5 cm de plomb et est plus important dans la région entourant l'ouverture du collimateur. Celle-ci, lors de la mesure, est d'environ  $4^\circ$ . Le système est monté sur une plate-forme panoramique et élévation autorisant une cartographie automatique de l'endroit. Les spectres sont mesurés dans les différentes directions de détection et stockés dans un format bin à 25 énergies en même temps que la direction de collimation et la distance à l'objet mesuré. Une interface spécifique a été développée pour transférer et visualiser les résultats obtenus dans VISIPLAN.

Une cartographie géométrique détaillée est réalisée en utilisant l'analyseur laser « Imager 5003 » de la firme Z+F Ltd et ce, avant la cartographie gamma, en vue de créer un modèle CAO du site qui puisse être transféré dans VISIPLAN.

Les données relatives à la distance et à l'orientation dans l'analyseur EDR sont adaptées aux données détaillées de la cartographie géométrique en vue de déterminer la position EDR dans la CAO, à savoir le modèle VISIPLAN.

### ***Méthode de calibration pour les applications en radioprotection***

Afin d'interpréter les mesures dans le cadre de l'approche de calcul « point-kernel » de VISIPLAN, nous devons établir une relation entre la dose efficace calculée par VISIPLAN et les mesures effectuées avec l'analyseur EDR. Dans ce but, nous introduisons la quantité appelée « Débit de Dose Instrument » ou DDI définie comme :

$$DDI = \sum_i h_i \cdot CPS_i$$

où les  $h$  sont les facteurs de conversion de dose pour une géométrie d'irradiation rotationnelle et les CPS le nombre de coups par seconde détectés dans le bin d'énergie  $E_n$ . Le Débit de

Dose Instrument doit maintenant être relié au débit de dose efficace mesuré à l'endroit du détecteur par l'équation :

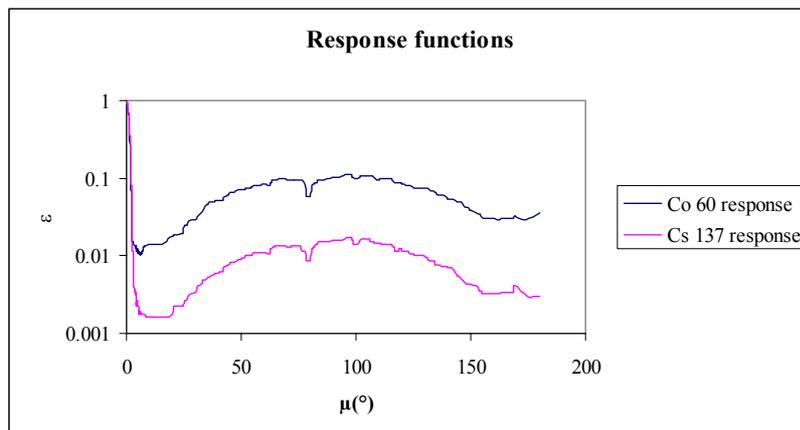
$$E = \sum_i h_i \phi_i$$

où les  $h$  sont les facteurs de conversion de dose pour une géométrie rotationnelle et les  $\phi$  sont les flux de photons dans le bin d'énergie  $E$ . La fonction de réponse en dose de l'instrument  $\varepsilon$  avec une énergie  $E_n$  peut ensuite être définie comme :

$$\varepsilon(E_n, \mu).E = IDR$$

La réponse de l'instrument est dépendante de l'énergie des photons détectés et de l'angle  $\mu$  entre les directions de la source et du collimateur. La sensibilité directionnelle du couple détecteur-collimateur a été mesurée pour une source de Co-60 et une source de Cs-137 à une distance suffisamment grande pour engendrer un champ de radiations plan parallèle à l'endroit du détecteur.

Un graphique de la courbe de réponse en dose de l'instrument dérivé des mesures de calibration est donné à la figure 2. Il apparaît clairement de cette figure que la résolution directionnelle pour des énergies des photons dans le domaine d'une source de Cs-137 (0.6 MeV) est supérieure à celle des photons d'énergie d'une source de Co-60 (1 MeV). Ceci est en accord avec l'efficacité de blindage du plomb à ces énergies. La fonction de réponse dérivée de débit de dose est la base de la méthode d'évaluation de l'intensité de la source utilisée dans VISIPLAN-VISIGAMMA.



**Fig.2** : la fonction de réponse en dose directionnelle de l'instrument pour un champ de dose généré par une source Co-60 et Cs-137,  $\mu$  est l'angle compris entre les directions de la source et du collimateur.

### **3. Interprétation de la cartographie gamma et construction du modèle**

Le modèle radiologique géométrique est établi en quatre étapes. Dans la première, nous construisons le modèle de la géométrie et des matériaux. Dans la seconde, nous concentrons nos efforts sur la détermination de la géométrie la plus probable de la source et sur celle de la distribution des sources. Dans la troisième, nous établissons le vecteur isotopique pour la source et lors de la quatrième étape, nous opérons une adaptation de l'intensité de la source afin d'en déterminer l'activité.

Les paramètres géométriques de ce modèle sont dérivés d'un plan CAO détaillé basé sur les mesures cartographiques laser au poste de travail. Ces paramètres définissent un premier ensemble de volumes primitifs qui sont, par la suite, enrichis par des informations sur les matériaux afin de permettre les calculs d'atténuation.

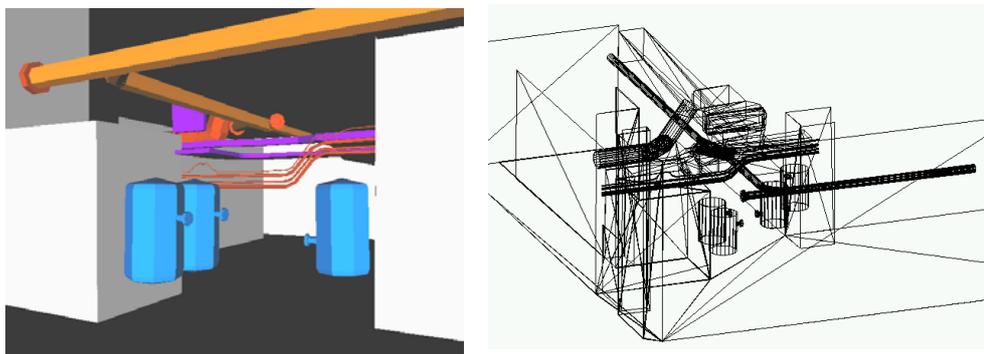
La géométrie de la source est issue de l'interprétation de différentes cartographies gamma prises en divers endroits ainsi que de l'historique et de données techniques relatives au poste de travail. L'utilisation de cartes gamma prises en divers endroits permet, dans la majorité des cas d'obtenir la position des sources par triangulation, ou celle des points chauds et de réduire la possibilité de mauvaise interprétation de cartes comme par exemple, le cas de deux sources consécutives situées sur la même ligne de visée du détecteur. La géométrie proposée pour la source est introduite dans le modèle VISIPLAN et enrichie de l'information sur les isotopes. La caractérisation isotopique des sources est réalisée par l'analyse des spectres obtenus par cartographie. Lorsqu'elle est disponible, l'information extraite des spectres détaillés pris à partir d'échantillons des sources est aussi utilisée pour détailler l'information isotopique. Les intensités des sources sont déterminées en adaptant les résultats obtenus par cartographie gamma et exprimées en valeurs DDI avec celles obtenues par mesures. La cartographie simulée est calculée en prenant en ligne de compte l'information sur la géométrie, les matériaux et les sources ainsi que la fonction de réponse directionnelle en dose, dépendante de l'énergie, obtenue par l'analyse EDR.

Cette méthode a été testée initialement dans un environnement contrôlé, à savoir avec deux sources parfaitement identifiées. Elle a fourni de bons résultats et a été capable de déterminer les activités des sources avec 20 à 30% d'erreur.

### **4. Illustration de la méthode dans un site industriel**

L'illustration de cette méthode a été effectuée dans le cadre du projet VRIMOR pour un site industriel sélectionné dans un bâtiment auxiliaire de la centrale nucléaire d'Almaraz (Espagne)(8). Une cartographie de la zone a été effectuée par Z+F Ltd, suivie par une campagne de cartographie gamma réalisée par l'équipe de CIEMAT. Les résultats de cette cartographie géométrique, et le modèle dérivé de celle-ci, sont donnés à la figure 3. Les

données pour les matériaux associés aux volumes primitifs ont été obtenues sur site par Tecnomat.

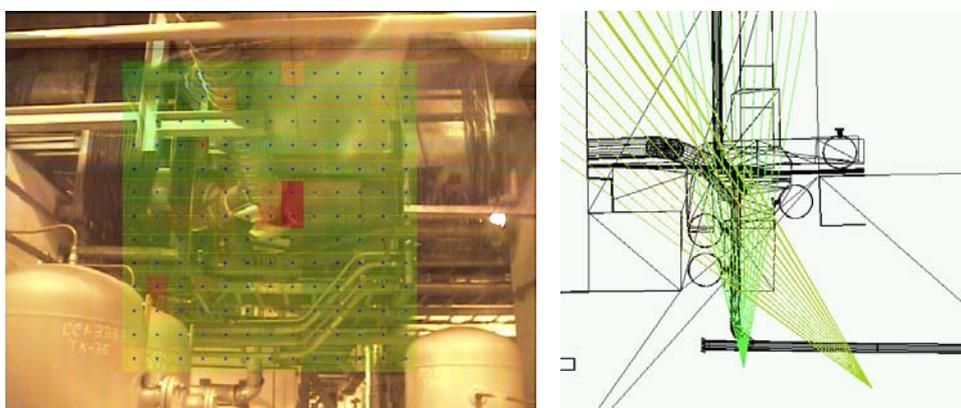


**Fig.3.** Modèle cartographié et modèle VISIPLAN de la géométrie du site

Deux cartographies gamma ont été utilisées pour la caractérisation radiologique du site.

L'image résultante de la première cartographie et la position des deux cartographies sont donnés à la figure 4.

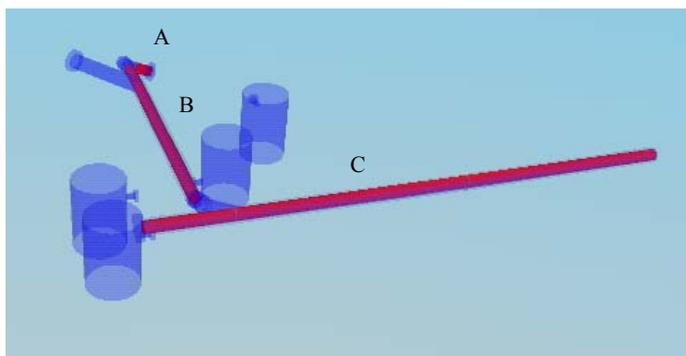
Un point chaud peut être observé sur le tube à son extrémité. Cette source est confirmée par une seconde vue prise à partir d'une autre position. Cette information, avec celle d'ordre technique recueillie par Tecnomat sur le site, nous conduit à simuler l'endroit en utilisant la distribution des sources de la figure 5. Trois volumes cylindriques sont utilisés pour représenter les sources A,B et C dans les tubes.



**Fig.4.** : Image résultante de la cartographie en intensité gamma et position des deux cartes gamma. Les lignes vertes correspondent aux directions de cartographie pour les deux analyses.

L'analyse spectrale des mesures suggère que le Co-60 est l'isotope dominant ; il a donc été décidé de poursuivre l'analyse avec des sources « équivalent Co-60 ».

Sur base de ce modèle, l'intensité des sources A,B et C a été déterminée (fig.5). Un bon accord a été trouvé entre les valeurs simulées et les cartographies gamma.



**Fig.5.** Géométrie des sources utilisées dans le modèle radiologique géométrique

Utilisant les activités des sources déterminées, nous pouvons maintenant calculer la dose dans la zone à l'aide de l'outil VISIPLAN et comparer les doses avec les mesures  $4\pi$  sur site. Un accord a été trouvé avec une erreur de 20-30%, accord qui est bon si l'on considère la précision de la méthode de calcul utilisé dans VISIPLAN et de la méthode de calibration pour la cartographie gamma proposée pour l'interprétation de la carte gamma.

### **Conclusion**

Une méthode a été développée pour établir un modèle radiologique adéquat du poste de travail basée sur une approche intégrée utilisant une cartographie gamma, une cartographie géométrique et une modélisation utilisant l'outil de planification ALARA VISIPLAN 3D. La méthode a été testée avec succès lors de la caractérisation dans un environnement industriel. Utilisant cette méthode, de la dose peut être évitée par suite de la nature évolutive de la cartographie gamma mais aussi par une meilleure planification des opérations par une connaissance accrue de l'environnement de travail, basée sur une modélisation géométrique 3D du site.

### **Remerciements**

Ce travail a été effectué dans le cadre du projet VRIMOR du 5<sup>ème</sup> programme européen « Réalité virtuelle pour l'Inspection, la Maintenance, l'Opération et la Réparation », FIKS-CT-2000-00114. Les partenaires du projet sont NNC Ltd Manchester (coordinateur et ayant développé la modélisation humaine ERGODOSE), Tecnatom s.a. Madrid (Evaluation et logistique sur le site du réacteur nucléaire), le SCK•CEN Brussels (développement de VISIPLAN-VISIGAMMA), CIEMAT Madrid (analyseur gamma), Z+F Ltd Manchester (cartographie géométrique) et l'Université Polytechnique de Madrid (modélisation humaine HeSPI). Remerciements en particulier au personnel de la centrale nucléaire d'Almaraz pour la mise à disposition du site industriel.

## Références

1. F.Vermeersch, C.Van Bosstraeten, "Development of the VISIPLAN ALARA planning tool", Proceeding of the International Conference on Topical issues in Nuclear Radiation and Radioactive Waste Safety, Vienna Austria, 31-august to September 4, 1998
2. Vermeersch, F. and Vanbosstraeten, C., "Software VISIPLAN: A powerfull tool for optimisation.", 2<sup>nd</sup> European workshop on occupational exposure management at NPPS, Tarragona, Spain, 5-7 April 2000.
3. V.Massaut, P. Deboodt, F.Vermeersch, A. Lefébvre, M. Klein, "Optimisation and decommissioning: Challenge and limits", 1st European ALARA Network Workshop, ALARA & Decommissioning, 1-3 December 1997, INSTN Saclay France, Paper No 1
4. G.Eggermont, N.Buls, A.Hermanne, W.Van Suetendael and F.Vermeersch, "Optimisation opportunities in the decommissioning of accelerators", 1st European ALARA Network Workshop, ALARA & Decommissioning, 1-3 December 1997, INSTN Saclay France, Paper No 14.
5. V.Massaut 2002, The radioprotection Optimisation applied in an actual case: the BR3 decommissioning project. 3<sup>rd</sup> European forum of "Radioprotectique".
6. Ph. Antoine 2002, Démantèlement de la cellule chaude n°41 au SCK•CEN en s'aidant de l'outil de planification ALARA VISIPLAN, 3<sup>o</sup> Journées SFRP 11-12 juin 2002
7. Lee, D., J.et al, "Virtual Reality for Inspection, Maintenance, Operation and Repair of Nuclear Power Plant (VRIMOR)", FISA 2001, EU Research in Reactor Safety, Luxembourg, 12-15 November 2001 Edited by G. Van Goethem et al.
8. VRIMOR project: "Technological and user Perspective report", ", FIKS-CT-2000-00114, European 5<sup>th</sup> framework program.