

UTILISATION DU RAISONNEMENT A PARTIR DE CAS POUR LA RECONSTITUTION ET LA MANIPULATION DE FANTOMES VOXELISES

J. Henri^{et}*, J. Farah^{**}, B. Chebel-Morello^{***}, D. Broggio^{**}, D. Franck^{**}, E. Fontaine*, M. Bopp*, L. Makovicka*

- IRMA/ENISYS/ Institut FEMTO – UMR CNRS 6174, Pôle Universitaire des Portes du Jura, 4 Place Tharradin – BP 71427, 25211 Montbéliard, France.
^{**} LEDI/SDI/DPRH, IRSN, BP-17 F, 92269 Fontenay-aux-Roses, France
^{***} COSMI/AS2M/Institut FEMTO – UMR CNRS 6174, 24 Rue Alain Savary, 25000 Besançon, France

I. Introduction

En cas d'accident radiologique, il n'est pas toujours possible de faire des examens poussés tels que des scanners ou des IRM (Image à Résonance Magnétique). Il est néanmoins primordial de pouvoir établir un diagnostic sûr et précis le plus rapidement possible et d'établir un bilan dosimétrique. Généralement, ces bilans s'appuient sur une image en trois dimensions des organes internes d'un corps humain : un fantôme voxélisé. Le rapport ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements) numéro 48 (ICRUReport48, 1992) distingue les fantômes mathématiques des fantômes voxélisés.

Les fantômes mathématiques sont basés sur des formes géométriques simples telles que les sphères, cônes et ellipses. Les fantômes de W. S. Snyder *et al.* (Snyder, *et al.*, 1978), MIRD (Kramer, *et al.*, 1982) et le fantôme asiatique de G. I. Tanaka *et al.* (Tanaka, *et al.*, 1979) font partie de cette catégorie.

Grâce aux avancées dans le domaine des nouvelles technologies, et notamment de l'informatique, des fantômes plus complexes et réalistes avec des représentations du corps et des organes internes en trois, voire quatre dimensions ont vu le jour : Baby, Child, Helga, Donna, Irene et Golem (Zankl, *et al.*, 1988), (Zankl, *et al.*, 1995), (Zankl, *et al.*, 2001), FAX et MAX (Kramer, *et al.*, 1982), (Kramer, *et al.*, 2003), (Kramer, *et al.*, 2004), VIP-Man (Xu, *et al.*, 2000), (Zaidi, *et al.*, 2007), NORMAN et NAOMI (Dimbylow, 1998) ou VoxelMan (Zubal, *et al.*, 1994). Dans cette dernière catégorie, il est possible de distinguer différentes classes en fonction de la forme géométrique de base utilisée pour le « dessiner » :

- les fantômes « voxélisés » sont basés sur des cubes,
- les fantômes « Mesh » sont construits à partir de formes triangulaires et
- les fantômes « NURBS » sont réalisés à partir de courbes.

Si les fantômes Mesh ou NURBS sont plus réalistes car capables de reproduire des formes plus complexes que les fantômes voxélisés, les répartitions de doses sont toujours calculées sur des voxels. Ainsi, les bilans dosimétriques sont toujours faits sur des fantômes voxélisés.

La précision de ces calculs dépend donc directement de la finesse avec laquelle le fantôme utilisé représente le sujet (victime ou patient). Il est ainsi évident que deux personnes de corpulences et mensurations différentes doivent être représentées par des fantômes de corpulences et mensurations différentes. C'est dans ce but que J. Farah *et al.* (Farah, *et al.*, 2010), tout en se basant sur les consignes du rapport de la CIPR (International Commission on Radiological Protection) numéro 89 (ICRP89, 2002) ont créé trente-quatre fantômes féminins spécifiquement dédiés à l'anthroporadiométrie pulmonaire.

Le but de la plate-forme EquiVox est de permettre à l'expert (physicien, biologiste ou autre utilisateur) en radioprotection de travailler avec le fantôme le plus proche du sujet étudié afin d'établir le bilan dosimétrique le plus précis possible (Henriet, *et al.*, 2010), (Bopp, *et al.*, 2009). Cette plate-forme n'a pas pour objectif de présenter un nouvel atlas de fantômes, ni de se substituer au physicien, mais bien de l'aider à sélectionner le meilleur fantôme parmi ceux qu'il connaît en fonction du type de bilan qu'il souhaite réaliser.

II. Méthode

1. Les principes généraux du Raisonnement à Partir de Cas

Le Raisonnement à Partir de Cas (RàPC) est une méthode de résolution de problèmes reproduisant la démarche d'un diagnostic qui serait mené par un humain. Il s'agit d'une discipline née de l'intelligence artificielle. Les principes ont été présentés par J. Kolodner au travers de la plate-forme CYRUS (Kolodner, 1993) et sont présentés sur la Figure 1 d'A. Mille *et al.* (Mille, et al., 1996), (Mille, 1999).

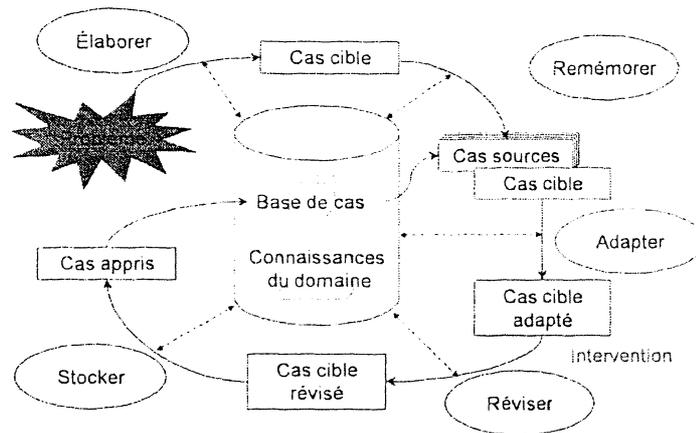


Figure 1. Cycle du Raisonnement à Partir de Cas.

L'idée principale du RàPC est d'utiliser les expériences connues pour résoudre de nouvelles situations problématiques dont les solutions sont a priori inconnues. Toute situation résolue est stockée avec sa solution selon un certain formalisme dans la « *base de cas* ». Cette formalisation (phase « *élaborer* ») va permettre de comparer et sélectionner le ou les problèmes de la base de cas les plus similaires à la situation problématique (phase « *remémorer* »).

Par ailleurs, une formalisation de toutes les connaissances liées au domaine d'application est stockée dans une « *ontologie* », encore appelée « *base de connaissances* ». Cette connaissance du domaine permettra par la suite d'« *adapter* » la solution connue à la situation problématique étudiée. Les phases « *réviser* » et « *stocker* » permettent d'avoir un retour d'expérience et de capitaliser la nouvelle situation résolue si la solution s'est avérée satisfaisante et si le problème nouvellement étudié présente un intérêt par son originalité par exemple (Fusch, et al., 2006), (Aamodt, 2004).

2. La plate-forme EquiVox

La plate-forme EquiVox propose à l'heure actuelle toutes les étapes basées sur la base de cas : formalisation, élaboration, comparaison et remémoration ainsi que la capitalisation.

Chaque fantôme de la base de cas d'EquiVox est caractérisé par un ensemble de descripteurs. Il s'agit en fait de l'ensemble des mensurations et caractéristiques qui ont été choisies en regard au premier domaine particulier d'application que nous avons choisi d'étudier : l'anthroporadiamétrie pulmonaire pour des sujets féminins.

Certains descripteurs donnent des informations générales ne nécessitant pas d'examen complexe tels que l'âge, le poids, la taille, les tours de dessus et de dessous de poitrine, le sexe et s'il s'agit d'un fumeur, d'autres sont des informations comme les volumes de certains organes (cœur, poumons, thorax), l'épaisseur des os, l'indice de masse corporelle pouvant nécessiter du matériel. Pour d'autres domaines d'applications, il sera bien entendu possible

d'étendre et d'affiner cet ensemble de descripteurs. Pour chaque cas de la base de cas, la solution est le fantôme correspondant aux caractéristiques et mensurations décrites.

Les notations utilisées sont les suivantes :

- ✓ n est le nombre total de descripteurs des cas de la base de cas. Toutes les valeurs sont connues pour les cas de la base de cas, tandis que certaines valeurs peuvent ne pas être connues pour le sujet,
- ✓ λ_k est un poids associé au descripteur k . En effet, pour l'anthroporadiométrie pulmonaire de sujets féminins, les tours de poitrines ont une très grande importance dans les calculs. En revanche, pour des bilans dosimétriques d'autres populations et d'autres parties du corps comme les membres inférieurs par exemple, peu importe si le tour de poitrine du fantôme choisi est proche ou non de celui du sujet. Ce poids permet donc de spécifier l'importance relative de chacun des descripteurs lors de la phase de comparaison du sujet aux fantômes connus. Plus le poids associé est grand, plus la caractéristique est importante. Les valeurs de ces poids sont paramétrables et le physicien peut les modifier en même temps qu'il saisit les mesures faites sur le sujet, lors de la phase de formalisation. Il est aussi possible de spécifier des jeux de poids en fonction du domaine d'application. Les poids du jeu de poids choisi par le physicien sont proposés et peuvent aussi être modifiés avant de lancer la phase de remémoration,
- ✓ δ_k^i indique si la valeur du descripteur k du sujet est connue ou non, certaines valeurs pouvant de pas avoir pu être mesurées. Quand la valeur de la caractéristique n'est pas connue δ_k^i vaut 0, sinon δ_k^i vaut 1,
- ✓ $\Delta_k = D_k - d_k$, où D_k est la valeur maximum qu'il est possible d'avoir pour le descripteur k . Il ne s'agit pas de la valeur maximum parmi celles des cas stockés, mais la valeur maximum qu'il est possible de rencontrer, et d_k est la valeur minimum qu'il est possible d'avoir pour le descripteur k ,
- ✓ a_k^i est la valeur du descripteur k du sujet,
- ✓ a_k^j est la valeur du descripteur k du fantôme avec lequel le sujet est comparé.

$$S_{i,j} = \frac{\sum_{k=1}^n \delta_k^i \lambda_k \left[\frac{\Delta_k - |d_k^i - d_k^j|}{\Delta_k} \right]}{\sum_{k=1}^n \lambda_k \cdot \delta_k^i} \quad (1)$$

$$I_i = \frac{\sum_{k=1}^n \delta_k^i \lambda_k}{\sum_{k=1}^n \lambda_k} \quad (2)$$

La formalisation des cas étant basées sur une énumération de valeurs de descripteurs, le calcul de la similarité d'un sujet à un fantôme s'appuie sur un algorithme de la classe des *K plus proches voisins* (*K-nn* : *K-nearer neighbours*). La similarité, calculée selon la formule (1) ne tient compte que les informations connues et mesurées sur le sujet. Il s'agit en effet de la somme des différences observées entre les caractéristiques connues du sujet et celles du fantôme, pondérées par les poids affectés à chacune d'elles. Ainsi, une différence importante observée sur une caractéristique ayant un impact très important sur les calculs dosimétriques « pèsera » beaucoup plus lourd que la même différence observée sur une caractéristique d'importance secondaire voire négligeable lors du calcul dosimétrique. Par ailleurs, cet indice de similarité ainsi que toutes les différences observées sont normalisés.

L'indice de similarité est accompagné d'un indice de confiance permettant d'en apprécier la justesse. Cet indice de confiance est donné par la formule (2). Il est lui aussi normalisé et ne tient compte que de la proportion pondérée d'informations inconnues en regard au nombre d'informations total attendues.

Lorsque l'utilisateur souhaite choisir un fantôme pour un sujet donné, il doit choisir le jeu de poids à utiliser en fonction du type de bilan sur lequel il souhaite travailler, puis éventuellement les ajuster, avant de saisir les valeurs connues de chaque descripteur. EquiVox calcule ensuite tous les indices de similarité en comparant chaque fantôme aux données connues du sujet. Il classe dans l'ordre décroissant des similarités les fantômes connus, et accompagne ces résultats de l'indice de confiance. Il est ensuite possible à l'expert de comparer chacun des fantômes au sujet grâce à un graphique en étoile reprenant

sur chaque axe les valeurs de chaque descripteur. Un cas d'application est présenté dans la partie suivante.

III. Résultats

La base de cas de la plate-forme EquiVox est constituée de fantômes féminins spécialement adaptés à l'anthroporadiométrie pulmonaire de sujets féminins. Trente-quatre fantômes ont été construits par J. Farah (Farah, 2010) sur la base des recommandations de la CIPR (ICRP89, 2002) pour les calculs dosimétriques dans ce domaine particulier. Afin de vérifier la validité des calculs de similarité de la plate-forme, vingt-quatre de ces fantômes ont été intégrés à la base de cas.

D'un autre côté, la base CAESAR (Robinette, 2000) contient les mensurations de quatre-vingts femmes d'origine Caucasienne. Seules les mensurations externes de ces quatre-vingts personnes sont disponibles (âge, taille, poids, et tours de poitrine). Parmi les trente-quatre fantômes créés, au moins un correspond à chacune de ces femmes. Dans le cas de l'anthroporadiométrie pulmonaire de sujets féminins, les travaux de J. Farah *et al.* (Farah, et al., 2010) montrent que les caractéristiques les plus importantes sont les tours de dessus et de dessous de poitrine, le poids le plus grand leur a été affecté (quatre). Viennent ensuite la taille et le poids, puis l'âge et le sexe, un poids égal à trois leur a donc été associé. Les poids de toutes les autres mensurations sont égaux à un, à l'exception du diamètre de tour de poignet qui est une mesure n'ayant aucune importance pour le domaine d'étude. Par conséquent, un poids zéro a été associé à cette dernière mesure.

Caractéristiques	Poids associés	Fantôme "85A"	Fantôme "120F"	Sujet
Age (années)	2	43	43	20.4
Taille (cm)	3	167	182	162
Poids (kg)	3	50.42	94.72	46
Sexe (M/F)	2	F	F	F
Fumeur (O/N)	1	N	N	N
Volume du thorax (l)	1	13.72	33.40	
Volume pulmonaire (l)	1	2.30	2.99	
Epaisseur extra-thoracique (cm)	1	2.1	11.6	
Proportion graisse-muscle (kg/m ²)	1	18.08	28.60	
Tour de dessous de poitrine (cm)	4	71	105	68.9
Tour de dessus de poitrine (cm)	4	84	128	82.1
Périmètre du poignet (cm)	0	N/A	N/A	
Volume cardiaque (l)	1	0.59	0.77	
Origine ethnique	1	Caucasienne	Caucasienne	Caucasienne
Similarité		0,7655	0,5732	
Indice de confiance		0,8	0,8	

Tableau 1. Valeurs numériques des exemples.

Les fantômes proposés par EquiVox ont été comparés à ceux que nous attendions (donnant les résultats dosimétriques les plus précis). Vingt-huit propositions correspondent au fantôme attendu. Pour quarante-sept des cinquante-deux autres propositions, les fantômes n'étaient pas stockés dans la base de cas d'EquiVox. Néanmoins, EquiVox propose toujours les fantômes connus dont les mensurations sont les plus proches en première et deuxième proposition. Pour cinq des quatre-vingts cas étudiés (6,25%), EquiVox propose le fantôme stocké attendu en deuxième position. L'indice de confiance calculé par EquiVox (80%) est donc tout à fait pertinent en regard de ces résultats. Par ailleurs les indices de similarité sont eux aussi pertinents et varient de 73% à 79%. Les similarités les plus faibles sont obtenues pour les fantômes non retrouvés, tandis que les similarités les plus fortes sont obtenues pour les résultats concordants.

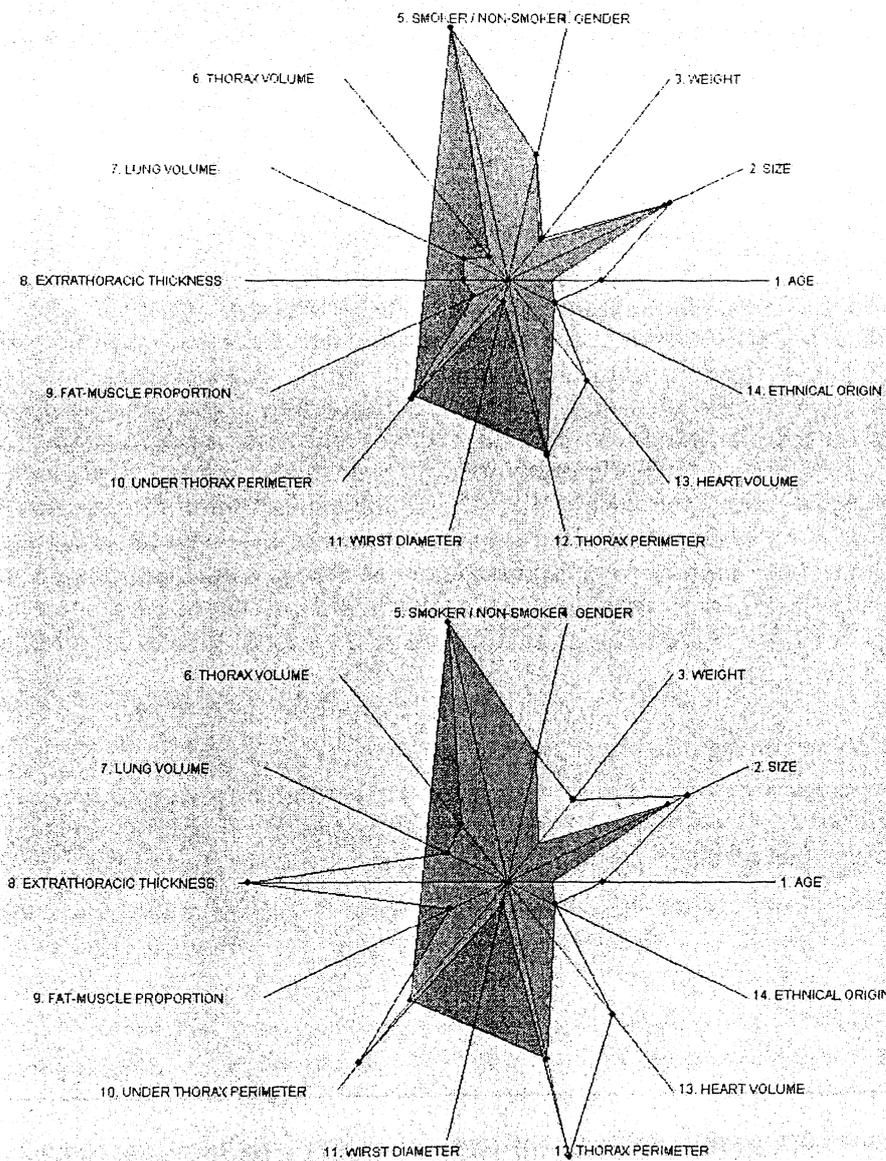


Figure 2. Graphique présenté par EquiVox.

En complément à ces valeurs numériques globales, EquiVox est capable d'aider les experts à comparer visuellement les mensurations des sujets et celles des fantômes via un graphique en étoile présentant sur chaque axe la valeur de la mensuration pour le sujet et celle du fantôme. Deux aires sont alors superposées. Le Tableau 1 montre les mensurations de l'un des sujets de la base CAESAR, et celles de deux fantômes stockés dans la base de cas (le plus et le moins similaire selon les calculs d'EquiVox). La Figure 2 montre les deux

graphiques dessinés par l'application en complément des calculs de similarité et de confiance. Le graphique de comparaison dessiné pour le fantôme le moins similaire (en bas de la Figure 2) montre des aires très distinctes entre le fantôme et le sujet. Le recouvrement est loin d'être aussi proche que dans le cas du graphique obtenu pour le fantôme le plus similaire (en haut de la Figure 2). Ce graphique ne se substitue donc pas aux calculs, mais peut apporter une aide précieuse à l'expert en position d'arbitrage.

IV. Conclusion

EquiVox est une plate-forme innovante permettant d'aider l'expert à retrouver le fantôme connu le plus adapté aux calculs dosimétriques qu'il souhaite faire. Un certain nombre de contraintes sont prises en compte par cette plate-forme dans la recherche du fantôme le plus similaire et la formalisation du problème. Les calculs se font sur la base des mensurations pertinentes connues. Le fait que certaines d'entre elles peuvent ne pas être connues ou mesurées est pris en compte dans les calculs. De plus, l'importance relative de chaque mensuration est aussi prise en compte. Ces importances relatives étant fonction du domaine d'application, il est possible d'en définir, conserver et modifier des jeux pour chaque domaine d'application. C'est un outil d'aide qui laisse le libre arbitre à l'expert. La décision finale ainsi que l'importance relative donnée à chaque critère de recherche sont laissées à la discrétion de l'utilisateur final. Les travaux présentés ici ont permis de valider la démarche et les calculs dans le cas particulier de l'anthroporadiométrie pulmonaire de sujets féminins, mais les principes peuvent être utilisés pour d'autres types de bilans dosimétriques.

Par ailleurs, le principe du Raisonnement à Partir de Cas s'appuie sur cinq phases (élaboration, remémoration, adaptation, révision, stockage). Trois d'entre elles ont été implémentées dans EquiVox (élaboration, remémoration et stockage). Les travaux futurs devront proposer aux experts des fantômes *adaptés*, basés sur des modifications des fantômes connus les plus similaires. L'implémentation de cette phase d'adaptation aura une incidence certaine sur les phases de remémoration et de stockage des fantômes, comme le montrent les travaux de M. K. Haouchine (Haouchine, 2009). En effet, le fantôme le plus facilement adaptable ne sera pas forcément le plus similaire, et si la phase d'adaptation ne nécessite que quelques fantômes pour retrouver tous les autres, il ne sera alors plus nécessaire de stocker des fantômes connus qu'il est possible de retrouver par un algorithme d'adaptation.

V. Bibliographie

Aamodt, A. 2004. Knowledge-Intensive Case-Based Reasoning and Sustained Learning. *Proceedings of the 9th European Conference on Artificial Intelligence, ECCBR'04, Lecture Notes in Artificial Intelligence, Springer, pp. 1–15.* 2004.

Bopp, M, et al. 2009. Preliminary Study of a New CBR-Based Application for Voxelised Phantom Creation: ReEPh. *Singaporean-French IPAL Symposium (SinFra'09), pp. 107-115.* 2009.

Dimbylow, P J. 1998. Induced current densities from low-frequency magnetic fields in a 2 mm resolution, anatomically realistic model of the body. *Physics in Medicine and Biology, vol. 43, issue 2, pp. 221–230.* 1998.

Farah, J. 2010. Utilisation de fantômes de type NURBS pour l'étude des facteurs morphologiques influant sur l'anthroporadiométrie pulmonaire. *4e Journées Scientifiques Francophones, codes de calculs en radioprotection, radiophysique et dosimétrie.* Sochaux, France : s.n., 2010.

Farah, J, Broggio, D and Franck, D. 2010. Creation and use of adjustable 3D phantoms: application for the lung monitoring of nuclear workers. *European Conference on Individual Monitoring of Ionizing Radiation.* Athens, Greece : s.n., 2010.

- Fusch, B, et al. 2006.** Une première formalisation de la phase d'élaboration du raisonnement à partir de cas. *Actes du 14ème atelier du raisonnement à partir de cas*. Besançon, France : s.n., 2006.
- Haouchine, M K. 2009.** Remémoration guidée par l'adaptation et maintenance des systèmes de diagnostic industriel par l'approche du raisonnement à partir de cas. *Thèse, Université de Franche-Comté*. 2009.
- Henriet, J, et al. 2010.** Feasability Study of a New Platform Based on the Case-Based Reasoning Principles to Efficiently Search and Store Voxel Phantoms. *Radioprotection vol. 45(1), to appear*. 2010.
- ICRP89. 2002.** Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection. *International Commission on Radiological Protection Publication 89*. 2002.
- ICRUReport48. 1992.** Phantoms and Computational Models in Therapy, Diagnosis and Protection. *International Commission on Radiation Units and Measurements Report 48*. 1992.
- Kolodner, J. 1993.** Case-Based Reasoning. *Morgan Kaufmann Publishers*. 1993.
- Kramer, R, et al. 2004.** All about FAX: a Female Adult voXel phantom for Monte Carlo calculation in radiation protection dosimetry. *Physics in Medicine and Biology, 49, pp. 5203-5216*. 2004.
- Kramer, R, et al. 2003.** All About MAX: A Male Adult VoXel phantom for Monte Carlo Calculations in Radiation Protection Dosimetry. *Physics in Medicine and Biology, 48(9), pp. 1239-1269*. 2003.
- Kramer, R, et al. 1982.** The calculation of dose from external photon exposures using reference human phantoms and Monte Carlo methods. Part I: the male (Adam) and female (Eva) adult mathematical phantoms. *Report GSF-Bericht S-885*. 1982.
- Mille, A. 1999.** Tutorial CBR : Etat de l'art de raisonnement à partir de cas. *Plate-forme AFIA'99*. Palaiseau, France : s.n., 1999.
- Mille, A, Fuchs, B and Herbeaux, O. 1996.** A unifying Framework for Adaptation in Case-Based Reasoning. *Workshop on Adaptation in Case-Based Reasoning, ECAI'96, pp. 22-28*. Budapest, Hungary : s.n., 1996.
- Robinette, K M. 2000.** CAESAR. *measures up, Ergonomics in Design 8(3) pp. 17-23*. 2000.
- Snyder, W S, Ford, M R and Warner, G G. 1978.** Estimates of absorbed fractions for mono-energetic photons sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom. *The Society of Nuclear Medicine, MIRD pamphlet number 5 revised*. 1978.
- Tanaka, G I, Kawamura, H and Nakahara, Y. 1979.** Reference Japanese man-I. Mass of organs and other characteristics of normal Japanese. *Health Physics, vol. 36, issue 3, pp. 333-346*. 1979.
- Xu, X G, Chao, T C and Bozkurt, A. 2000.** VIP MAN, an imaged-based wholebody adult male model constructed from color photographs of the visible human project for multi-particle Monte Carlo calculations. *Health Physics, vol. 78, issue 5, pp. 476-486*. 2000.
- Zaidi, H and Xu, X G. 2007.** Computational anthropomorphic models of the human anatomy: the path to realistic Monte Carlo modelling in radiological sciences. *Annu. Rev. Biomed. Eng. 9, pp. 471-500*. 2007.
- Zankl, M and Wittmann, A. 2001.** The adult male voxel model 'Golem' segmented from whole-body CT patient data. *Radiation Environment Biophysics, vol. 40, pp. 153-162*. 2001.
- Zankl, M, et al. 1995.** Organ doses for children from computed tomographic examinations. *Radiation Protection Dosimetry, vol. 57, issue 1/4, pp. 393-396*. 1995.

Zankl, M, et al. 1988. The construction of computer tomographic phantoms and their application in radiology and radiation protection. *Radiation Environmental Biophysics*, vol. 27, pp. 153–164. 1988.

Zubal, I G, et al. 1994. Computerized three dimensional segmented human anatomy. *Medical Physics*, vol. 21, issue 2, pp. 299–302. 1994.