

# **SIMULATION MONTE CARLO EN MEDECINE NUCLEAIRE, RADIOTHERAPIE-CURIETHERAPIE AVEC UNE PLATEFORME DE SIMULATION GATE BASEE SUR GEANT4**

**Berger L.<sup>1</sup>, Breton V.<sup>1</sup>, Donnarieix D.<sup>1+2</sup>, Elbitar Z.<sup>1</sup>, Gisclon D.<sup>1</sup>, Lazaro D.<sup>1</sup>, Maigne L.<sup>1</sup>,  
Reuillon R.<sup>1</sup>, Thiam C.O.<sup>1</sup>**

1 : Laboratoire de Physique Corpusculaire, 24 avenue des Landais, 63177 Aubière cedex

2 : Unité de physique médicale, département de radiothérapie-curiéthérapie du Centre Jean Perrin, 63000 Clermont-Ferrand.

## **Introduction :**

GATE (Geant4 Application for Tomographic Emission) est une plateforme de simulation générique basée sur le code GEANT4 et élaborée pour répondre dans un premier temps aux besoins spécifiques de la communauté scientifique dans le domaine des applications SPECT/PET. Son champ d'application s'étend aussi à des applications en radiothérapie-curiéthérapie.

Avec le Laboratoire de Physique Corpusculaire (équipe Plate Forme de Calcul pour les Sciences du Vivant [1]), d'autres instituts de recherche sont intégrés dans le développement et la validation de cette plateforme de simulation au sein de la collaboration OpenGATE [2].

GATE complète les grandes potentialités offertes par le code Geant4 grâce à des modules spécifiques pour la médecine nucléaire : simulation du temps et des processus dépendants du temps tels que les mouvements des détecteurs et de la source radioactive, décroissance radioactive de noyaux, acquisitions de données en dynamique. GATE permet également la simulation de distributions d'émission complexes de sources radioactives et une description facile des géométries.

Dans un premier temps seront exposées les caractéristiques de la plateforme de simulation GATE et dans un deuxième temps nous présenterons les applications développées au sein de l'équipe dans le domaine de la physique médicale. Un des enjeux liés à l'utilisation des codes Monte-Carlo est le temps nécessaire à l'exécution des calculs pour leur utilisation quotidienne en routine pour le diagnostic et les traitements des patients. Nous présenterons dans un troisième temps une étude sur la réduction des temps de calcul par déploiement des simulations sur des processeurs distribués géographiquement dans un environnement de grille informatique.

## **Matériel et méthodes :**

GATE (Geant4 Application for Tomographic Emission) est une plate-forme de simulation Monte-Carlo générique dédiée à la simulation d'applications en SPECT et PET. Cette plate-forme repose sur le logiciel de simulation Monte-Carlo GEANT4. GEANT4 est une 'boîte à outils' disponible dans le domaine public, et téléchargeable gratuitement, destinée à la simulation du transport des particules dans la matière. GEANT4 a été développé, sous l'égide du CERN, par plus d'une centaine de physiciens et d'informaticiens impliqués dans des expériences partout dans le monde, pour faire face au besoin de la physique des particules et de la physique nucléaire, mais aussi d'autres domaines tels que les sciences cosmologiques et spatiales, ou la médecine nucléaire.

GATE se compose de modules spécifiques développés afin de faciliter l'utilisation de Geant4 pour des simulations en imagerie SPECT et PET. Un développement supplémentaire permet non plus de coder en C++ mais d'élaborer la totalité de sa simulation à l'aide de scripts de commande. L'utilisateur peut spécifier autant de géométries de sources qu'il désire, ces sources sont chacune définies par un radio-isotope ou un type de particules et une activité initiale. La source radioactive peut se situer à n'importe quel endroit de la géométrie, son activité est uniformément répartie à l'intérieur d'un volume spécifié par l'utilisateur. L'utilisateur peut choisir les processus physiques, les coupures en parcours et en énergies pour les photons et les électrons.

GATE peut modéliser des processus physiques dépendants du temps. L'utilisateur fixe le temps de son acquisition et peut subdiviser ce temps en plusieurs fenêtres. Le nombre d'événements générés décroît alors suivant une loi exponentielle dépendant de la cinétique de décroissance de chaque isotope.

## Divers domaines d'applications médicales ont été étudiés avec GATE :

### En médecine nucléaire :

En imagerie scintigraphique, les simulations Monte Carlo sont utilisées pour modéliser des systèmes d'imagerie, développer et estimer les algorithmes de reconstruction tomographique ainsi que les méthodes de correction pour améliorer la quantification des images.

C'est dans cette optique qu'une gamma caméra AXIS de Philips Marconi a été simulée. Les deux têtes de la caméra ont été reproduites ainsi qu'une source linéaire de  $^{99m}\text{Tc}$  à différentes distances du collimateur. L'étude a consisté à étudier le spectre en énergie du  $^{99m}\text{Tc}$  obtenu par simulation et à le comparer avec le spectre expérimental (Fig1). Dans un deuxième temps une étude de la résolution spatiale à différentes distances source-collimateur a été faite (Fig 2).

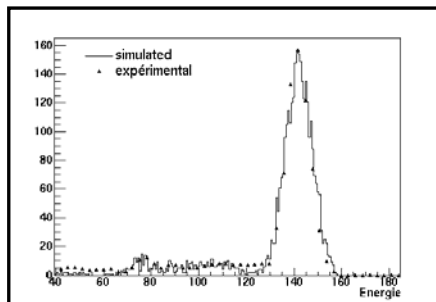


Fig. 1 : Spectres en énergie

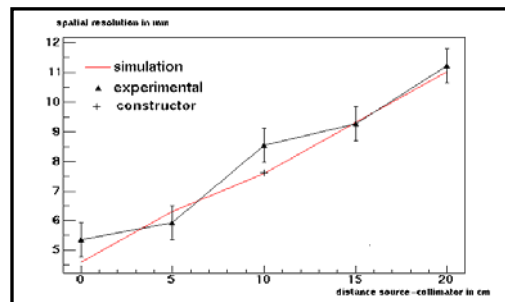


Fig. 2 : Résolution spatiale

### En curiethérapie :

Deux types de simulations ont été élaborées, l'une utilisant une source radioactive d' $^{192}\text{Ir}$  (émettrice gammas) dans la simulation d'un traitement de curiethérapie Haut Débit de Dose et une autre utilisant une source radioactive d' $^{106}\text{Ru}$ - $^{106}\text{Rh}$  (émettrice bêta-) dans la simulation d'un traitement de curiethérapie oculaire utilisant des applicateurs ophtalmiques concaves.

#### Simulation d'un traitement de curiethérapie Haut Débit de Dose :

Les travaux effectués sur le traitement de curiethérapie HDD fait partie d'une inter-comparaison européenne de l'**ENEA-QUADOS** (Bologne 14-16 Juillet 2003) entre différents codes de simulations Monte-Carlo, notamment MCNP4C, MCNP5, MCNPX, BRAND et Penelope.

La source d' $^{192}\text{Ir}$  simulée est composée d'un noyau radioactif cylindrique de pur iridium 192 (densité  $22.42\text{g.cm}^{-3}$ ). Le diamètre maximal du noyau est  $0.065\text{cm}$ . La capsule qui l'entoure, en acier inoxydable, a un diamètre maximal de  $0.09\text{cm}$  et une longueur de  $0.45\text{cm}$ . L'autre extrémité de la capsule est soudée à un câble en acier de diamètre  $0.07\text{cm}$  et de densité  $4.81\text{g.cm}^{-3}$ .

Les 33 principales raies gamma émises par la source d' $^{192}\text{Ir}$  ont été reproduites.

Dans un premier temps, l'étude a consisté à calculer les fonctions d'anisotropie en des points  $(r,\theta)$ ,  $r$  allant de 1 à 5 cm et  $\theta$  allant de 0 à  $180^\circ$  (Fig 3).

Dans un deuxième temps, l'étude du dépôt de dose lors d'un traitement hypothétique de curiethérapie HDD est effectuée (Fig 4). Les résultats de GATE sont en très bon accord avec ceux obtenus avec les autres codes.

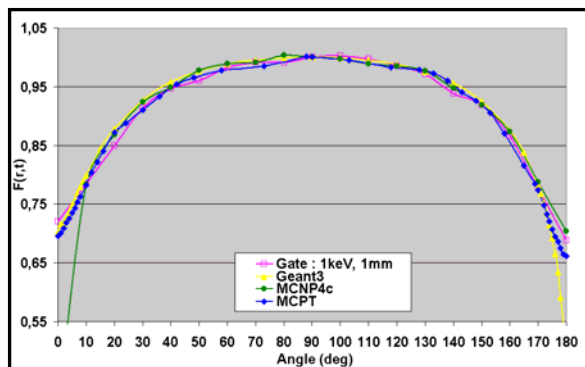


Fig. 3 : Intercomparaison des facteurs d'anisotropie à  $r=5\text{cm}$

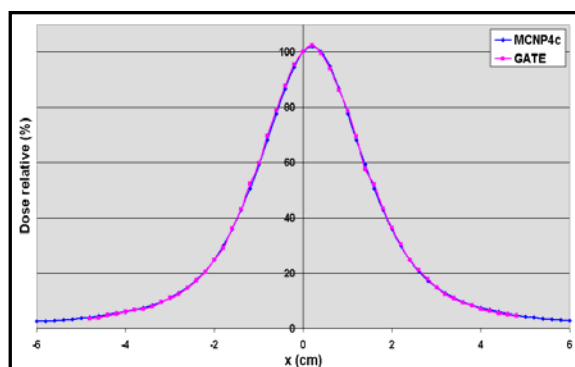


Fig. 4 : Comparaison des distributions de dose GATE/MCNP4C

### Simulations en curiethérapie oculaire :

Les travaux en curiethérapie oculaire ont permis l'étude sur de faibles distances de la dose déposée par les électrons d'énergie moyenne 1,5 MeV. Le gradient de dose très élevé sur de courtes distances rend les mesures expérimentales très difficiles à réaliser.

Deux types d'applicateurs ont été simulés (type CCA et CCB, fabricant Bebig), ces applicateurs sont en argent (99%), à l'intérieur desquels est réparti uniformément une fine couche de  $^{106}\text{Rh}$ . L'œil a été simulé par une sphère d'eau de 24 mm de diamètre. Le spectre d'émission bêta- du  $^{106}\text{Rh}$  a entièrement été pris en compte.

La simulation Monte Carlo permet alors une étude précise du dépôt de dose dans l'eau en particulier dans les premiers mm sur l'axe central de l'œil, cf : Fig 5, Fig 6.

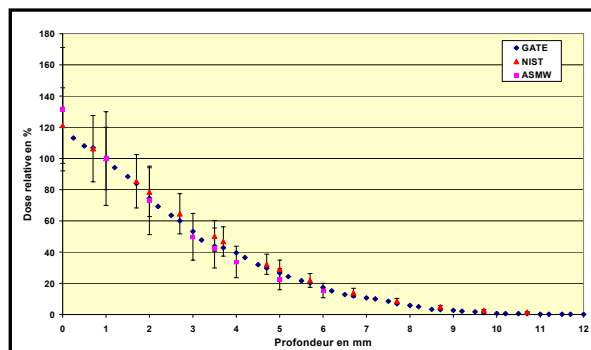


Fig. 5 : Applicateur ophtalmique de type CCA

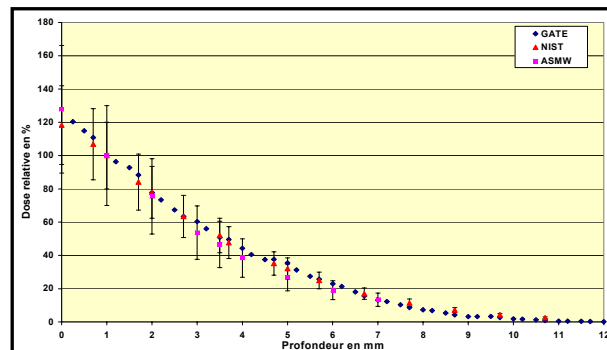


Fig. 6 : Applicateur ophtalmique de type CCB

### En radiothérapie :

Une simulation complète d'un accélérateur Elekta en mode électrons est en cours de réalisation à partir des données du constructeur. Dix millions d'électrons monoénergétiques de 6 MeV ont été générés suivant un angle solide déterminé. Une étude de la dose déposée suivant l'axe central du fantôme d'eau ainsi que du profil de dose pour un champ d'irradiation de 10 X 10 cm a été effectuée. Les premiers résultats sont présentés sur les figures 7 et 8.

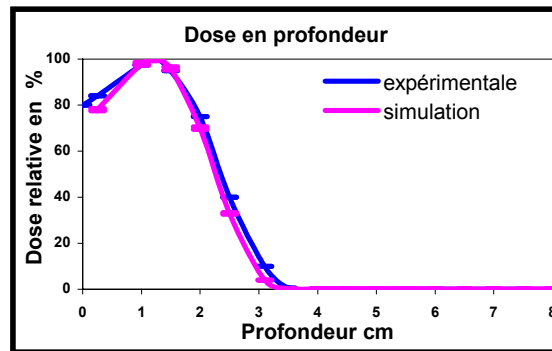
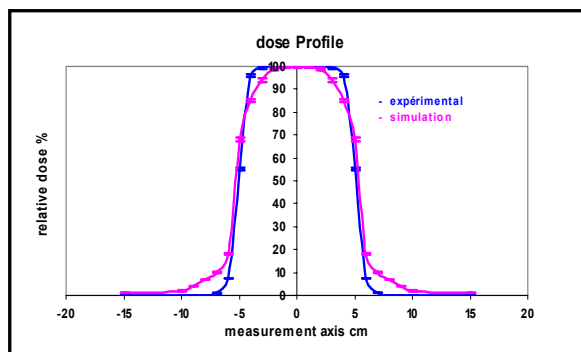


Fig. 8 : Rendement en profondeur obtenu avec GATE et par mesures expérimentales

**Réduction des temps de calcul par déploiement des simulations sur une grille informatique:**

Une grille est constituée d'ordinateurs, de systèmes de stockage et d'acquisition de données connectés par un réseau à haut débit. Un système d'exploitation gère l'ensemble des ressources de la grille et permettra à terme un accès facile et transparent à des données hétérogènes ainsi que leur traitement.

Une stratégie pour réduire significativement les temps de calcul est de découper en une multitude de petites simulations envoyées sur des processeurs distribués géographiquement.

Des tests de temps d'exécution des simulations ont été effectués en utilisant les machines disponibles au centre de calcul de l'IN2P3 à Lyon (ferme de 200 biprocesseurs PIII 750 MHz, 1GHz, 1,4 GHz) afin de démontrer l'efficacité d'une telle stratégie.

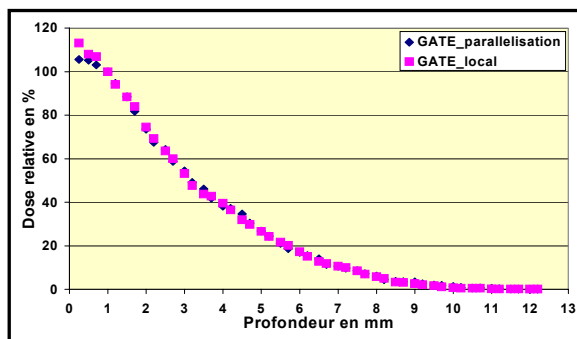
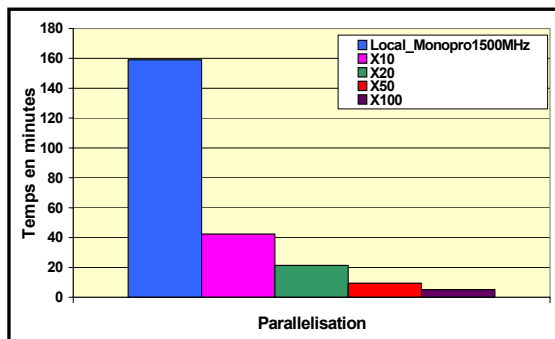


Fig. 10 : Comparaison des résultats physiques sur une machine locale et après parallélisation

**Conclusion :**

La totalité des simulations effectuées avec le logiciel GATE donne des résultats très concluants. Sa facilité d'utilisation accompagnée de la puissance du code de simulation GEANT4 en fait un outil convivial et performant.

Les travaux effectués de manière à paralléliser le code de simulation réduisent considérablement le temps de calcul pour une simulation donnée.

Une version publique de ce logiciel est prévue pour Mai 2004.

**Références :**

- [1] : <http://clrpcsv.in2p3.fr>
- [2] : OpenGATE collaboration  
<http://www-iphe.unil.ch/~PET/research/gate/>