

RECONSTITUTION D'ACCIDENT RADIOLOGIQUE A L'AIDE D'OUTILS NUMERIQUES : VERS UNE REPRESENTATION PLUS REALISTE DE LA VICTIME

Estelle Courageot, Rima Sayah, Christelle Huet
IRSN, Laboratoire de Dosimétrie des Rayonnements Ionisants,
B.P. 17, 92262 Fontenay-aux-Roses Cedex, France

INTRODUCTION

Le choix de la stratégie thérapeutique dans le cadre de la prise en charge médicale de victimes de surexposition radiologique peut difficilement reposer uniquement sur l'observation des signes cliniques. L'estimation de la dose reçue par la victime peut être réalisée à l'aide de différentes techniques : la dosimétrie biologique, la dosimétrie rétrospective et la reconstitution dosimétrique, qu'elle soit expérimentale ou numérique. Le Laboratoire de Dosimétrie des Rayonnements Ionisants développe depuis une dizaine d'années un outil nommé SESAME (Simulation of External Source Accident with MEDical images) permettant de procéder à une reconstitution dosimétrique numérique de l'accident. Cette méthode consiste à modéliser la victime de l'accident à l'aide d'un fantôme voxélisé ainsi que la source et l'environnement de l'accident. La dose reçue par la victime est ensuite calculée à l'aide d'un code de calcul Monte Carlo. L'outil SESAME a déjà été utilisé lors d'accidents radiologiques tels que celui survenu en décembre 2005 au Chili [1] et celui survenu en Equateur en 2009 [2].

Cependant, il était jusque là impossible de prendre en compte la posture de la victime au moment de l'accident étant donné les contraintes intrinsèques de la procédure de création du fantôme voxélisé personnalisé.

Ce résumé présente la nouvelle fonctionnalité implémentée dans SESAME permettant de créer un fantôme voxélisé personnalisé de la victime dont la posture a été modifiée. Il y est décrit la procédure de création des nouveaux fantômes voxélisés modifiés ainsi que les validations numérique et expérimentale.

MATERIELS ET METHODES

PRESENTATION DE L'OUTIL SESAME

L'outil SESAME, dédié à la reconstitution numérique d'accidents radiologiques dus à une source externe, permet de modéliser la totalité de la géométrie de l'accident et de choisir le type de résultats dosimétriques. Ces derniers sont présentés de façon à en faciliter l'analyse.

La victime de l'accident est représentée par un fantôme voxélisé réalisé à partir d'images tomodensitométriques ou IRM de la victime. Les contours des différentes structures présentes sur les images sont dessinés à l'aide du système de planification de traitement ISOgray puis envoyés dans SESAME qui procède à la construction du fantôme voxélisé.

Ensuite, SESAME permet d'entrer les éléments permettant de définir la géométrie et les caractéristiques physiques de la source (densité, activité, radioélément,...), la durée d'irradiation ainsi que la géométrie de l'environnement si nécessaire.

Une fois la géométrie de l'accident définie, il est possible de choisir entre le calcul d'une dose absorbée moyenne dans un ou plusieurs points ou organes, le calcul d'une dose moyenne au corps entier ou le calcul d'une distribution de dose.

SESAME crée alors automatiquement un fichier d'entrée au format MCNPX afin de procéder au calcul. Ce dernier est effectué à l'aide de la version 2.6f du code MCNPX sur des clusters de calcul indépendants. Enfin, les fichiers de sortie au format MCNPX sont importés dans SESAME afin d'y être lus et de présenter les résultats soit sous forme de tableaux (dose moyenne aux organes) soit sous forme de fenêtres graphiques (distribution de dose).

Le fonctionnement complet de SESAME est présenté sur la Figure 1.

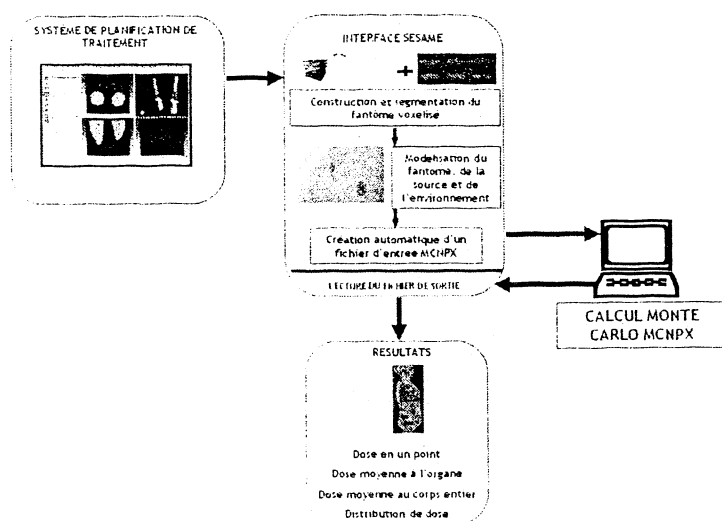


Figure 1: Principe de fonctionnement de SESAME

LA NOUVELLE FONCTIONNALITE

La nouvelle fonctionnalité implémentée dans SESAME permet de construire des fantômes voxelisés modifiés en termes de posture et de morphologie. La méthode consiste à construire des fantômes NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) à partir des images tomodensitométriques ou IRM de la victime, à transformer ces fantômes NURBS puis à procéder à leur voxelisation.

Les NURBS sont des surfaces tridimensionnelles construites à partir de points de contrôle localisés sur la surface. Elles présentent l'avantage d'être facilement déformables et adaptables selon les besoins et peuvent ainsi représenter précisément non seulement des formes analytiques standard mais aussi des formes plus complexes telles que des organes internes ou des morphologies spécifiques d'un corps humain. Dans notre cas, la construction des fantômes NURBS et la modification de ces fantômes sont réalisées à l'aide du logiciel de conception assistée par ordinateur Rhinoceros. Ce logiciel est déjà utilisé par d'autres équipes pour la construction de fantômes ([3], [4]).

La première étape de construction du fantôme voxelisé modifié est identique à celle développée dans le paragraphe précédent. Après le contourage des structures d'intérêt dans le système de planification de traitement ISOgray, une procédure développée dans SESAME permet de créer des fichiers lisibles par le logiciel Rhinoceros.

Ces fichiers sont ensuite importés dans le logiciel Rhinoceros pour procéder à la construction des fantômes NURBS.

La procédure de création et de modification des fantômes NURBS dans Rhinoceros est illustrée sur la figure 2. Les différentes étapes sont les suivantes:

- les fichiers contenant les contours sont importés dans Rhinoceros et le fantôme apparaît sous forme de nuage de points,
- les contours voisins sont reliés entre eux, le fantôme est alors décrit par des surfaces NURBS,
- à l'aide de différents outils de translation, de rotation, de système de transformation, les surfaces NURBS sont modifiées,
- afin d'être lisible par SESAME, les surfaces NURBS des différentes structures sont transformées en nuage de points puis enregistrées dans un fichier texte lisible par SESAME.

La dernière étape de construction du fantôme modifié est l'étape de voxélisation. Pour cela, une nouvelle procédure a été implémentée dans SESAME. Elle consiste à lire les fichiers issus de Rhinoceros et à reconstruire les contours des différentes structures. Chaque contour est dessiné et rempli avec un niveau de couleur et imprimé sur une matrice 256 x 256 avec l'épaisseur de la coupe préalablement définie par l'utilisateur. La superposition des différentes matrices constitue le fantôme voxélisé.

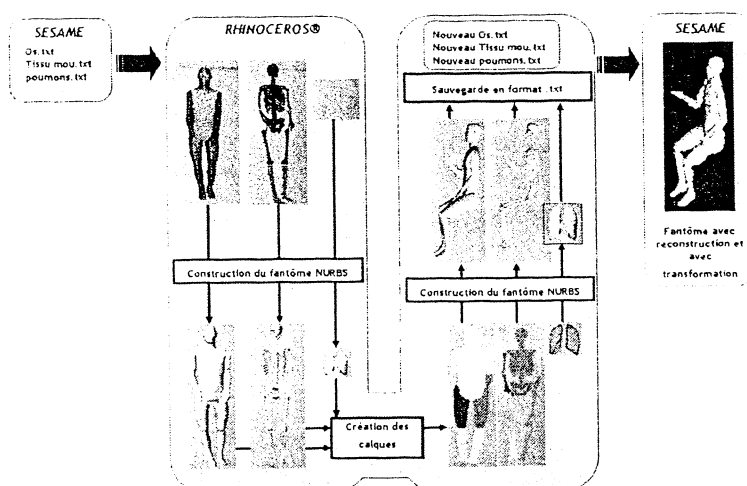


Figure 2 Procédure de construction et de modification des fantômes dans Rhinoceros

VALIDATION NUMERIQUE ET EXPERIMENTALE

Afin de valider la nouvelle fonctionnalité, quatre fantômes voxélisés ont été construits :

- un fantôme avec la procédure actuelle en position debout,
- deux fantômes avec la nouvelle procédure en position debout,
- un fantôme avec la nouvelle procédure en position assise.

Des validations numériques et expérimentales ont été effectuées.

La validation numérique a consisté à comparer les fantômes créés en position debout en termes de géométrie et de dose aux organes. Pour le calcul de dose, nous avons simulé une source cylindrique de Co-60 de 10^5 Bq au contact de la peau au niveau des poumons. Un temps d'exposition de 1000 s a été considéré.

Pour la validation expérimentale, nous avons irradié le mannequin physique RANDO en position assise à l'aide d'une source d'AmBe placée sous le bras gauche. Nous avons placé sur le mannequin et à l'intérieur du mannequin des dosimètres thermoluminescents de LiF, des pastilles d'alanine et des diodes silicium. Nous avons parallèlement simulé l'irradiation à l'aide du logiciel SESAME. Pour cela, le fantôme voxélisé RANDO en position assise a été construit, la source a été modélisée puis placée sous le bras du fantôme et les emplacements des dosimètres ont été modélisés (figure 3). Les doses photons et neutrons expérimentales ont été comparées aux doses calculées.

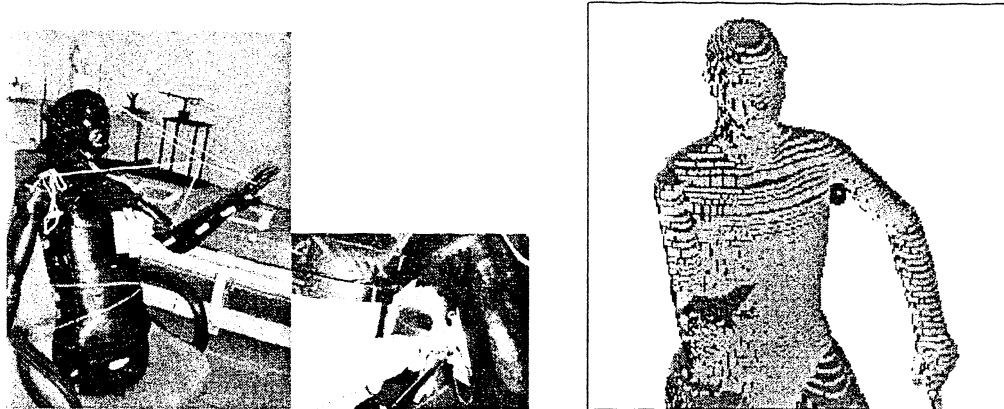


Figure 3 : Configuration de l'irradiation et localisation de source (à gauche) et sa modélisation (à droite)

RESULTATS

Création des fantômes voxélisés.

Toutes les validations présentées ont été réalisées à l'aide du mannequin physique anthropomorphe Rando-Alderson. Ce mannequin représente un homme de 175 cm pour 73,5 kg dont le tronc est constitué de 31 tranches de 2,5 cm d'épaisseur percés d'un certain nombre de trous permettant d'y insérer des dosimètres. Trois tissus composent ce fantôme. L'os est issu d'un vrai squelette humain moulé dans un matériau tissu mou de densité 0,985. Ce matériau est aussi utilisé pour représenter les poumons et pour cela sa densité a été modifiée en conséquence et est égale à 0,3.

A partir des 177 images tomodensitométriques du mannequin physique disponible dans le laboratoire, un jeu de quatre fantômes voxélisés a été créé :

- Le premier fantôme de référence sera défini dans ce résumé comme celui construit à l'aide de la procédure actuelle.
- Le deuxième fantôme est appelé « sans reconstruction et sans transformation ». Pour ce fantôme, les fichiers de contours issus de SESAME ont uniquement été lus et sauvegardés dans Rhinoceros (figure 4), c'est-à-dire qu'il n'y a pas eu de construction de surfaces NURBS.

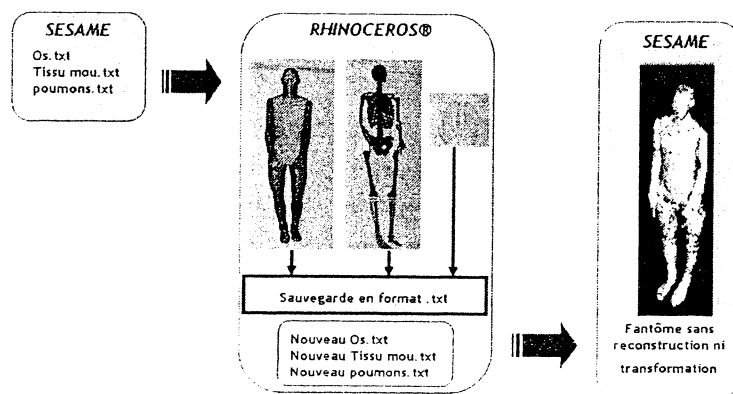


Figure 4 : Construction du fantôme « sans reconstruction et sans transformation »

- Le troisième fantôme dit « avec reconstruction mais sans transformation » a été créé suivant le protocole précédent avec une étape supplémentaire dans Rhinoceros de

construction du fantôme NURBS à partir des coordonnées des structures. Ce fantôme a ensuite été enregistré sous forme de points dans un fichier texte dans Rhinoceros afin de pouvoir être lu dans SESAME (figure 5).

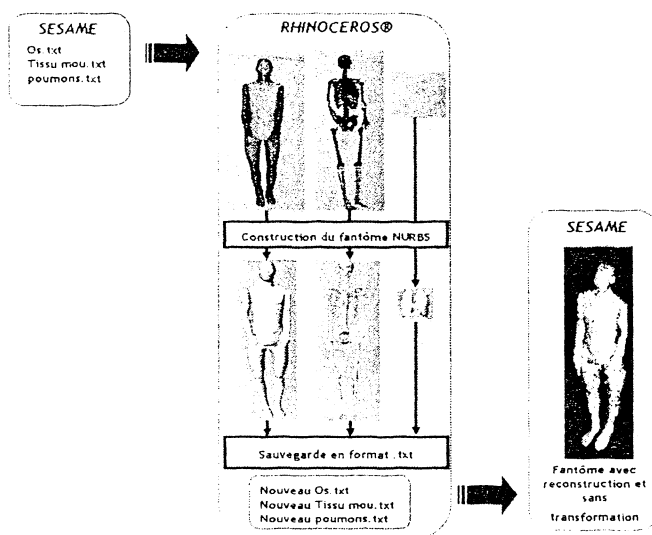


Figure 5 : Construction du fantôme « avec reconstruction mais sans transformation »

- Le quatrième et dernier fantôme dit « avec reconstruction et avec transformation » suit les mêmes étapes de construction que le troisième fantôme. Pour ce fantôme, des transformations de types rotation et translation ont été effectuées sur le fantôme NURBS dans Rhinoceros afin de le placer en position assise avec le bras levé (figure 2).

Validation numérique

Les résultats de la validation numérique sont présentés dans les tableaux 1 et 2.

La validation numérique basée sur l'étude des variations géométriques entre le fantôme Rando voxelisé de référence et les deux fantômes n'ayant pas subi de transformation ont permis de constater que la nouvelle procédure n'engendrait pas de modification significative des dimensions et des volumes. De même, les calculs de doses effectués dans les mêmes conditions géométriques sur les fantômes voxelisés ont montré que les protocoles avec et sans Rhinoceros amenaient aux mêmes résultats.

Tableau 1 : Impact géométrique des différentes transformations sur les fantômes voxelisés

	FANTOMES		
	Fantôme de référence	sans reconstruction et sans transformation	avec reconstruction mais sans transformation
Nombre de coupes	176	176 (0%)	176 (0%)
Taille des voxel (cm)	0,1758 x 0,1758 x 1	0,1708 x 0,1708 x 1 (2,8%)	0,1706 x 0,1706 x 1 (2,9%)
Volume de l'os (cm ³)	7314	7280 (0,46%)	6885 (5,9%)
Volume des poumons (cm ³)	5397	5393 (0%)	5348 (0,9%)
Volume de tissu mou (cm ³)	54851	55504 (1,2%)	54643 (0,4%)

Tableau 2 : Résultats dosimétriques

	FANTOMES		
	Fantôme de référence	sans reconstruction et sans transformation	avec reconstruction mais sans transformation
Dose moyenne à l'os (Gy)	$7,27 \times 10^{-10}$	$7,25 \times 10^{-10}$ (0,28%)	$7,59 \times 10^{-10}$ (4,4%)
Dose moyenne au tissu mou (Gy)	$1,07 \times 10^{-09}$	$1,06 \times 10^{-09}$ (0,9%)	$1,07 \times 10^{-09}$ (0%)
Dose moyenne aux poumons (Gy)	$9,25 \times 10^{-10}$	$9,25 \times 10^{-10}$ (0%)	$9,27 \times 10^{-10}$ (0,2%)
Dose moyenne corps entier (Gy)	$1,00 \times 10^{-09}$	$1,01 \times 10^{-09}$ (1%)	$1,01 \times 10^{-09}$ (1%)

Validation expérimentale

Le tableau 3 présente les doses mesurées et calculées dans le fantôme voxélisé en position assise. Pour les doses calculées, l'erreur statistique associée est inférieure à 1 %.

Tableau 3 : Résultats des doses calculées et mesurées

Numéro du dosimètre	PHOTONS		NEUTRONS	
	Dose calculée (Gy)	Dose mesurée (Gy)	Dose calculée (Gy)	Dose mesurée (Gy)
16_1	1,61	1,790	2,20	2,048
16_2	0,54	0,616	0,81	0,786
16_3	1,75	1,800	2,37	2,189
16_4	0,24	0,288	0,38	0,351
16_5	0,46	0,494	0,61	0,578
16_6	0,17	0,176	0,28	0,260
16_E	2,13	2,121	7,87	4,868
17_1	0,20	0,166	0,36	0,332
17_2	0,28	0,284	0,61	0,460
17_E	0,65	0,692	2,39	2,874
15_1	0,63	0,967	2,40	0,966
15_2	0,42	0,503	0,87	0,550
15_3	0,65	0,763	2,07	0,882

La différence entre les doses mesurées et calculées est comprise entre 1% et 35 % (en neutrons et en photons), seuls les points 15_1, 15_2 et 15_3 pour les neutrons sortent de cette fourchette. Ces résultats sont encourageants. Une partie des différences observées peut être attribuée au positionnement relatif de la source et des dosimètres modélisés. Une nouvelle validation expérimentale avec davantage de points de mesure est en cours.

CONCLUSION

L'outil SESAME, dédié à la reconstitution numérique d'accidents radiologiques dus à une source externe, propose une nouvelle fonctionnalité permettant de prendre en compte la posture de la victime de l'accident lors de la construction du fantôme voxélisé personnalisé de la victime. Les différentes comparaisons numériques ont permis de valider cette nouvelle

fonctionnalité. La première validation expérimentale est encourageante, une validation plus complète est en cours.

De plus, une étude sur les déformations induites sur des fantômes créés à partir de scanner thoraco-abdominaux-pelviens est en cours.

REFERENCES :

[1] C. Huet, A. Lemosquet, I. Clairand, J.B. Rioual, D. Franck, L. de Carlan, I. Aubineau-Lanière, and J.F. Bottollier-Depois. SESAME : a software tool for the numerical dosimetric reconstruction of radiological accidents involving external sources and its application to the accident in Chile in December 2005. *Health Phys.* 96(1):76-83, 2009.

[2] E. Courageot, C. Huet, I. Clairand, J.F. Bottollier-Depois, Numerical dosimetric reconstruction of a radiological accident in south America on April 2009, European Conference on Individual Monitoring of Ionizing Radiation, Athens (Greece), 2010.

[3] Lee C., Lee C., Lodwick D., Bolch W.E. NURBS-based 3-d anthropomorphic computational phantoms for radiation dosimetry applications. *Radiation Protection Dosimetry*, 127(1-4), 227-232, 2007.

[4] Xu X.G., Taranenko V., Zhang J., Shi C. A boundary-representation method for designing whole-body radiation dosimetry models: pregnant females at the ends of three gestational periods-RPI-P3, -P6, -P9. *Physics in Medicine and Biology*, 52, 7023-7044, 2007.