

Le rôle des simulations numériques Monte Carlo dans les domaines associés à la physique des rayonnements ionisants

L. MAKOVICKA¹, R. GSCHWIND¹, E. MARTIN¹

(Manuscrit reçu le 6 novembre 2006, accepté le 28 février 2007)

RÉSUMÉ Les simulations numériques, basées essentiellement sur les méthodes de Monte Carlo, sont devenues pratiquement incontournables dans tous les domaines liés à la physique nucléaire appliquée. Les statistiques les plus récentes confirment leur exploitation de plus en plus large à tous les niveaux et dans tous les secteurs d'applications (instrumentation, dosimétrie, radioprotection, physique médicale, réglementations, etc.) (Paul *et al.*, 2005). Elles permettent de fournir souvent des informations très précises là où les expérimentations sont soit impossibles, soit difficilement réalisables ou coûteuses. Elles peuvent représenter un axe privilégié de recherche pour les petites équipes ou les laboratoires disposant de moyens plutôt modestes, car les équipements informatiques sont devenus tout à fait abordables. Depuis sa naissance en 1993, l'équipe IRMA fait justement partie de ces laboratoires. Cet article fait le bilan de ses activités après son adhésion aux LARD en 1996.

ABSTRACT The role of Monte Carlo numeric simulations in fields associated to the ionising radiations physics.

Numeric simulations, mainly based on Monte Carlo methods, have become mandatory for all research sectors connected to the applied nuclear physics. The most recent statistics show their use at all levels and in all applications (instrumentation, dosimetry, radiation protection, medical physics, regulation, etc.) (Paul *et al.*, 2005). They often provide very precise information when experiments are impossible, difficult or expensive. They may constitute an alternate research line for small teams or laboratories without huge dotations, due to low cost of computers. For 13 years, the IRMA team crew is an example of this laboratory. This paper summarises its activities since its integration inside LARD association in 1996.

Keywords : Monte-Carlo calculus / instrumentation / dosimetry / external radiotherapy

1. Introduction

L'équipe IRMA (Interaction Rayonnement-Matière) du Département CREST (Caractérisation des Rayonnements, Écoulements, Surfaces et Transferts) est située à Belfort-Montbéliard et fait partie de l'Institut FEMTO-ST UMR CNRS. Son évolution scientifique est très étroitement liée à l'utilisation des méthodes de

¹ IRMA/CREST/FEMTO-ST UMR 6174 CNRS, université de Franche-Comté, BP 71427, 25211 Montbéliard Cedex, France.

Monte Carlo dans des applications très variées des rayonnements ionisants telles que :

- la radioprotection ;
- le vieillissement des matériaux ;
- l'environnement ;
- l'instrumentation ;
- les applications médicales.

Le fil conducteur de l'ensemble des thèmes abordés par l'équipe a toujours été le développement de modèles théoriques validés par des expériences. Leur élaboration par méthodes de Monte Carlo a été en règle générale effectuée soit grâce à l'utilisation des codes de calculs de type EGS (Ford *et al.*, 1978 ; Bielajew and Rogers, 1987 ; Kawrakov and Rogers, 2001) ou MCNP (Briestmeister, 1997), soit grâce aux propres codes « maison ». Les collaborations au sein des LARD (C2M/IRCOM Limoges, LMN-AC Besançon, CEM Montpellier, AV Prague, CRESA Nice, etc.), de la SFRP et de la FIRAM (IGR, UPS, INSTN, IRSN, CEA, etc.) ont toujours été des facteurs clés pour la progression et la croissance de l'équipe. Depuis son adhésion aux LARD en 1996 et grâce au soutien local de la part de la CAPM (Communauté d'Agglomération du Pays de Montbéliard), elle organisa :

- les « XIV^{es} journées LARD » les 23-24 octobre 1997 ;
- les journées techniques SFRP « Gestion des sources ionisantes en milieu universitaire, médical et industriel » les 21-22 juin 2000 ;
- les journées scientifiques francophones SFRP « Codes de calculs en radioprotection, radiophysique et dosimétrie » les 2-3 octobre 2003 (participants de 8 pays) ;
- et les « XXII^{es} journées LARD » les 20-21 octobre 2005.

Les orientations scientifiques, assez diversifiées dans le passé, convergent depuis quelques années de plus en plus vers les applications en physique et en radioprotection médicales.

Il est à noter que les exemples cités ci-dessous ne sont pas le rapport exhaustif de l'activité de l'équipe IRMA/CREST mais illustrent une collaboration dense entre les équipes membres des LARD.

2. Instrumentation et environnement

L'application des codes EGS4 (Duverger *et al.*, 1997) et MACDO1 (Makovicka *et al.*, 2001) (programme « maison » s'appuyant sur les données de MCNP4B (Briestmeister, 1997) et de TRIM95 (Ziegler *et al.*, 1985)) à des systèmes dosimétriques, développés dans le cadre de différents projets au sein du laboratoire ou dans le cadre de collaborations nationales ou internationales, a été plusieurs fois réalisée.

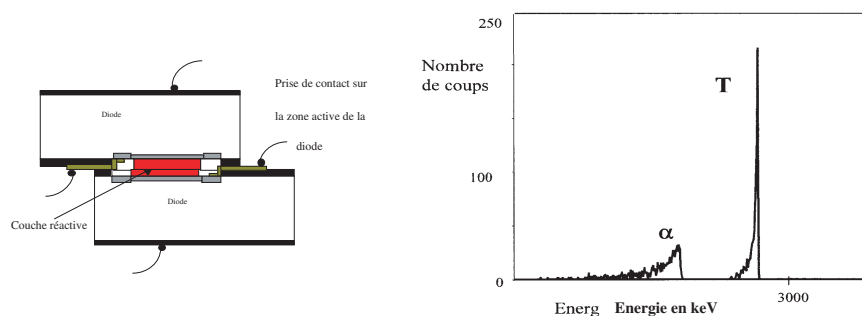


Figure 1 – Système « SANDWICH » du C2M et spectre obtenu par « MACDO1 ».
 «SANDWICH» system of C2M and «MACDO1» spectral results.

Par exemple, les modèles numériques élaborés ont aidé à maîtriser théoriquement la réponse des dosimètres neutroniques personnels conçus au sein de l'équipe C2M/IRCOM à l'université de Limoges (Makovicka *et al.*, 2001a ; Isabey *et al.*, 1998, 1995a ; Isabey, 1997). En effet, la simulation a permis :

- d'analyser efficacement la contribution « parasite » des photons de différentes origines (photons provenant d'une source extérieure, photons générés au sein du dosimètre par des interactions neutroniques, photons rétrodiffusés par le fantôme) dans un détecteur basé sur la méthode différentielle ;
- de montrer que la sensibilité dosimétrique d'un système « sandwich » était dépendante du champ, car les coefficients albedo et les facteurs de conversion $H_p(10)/\Phi$ variaient des neutrons thermiques aux neutrons rapides. Ainsi, ce capteur « sandwich », composé de deux détecteurs à semi-conducteur (Si) qui enferment une fine couche de LiF (réaction ${}^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T} + 4,78\text{ MeV}$), a pu être mis en place (Fig. 1).

Le système « sandwich », en comparaison avec des dosimètres basés uniquement sur la méthode différentielle simple, présentait de nombreux atouts. Notamment, du fait de son approche spectrométrique, il offrait la possibilité d'obtenir en temps réel des informations supplémentaires et était quasi-insensible aux photons γ . Il aurait été alors intéressant d'utiliser par la suite un système jumelé « dosimètre – spectromètre » en optimisant la sensibilité dosimétrique par une amélioration des dimensions de la surface de détection et de l'épaisseur de la couche réactive de LiF.

Ces deux exemples montrent l'intérêt des simulations des systèmes de détection qui facilitent considérablement la réalisation pratique et le coût des prototypes.

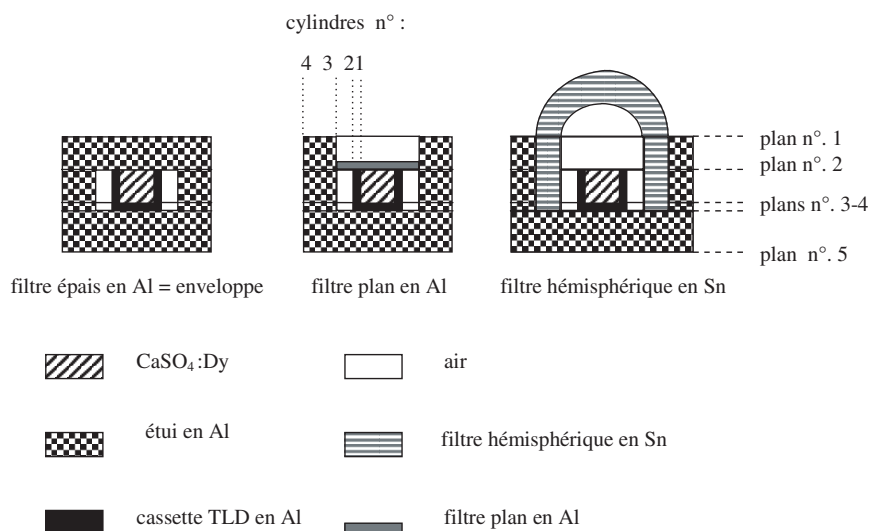


Figure 2 – Représentation schématique du dosimètre.
Schematic representation of the dosimeter.

Dans le cadre d'une collaboration franco-bulgare, un prototype d'un dosimètre développé par PROTECTA a été étudié. Les détecteurs thermoluminescents au CaSO₄(Dy), élaborés à l'Académie de Sciences de Sofia par Guelev (Fig. 2) en collaboration avec Spurný de Prague, ont été utilisés (Isabey *et al.*, 1997). Les points suivis dans cette optimisation ont été les suivants : nature de l'enveloppe, prise en compte du fantôme, nature du filtre et de son épaisseur. Au final, les paramètres physiques et géométriques, mis au point grâce aux modélisations Monte Carlo, ont conduit à la réalisation de ce dosimètre bulgare.

En dehors des systèmes dosimétriques cités, l'équipe a aussi travaillé sur la simulation de systèmes spectrométriques tels que :

- un spectromètre au germanium hyper-pur (Isabey *et al.*, 1995b) : modélisation (Fig. 3) et optimisation des conditions des mesures de faibles activités ;
- un scintillateur au NaI(Tl) dans un laboratoire mobile (Makovicka *et al.*, 1996) ;
- un spectromètre semi-conducteur Liulin-Mobile basé sur les diodes silicium et utilisé par les équipes de l'Académie des sciences tchèque et bulgare (Spurný *et al.*, 2003) pour les mesures à bord des avions.

De plus, l'utilisation combinée du code EGS4 pour les photons et du code Monte Carlo « maison » TLALFA destiné au suivi des particules α a conduit au

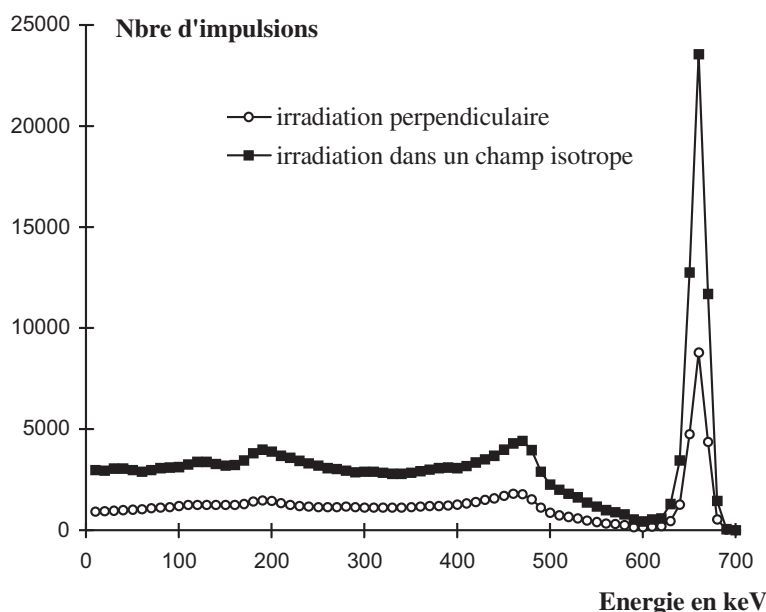


Figure 3 – Influence du type de l'irradiation par du ^{137}Cs sur la réponse du spectromètre.
 Impact of the exposition type by ^{137}Cs on the answer of the spectrometer.

développement de prototypes de TLD-sondes pour la mesure de la radioactivité dans les sols (Isabey-Gschwind *et al.*, 2001).

Une attention particulière mérite d'être donnée à l'étude effectuée dans le cadre des collaborations franco-bulgares OM2 sur la mise au point d'un télescope muonique (Fig. 4) installé à l'université de Blagoevgrad (Bulgarie) et basé sur la détection des photons Tcherenkov (Mishev *et al.*, 2003, 2001 ; Mishev, 2002 ; Makovicka *et al.*, 2001b ; Angelov *et al.*, 2000). Pour ce faire, le code EGS4 a été adapté pour tenir compte des muons du rayonnement cosmique. La comparaison avec le code CORSIKA des résultats obtenus (Fig. 5) pour un nombre total de photons Tcherenkov créés au niveau de la mer a été très satisfaisante.

3. Vieillessement et modifications des matériaux et des composants optoélectroniques

Des collaborations nationales, essentiellement avec les autres équipes des LARD (C2M Limoges, LMN-AC Besançon), et internationales (Czech Technical University – CTU Prague) orientées vers les matériaux (« actifs » ou « passifs »)

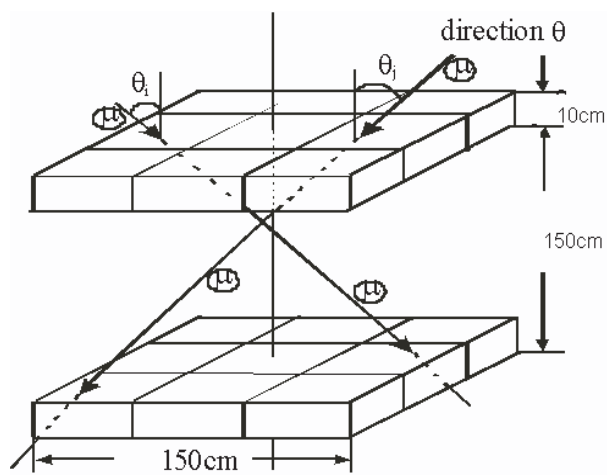


Figure 4 – Schéma du télescope muonique.
Schematic of the muonic telescope.

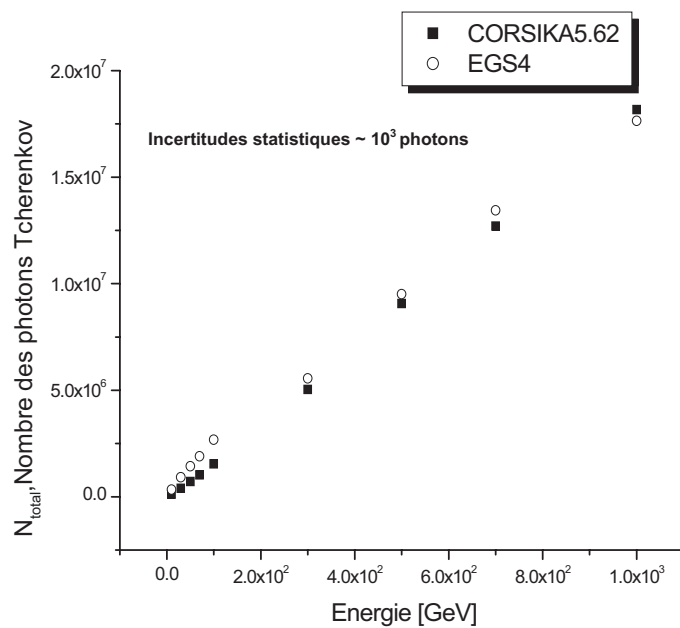


Figure 5 – Comparaison des résultats obtenus par le code EGS4 et le code CORSIKA.
Comparison of results obtained by the EGS4 code and the CORSIKA code.

ont été aussi mises en place en-dehors des domaines directement liés à l'instrumentation dosimétrique ou spectrométrique.

Ainsi, avec le C2M, les simulations Monte Carlo ont permis à la fois de mieux contrôler, à l'échelle du μm , le comportement du CR-39 sous irradiation électronique en tant que guide optique (Isabey *et al.*, 1999) et d'étudier les modifications topographiques du polymère PADC (Fig. 6, Taupiac-Darraud *et al.*, 2000).

De plus, des travaux effectués avec le LMN-AC (Ravat *et al.*, 2001, 2000) ont conduit à une meilleure maîtrise du vieillissement du polyuréthane, utilisé pour le stockage de certains types de déchets nucléaires (Fig. 7).

Des études complémentaires, menées au sein de l'équipe et en collaboration avec le CAFI (Suisse) ont permis d'évaluer l'impact des irradiations industrielles (γ stérilisations) sur les matériaux biocompatibles (Meunier *et al.*, 2003a, 2003b).

En outre, les relations scientifiques fructueuses menées depuis plusieurs années avec le Département de Dosimétrie du CTU Prague méritent d'être soulignées car elle interviennent autant dans le domaine des matériaux radiosensibles PAG (Guillerminet *et al.*, 2005, 2003) que dans les applications médicales.

4. Applications médicales

Malgré de nombreux travaux accomplis dans les secteurs précédemment cités, la recherche de l'équipe IRMA s'oriente depuis 1997 de plus en plus vers les applications médicales des rayonnements ionisants. En effet, comme les techniques les plus modernes en radiothérapie externe prennent de plus en plus d'importance, une meilleure précision des traitements radiothérapeutiques nécessite une évaluation de la dose absorbée par les tissus aussi exacte que possible. Le poids des techniques numériques est donc renforcé. Cette orientation a été aussi considérablement encouragée par la convention signée entre le laboratoire universitaire CREST/IRMA, le Centre hospitalier Belfort-Montbéliard et le comité local de la Ligue contre le Cancer.

Les études ont porté initialement sur le développement des calculs dosimétriques, tant par l'élargissement des connaissances sur les paramètres physiques des faisceaux d'irradiation que par l'amélioration des fantômes numériques et des dosimètres utilisés pour le calcul de la distribution 3D de la dose (Guillerminet, 2003 ; Guillerminet *et al.*, 2005, 2003, 2001). Des efforts importants ont été déployés pour simuler correctement la tête de l'accélérateur SATURNE43 (Fig. 8) avec le code OMEGA/BEAM (Rogers *et al.*, 1995).

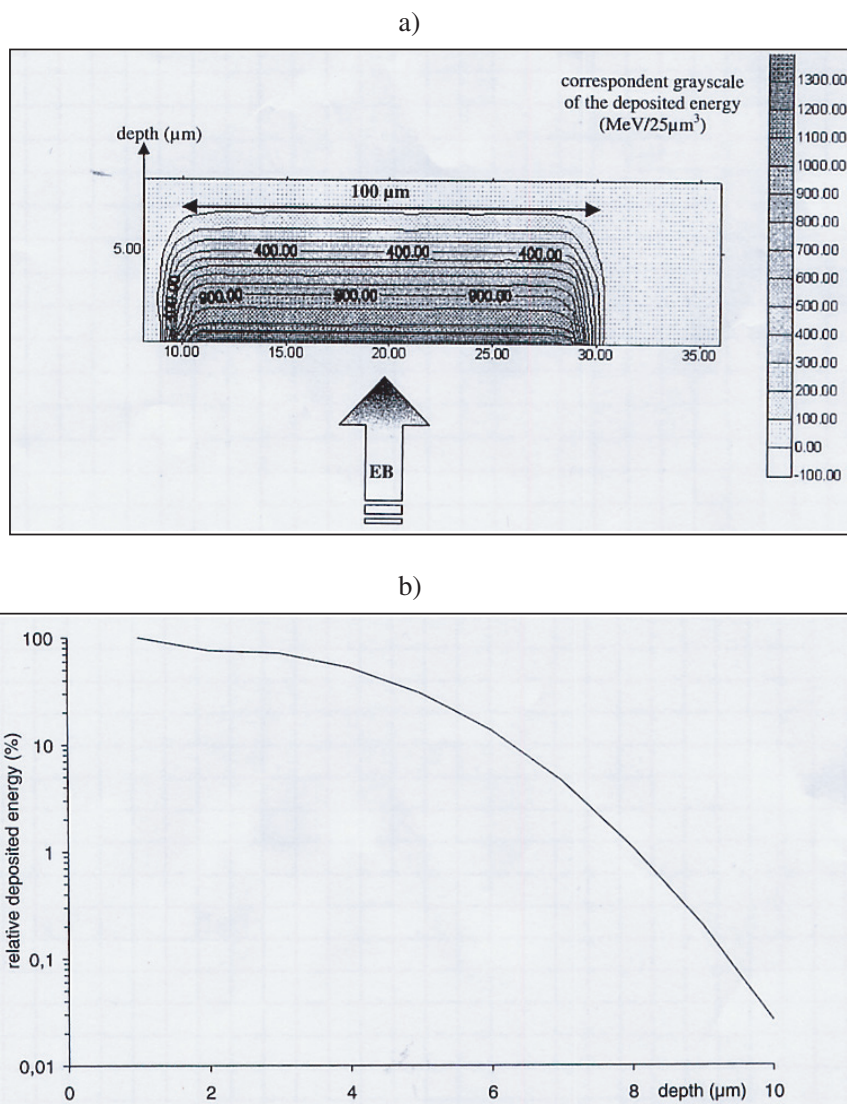


Figure 6 – (a) Lignes de dépôts isoenergétiques simulés pour les irradiations de PADC par les électrons de 25 keV. (b) Dépôt d'énergie relatif simulé en fonction de la profondeur pour les électrons de 25 keV.
 (a) Simulated deposition by isoenergy lines for a 25 keV-EB in PADC. (b) Simulated relative deposited energy as a fonction of depth for a 25 keV-EB.

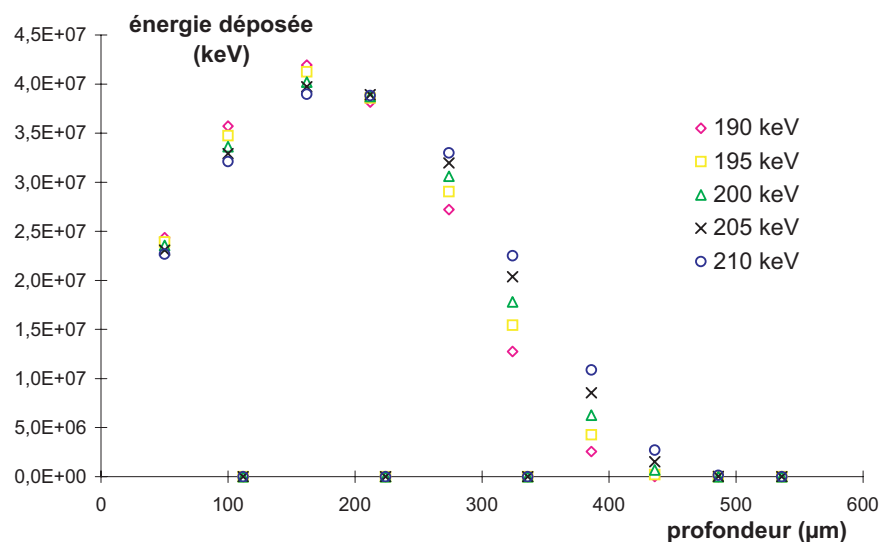
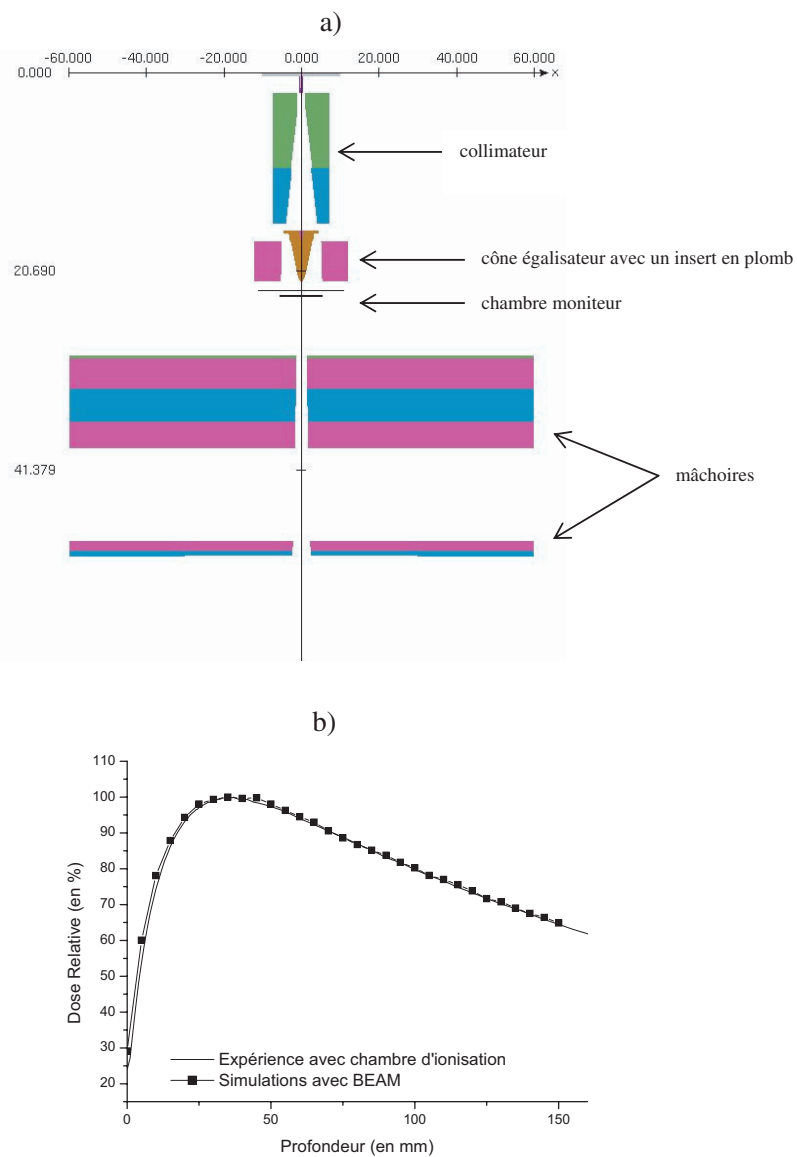


Figure 7 – Dépôt d'énergie simulé par le code EGS4-PRESTA dans la structure polyuréthane (PU) stratifié pour des énergies d'électrons entre 190-210 keV.

Energy deposition simulated by the EGS4-PRESTA code in the PU stratified structure for energies in the range 190-210 keV.

D'autres modèles théoriques ont été élaborés pour mettre en évidence les perturbations de doses induites par la présence d'une prothèse de hanche lors d'une irradiation du pelvis (Buffard *et al*, 2005). Cette étude répond à un besoin exprimé par les radiothérapeutes. En effet la présence d'un implant métallique engendre des modifications de doses qui ne sont pas prises en compte de façon correcte par les systèmes de planification de traitement. Les balistiques actuelles réalisées consistent, soit à conserver le traitement standard avec le passage d'un faisceau au travers de l'implant, soit à éviter la prothèse. Cette étude a mis en évidence et a quantifié deux types de perturbations. La première est une augmentation locale de la dose au contact de l'implant. Dans ce cas, l'influence des revêtements présents a été prise en compte. La seconde, plus classique, consiste en une atténuation non négligeable du faisceau d'irradiation derrière la prothèse. Les premiers résultats théoriques ont permis de tester le système de planification de traitement utilisé au CH Belfort-Montbéliard (algorithme pencil beam) dans les conditions similaires à celles des modèles Monte Carlo et ont montré que la dose calculée par l'algorithme pencil beam au sein et au voisinage de l'implant n'est pas valable. Cependant, au niveau des volumes à traiter, la dose est calculée entre 5 % et 10 % près en ne tenant compte que de l'atténuation de la composante primaire du faisceau.



**Figure 8 – (a) Représentation de la tête du SATURNE43 par le code BEAM. (b) Rendement en profondeur pour un champ d'irradiation $5 \times 5 \text{ cm}^2$ (faisceau X25 MV).
 (a) Representation of the SATURNE43 head by the BEAM code. (b) Percentage depth dose for the $5 \times 5 \text{ cm}^2$ field (beam X25 MV).**

LE RÔLE DES SIMULATIONS NUMÉRIQUES MOTE CARLO

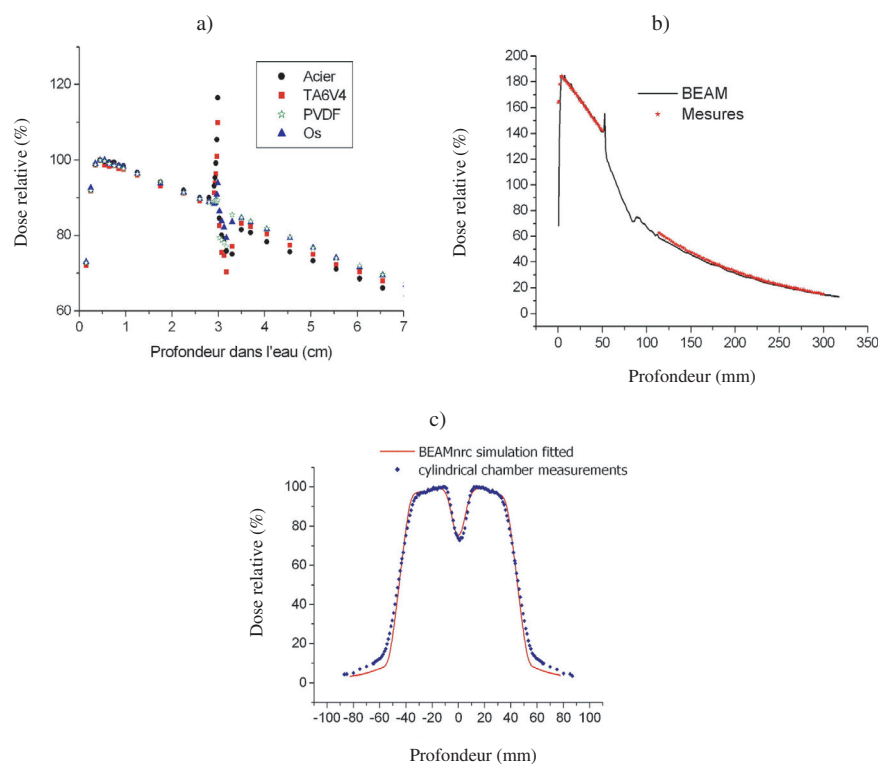


Figure 9 – (a) Rendement en profondeur calculé avec des pas de 200 μm à l'interface tissu-hétérogénéité.
 (b) Comparaison théorique et expérimentale du rendement en profondeur avec la prothèse.
 (c) Comparaison de résultats théoriques et expérimentaux des profils de dose derrière la prothèse.
 (a) Percentage depth dose calculated with 200 μm step at the interface tissue-heterogeneity.
 (b) Theoretical and experimental comparison of percentage depth dose with prosthesis.
 (c) Theoretical and experimental comparison dose profile behind the prosthesis.

De plus, depuis deux ans, des simulations numériques appliquées à la radiothérapie externe ont entraîné l'équipe vers une collaboration très étroite avec l'équipe informatique AND/LIFC FRE CNRS de Belfort. L'objectif essentiel de ces rapprochements est la volonté de rendre utilisable les techniques Monte Carlo à l'échelle clinique grâce à une étude novatrice basée sur des réseaux neuronaux artificiels (Mathieu *et al.*, 2005, 2003 ; Sauguet *et al.*, 2005).

Afin de maîtriser et d'optimiser la distribution des doses délivrées au patient, une planification dosimétrique doit être effectuée au préalable. Pour déterminer la cartographie des doses, la routine thérapeutique est, dans ce cas, confrontée à la

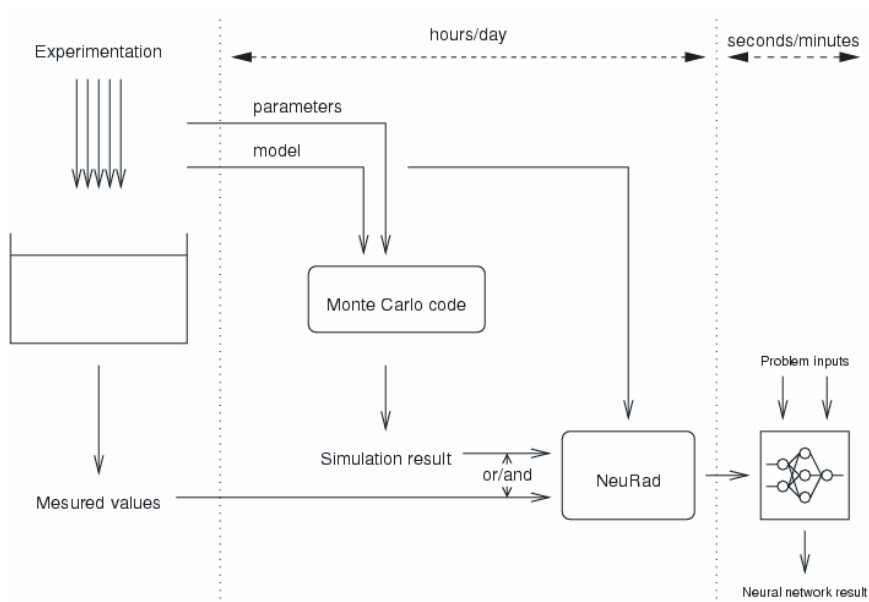


Figure 10 – *Principe de l'utilisation combinée des méthodes de Monte Carlo et des méthodes des réseaux neuronaux artificiels en radiothérapie externe.*

Principle of the use combined with the Monte-Carlo methods and the artificial neural network in external radiotherapy.

recherche du compromis entre la précision et la rapidité d'obtention de cette information. Les techniques fondées sur les méthodes analytiques ou sur des bases de données préalablement établies ont le mérite d'être rapides, mais peu souples. Leur précision n'est assurée que dans les cas directement prévus. Dans cette optique, l'utilisation des méthodes telles que celles de Monte Carlo apportent souplesse et précision. Cependant, malgré tous les efforts fournis aussi bien sur le plan de l'optimisation des méthodes que sur le plan de l'évolution informatique (puissance de calcul), elles se heurtent au problème du temps de calcul. Les réseaux de neurones artificiels (RNA) semblent donc être une troisième voie qui combine des données dosimétriques existantes aussi bien expérimentales que numériques. Ces réseaux sont souvent utilisés pour des problèmes de classification et peuvent aussi être employés pour des problèmes d'approximation de fonction (Fig. 10).

5. Conclusion

Cette contribution ne représente pas uniquement le bilan des activités de l'équipe IRMA/CREST depuis son adhésion aux LARD. Elle apporte aussi la preuve que,

non seulement les simulations numériques, basées essentiellement sur les méthodes de Monte Carlo, sont devenues incontournables dans beaucoup de domaines liés à la physique nucléaire appliquée, mais aussi qu'elles peuvent être la source de nombreuses collaborations inter-équipes. Dans ce contexte, le rôle des associations scientifiques à « taille humaine » (LARD, FIRAM, etc.) se montre particulièrement important car il renforce les liens préexistants et facilite la naissance de petites équipes de recherche (voir certaines références bibliographiques communes citées).

Le poids des simulations numériques devrait encore croître dans les années à venir, car quel que soit le domaine d'application, la recherche de la précision, le développement des nanobiotechnologies, les techniques thérapeutiques et diagnostiques ou les exigences croissantes dans tous les secteurs de la radioprotection reposent en grande partie sur la maîtrise théorique des phénomènes étudiés.

Remerciements. *Les auteurs remercient pour leurs collaborations franches, sincères et efficaces l'ensemble des équipes formant les LARD, en particulier celles de J.L. Decossas et J.C. Vareille, D. Paul, F. Spurný, J. Barthe, M. Ricard avec une pensée particulière pour A. Chambaudet disparu en 2002 ainsi que le comité local de la Ligue Contre le Cancer présidé par Dr. A. Monnier et la Communauté d'agglomération du pays de Montbéliard pour leur soutien permanent à leurs activités de recherche.*

RÉFÉRENCES

- Angelov I., Duverger E., Makovicka L., Mishev A., Stamenov J. (2000) Study of the Cerenkov effect, *Balkan Phys. Lett. BPU* **4**, 87-93.
- Bielajew A.F., Rogers D.W.O. (1987) PRESTA: the parameter reduced electron step algorithm for electron Monte Carlo transport, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B* **18**, 165-181.
- Buffard E., Gschwind R., Makovicka L., Martin E., Meunier C., David C. (2005) Study of the impact of artificial articulations on the dose distribution under medical irradiation, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B* **229**, 78-84.
- Briestmeister J. (1997) editor, *MCNP*, Version 4B, Los Alamos Nat. Lab., NM.
- Duverger E., Isabey R., Huguet M., Makovicka L. (1997) Quelques remarques pratiques pour l'utilisation de EGS4, *Radioprotection* **32**, 229-235.
- Ford R.L., Nelson W.R. (1978) The EGS code system : Computer programs for the Monte Carlo simulation of electromagnetic cascade showers, Slac-r-210, Stanford Linear Accelerator Center.
- Guillerminet C. (2003) Utilisation de code de type Monte Carlo pour déterminer la fluence en énergie des particules diffusées issues de l'accélérateur d'électrons à usage médical. Contribution à la dosimétrie 3D dans les milieux hétérogènes, Thèse de l'université de Franche-Comté.
- Guillerminet C., Duverger E., Gschwind R., Makovicka L., Monnier A., David C., Hamon F. (2001) Theoretical and experimental study of spectral distortions at the output of an accelerator to medical use, *Radiat. Phys. Chem.* **61**, 611-613.

- Guillerminet C., Gschwind R., Makovicka L., Novotny J., Spevacek V., Cechak T. (2003) Determination of 3D dose distribution by PAG and Monte-Carlo simulations, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B* **207**, 124-130.
- Guillerminet C., Gschwind R., Makovicka L., Spevacek V., Soukup M., Novotny J. (2005) Comparative study of PAG and thermoluminescent dosimeters used in external radiotherapy, *Radiat. Meas.* **39**, 39-42.
- Isabey R. (1997) Étude théorique et expérimentale des interactions électroniques et photoniques dans différents types de capteurs. Optimisation des systèmes, Thèse de l'université de Franche-Comté.
- Isabey R., Duverger E., Makovicka L., Barrau C., Nexon F., Barelaud B. (1995a) Étude par simulation MC des variations de bruit gamma d'un détecteur électronique de neutrons en présence du fantôme PMMA, 34^e Congrès de SFPH, 1-3 juin 1995, Strasbourg.
- Isabey R., Duverger E., Makovicka L., Klein D., Chambaudet A. (1995b) Modelling of gamma Germanium detector response in different environmental conditions, *Acta Polytechnica* **35**, 88-92.
- Isabey R., Guelev M., Buchakliev Z., Duverger E., Makovicka L., Klein D., Chambaudet A. (1997) The use of the EGS4-PRESTA code for the thermoluminescent dosimeter response simulation, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B* **132**, 114-118.
- Isabey R., Duverger E., Makovicka L., Barelaud B., Decossas J.L., Vareille J.C. (1998) Modelling of the gamma background in the neutron detector, *Acta Polytechnica* **38**, 147-149.
- Isabey R., Duverger E., Taupiac-Darraud C., Binsangou V., Makovicka L., Decossas J.L., Vareille J.C. (1999) Theoretical and experimental study of the CR39 behavior under the electron beam, *Radiat. Meas.* **31**, 85-88.
- Isabey-Gschwind R., Makovicka L., Klein D., Duverger E., Voytchev M. (2001) Development of thermoluminescent probe for natural radiation measurements in soil, *Radiat. Phys. Chem.* **61**, 669-672.
- Kawrakow I., Rogers D.W.O. (2001) The EGSnrc code system: Monte Carlo simulation of electron and photon transport. PIRS-701, NRCC
- Makovicka L., Isabey R., Duverger E., Klein D. (1996) Étude théorique de la déformation des mesures spectrométriques gamma à l'intérieur d'un laboratoire mobile. Dans : *13^{es} journées des LARD*, 24-25 octobre 1996, Grenoble.
- Makovicka L., Barelaud B., Duverger E., Vareille J.C., Gschwind R., Decossas J.L. (2001a) Développement d'un dosimètre neutronique, individuel, à lecture directe, fondé sur un capteur « sandwich » et utilisant la méthode de coïncidence. Dans : *Congrès national de radioprotection SFRP*, 19-21 juin 2001, Tours.
- Makovicka L., Mishev A., Gschwind R., Stamenov J. (2001b) Contribution au développement du télescope muonique de B.A.S. *18^{es} journées des LARD*, 18-19 oct. 2001, Barcelone.
- Mathieu R., Contassot-Vivier S., Guillerminet C., Makovicka L., Gschwind R., Bahi J. (2003) Prospective de la planification des traitements radiothérapeutiques basée sur les réseaux de neurones. Dans : *Journées SFRP SFPM-FIRAM « Codes de calcul en radioprotection, radiophysique et dosimétrie »*, 2-3 octobre 2003, Sochaux.
- Mathieu R., Martin E., Makovicka L., Gschwind R., Contassot-Vivier S., Bahi J. (2005) Calculations of dose distributions using a neural network model, *Phys. Med. Biol.* **50**, 1019-1028.
- Meunier C., Guillerminet C., Gschwind R., Makovicka L., Munnik F., Germann E., Michailov S. (2003a) Modifications of the thin carbon coats under ionising radiation, (LUMDETR2003). In: *5th European Conference on Luminescent Detectors and Transformers of Ionizing Radiation*, September 1-5, 2003, Prague.

LE RÔLE DES SIMULATIONS NUMÉRIQUES MOTE CARLO

- Meunier C., Gschwind R., Buffard E., Makovicka L., Munnik F., Germann E., Michailov S. (2003b) Carbon coatings for implants : Behaviour under sterilising radiation. In: *First International Meeting on Applied Physics APHYS2003*, 13-18th oct. 2003, Badajoz-Spain.
- Mishev A., Angelov I., Duverger E., Gschwind R., Makovicka L., Stamenov J. (2001) Experimental study and Monte Carlo modeling of the Cerenkov effect, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **474**, 101-107.
- Mishev A. (2002) Études théoriques et expérimentales de l'effet Tcherenkov dans différents milieux pour une large bande énergétique. Application en détection des rayonnements cosmiques, Thèse de l'université de Franche-Comté.
- Mishev A., Angelov I., Madroviev S.C., Stamenov J., Gschwind R., Makovicka L. (2003) Contribution to the development of new techniques for cosmic rays detection, *Radioprotection* **38**, 147-165.
- Paul D., Makovicka L., Ricard M. (2005) Codes de calculs en radio physique, radioprotection et dosimétrie, *Radioprotection* **40**, 73-88.
- Ravat B., Gschwind R., Grivet M., Duverger E., Chambaudet A., Makovicka L. (2000) Electron irradiation of polyurethane: Some FTIR results and a comparison with a EGS4 simulation, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B* **160**, 499-504.
- Ravat B., Grivet M., Gschwind R., Duverger E., Chambaudet A., Makovicka L. (2001) Energetic distribution of the electrons which comes from a 200 keV beam into polyurethane layers: EGS4 calculation and FTIR analysis, *Rad. Phys. Chem.* **61**, 571-573.
- Rogers D.W.O., Faddegon B.A., Ding G.X., Ma C.M. (1995) BEAM: A Monte-Carlo code to simulate radiotherapy treatment units, *Med. Phys.* **22**, 503-524.
- Sauget M., Martin E., Gschwind R., Makovicka L., Contassot-Vivier S., Bahi J. (2005) Développement d'un code de calcul dosimétrique basé sur les RNA. Dans : *44^{es} Journées scientifiques de la Société française de physique médicale*, 1-3 juin 2005, Avignon.
- Spurný F., Gschwind R., Makovicka L., Dacev T. (2003) Response of a semiconductor photon spectrometer - comparison between experimental data and MC calculations, *The Safety of Nuclear Energy (B.J.E.)* **11**, 114-117.
- Taupiac-Darraud C., Binsangou V., Isabey-Gschwind R., Duverger E., Decossas J.L., Makovicka L., Vareille J.C. (2000) Topographical modifications in PADC polymer under electron beam irradiation, *Polymer* **41**, 6295-6299.
- Ziegler J.F., Biersack J.P., Littmark U. (1985) *The Stopping and Range of Ions in Solids*. Pergamon Press, New York.