

THÈSE DE DOCTORAT DE L'ÉTABLISSEMENT UNIVERSITÉ BOURGOGNE FRANCHE-COMTÉ

PRÉPARÉE À L'UNIVERSITÉ DE BOURGOGNE

École doctorale n°37

Sciences Pour l'Ingénieur et Microtechniques

Doctorat d'Instrumentation et informatique de l'image

par

ANTOINE MERLET

**Monte Carlo simulation of the GE Discovery MI 4-Ring PET/CT scanner:
from validation of NEMA performance to reconstruction of simulated data**

Thèse présentée et soutenue à XXX, le XXX

Composition du Jury :

VISVIKIS DIMITRIS	Directeur de recherche INSERM (LATIM, Brest)	Rapporteur
JAN SÉBASTIEN	Directeur de recherche CEA (SHFJ, Orsay)	Rapporteur
LJUNGBERG MICHAEL	Professeur (Université de Lund, Lund)	Examineur
COCHET ALEXANDRE	PU-PH (Université de Bourgogne, Dijon)	Directeur de thèse
VRIGNEAUD JEAN-MARC	Physicien médical, HDR (CGFL, Dijon)	Codirecteur de thèse
PRESLES BENOÎT	MCU (Université de Bourgogne, Dijon)	Encadrant de thèse
PASQUIER HUGO	Chef de projet Recherche (GEHC, Buc)	Invité
SU KUAN-HAO	Ingénieur Algorithme (GEHC, Waukesha)	Invité

Title: Monte Carlo simulation of the GE Discovery MI 4-Ring PET/CT scanner: from validation of NEMA performance to reconstruction of simulated data

Keywords: PET, GATE, NEMA, SiPM, TOF

Abstract:

Positron emission tomography (PET) / computed tomography (CT) is a well-established molecular imaging technique for cancer diagnosis and treatment response monitoring. Its use in routine clinical practice has increased steadily in recent years, and its performance has continued to improve over time. Recent developments such as time-of-flight (TOF), point-spread function modelling, digital PET detectors (SiPMs), and long axial field-of-view have further enhanced the imaging capabilities of the technique. The use of Monte Carlo simulations in PET has long been recognised as a valuable tool to study the impact of different parameters on the quality of PET images (acquisition, reconstruction, corrections, etc.) with more flexibility than could be achieved with a physical phantom, while requiring fewer resources and less expense. In this thesis, our aim was to develop a complete GATE (Monte Carlo simulator) model of the SiPM-based and TOF-capable 4-ring General Electric Discovery MI (DMI4) PET/CT scanner.

The performance characteristics of the DMI4 scanner were evaluated over several years in accordance with the latest NEMA standard, and compared with results found in the literature for this scanner. Specifically, the DMI4 was characterised in terms of sensitivity, count losses and scatter fraction, spatial resolution, and image quality. The energy and temporal resolution of the DMI were also evaluated and compared with those of the literature, but outside

the scope of the NEMA standard. Using the data obtained from the performance evaluations (raw data and expected results), we developed and validated our own NEMA analysis software (NEAT), which also included methods to organise the experimental data into sinograms. With this software, we could then evaluate the performance of our GATE model and adequately compare them to that of our DMI4 scanner.

We have reported the methodology used to design, optimise, and validate our GATE model of the DMI4 scanner. We have shown that our model has a performance very similar to that of our DMI4 scanner in terms of sensitivity, count rates, and spatial resolution. To study the image quality of the reconstructed images, we developed a reconstruction framework based on the clinical reconstruction tools provided with the DMI4 scanner (algorithm and correction). We have shown that the joint use of this framework and our GATE model could produce realistic PET images when performing clinical-like TOF-OSEM reconstructions. Finally, we have detailed the difficulties associated with the evaluation of the NEMA TOF resolution of the DMI4 (first generation), which only records compressed TOF information, thus hindering the analysis. We have shown that using our analysis software, it is possible to evaluate the NEMA TOF resolution of both the DMI4 and its GATE model.

Titre : Simulation Monte Carlo du scanner TEP/TDM GE Discovery MI 4 anneaux : de la validation des performances NEMA à la reconstruction des données simulées

Mots-clés : TEP, GATE, NEMA, SiPM, TOF

Résumé :

La tomographie par émission de positons (TEP) / tomomodensitométrie (TDM) est une technique d'imagerie moléculaire bien établie pour le diagnostic du cancer et le suivi de la réponse au traitement. Son utilisation dans la pratique clinique de routine a augmenté régulièrement ces dernières années et ses performances ont continué à s'améliorer au fil du temps. Des développements récents tels que le temps de vol (TOF), la modélisation de la fonction de dispersion ponctuelle, les détecteurs TEP numériques (SiPM) et le long champ de vue axial ont amélioré les capacités de cette technique d'imagerie. L'utilisation de simulations Monte Carlo en TEP est reconnue depuis longtemps comme un outil précieux pour étudier l'impact de différents paramètres (acquisition, reconstruction, corrections, etc.) sur la qualité des images TEP. De plus, un tel environnement de simulation offre plus de flexibilité que ce qui pourrait être obtenu avec un fantôme physique, tout en nécessitant moins de ressources et moins de dépenses. Dans cette thèse, notre objectif était de développer un modèle GATE (simulateur Monte Carlo) complet du scanner TEP/TDM General Electric Discovery MI à 4 anneaux (DMI4), qui est un TEP numérique capable d'utiliser l'information TOF.

Les caractéristiques de performance du scanner DMI4 ont été évaluées sur plusieurs années conformément au dernier rapport NEMA et comparées à celle reportées dans la littérature pour ce même système. Plus précisément, le DMI4 a été caractérisé en termes de sensibilité, de pertes de taux de comptage et de fraction de diffusé, de résolution spatiale, et de qualité d'image. L'énergie

et la résolution temporelle du DMI4 ont également été évaluées et comparées à celles de la littérature, mais en dehors du champ d'application du rapport NEMA. En utilisant les données obtenues lors des évaluations de performance (données brutes et résultats attendus), nous avons développé et validé notre propre logiciel d'analyse NEMA (NEAT), qui contient également des méthodes pour organiser les données expérimentales en sinogrammes. Grâce à ce logiciel, nous avons pu évaluer les performances de notre modèle GATE et les comparer de manière adéquate à celles de notre TEP/TDM.

Nous avons ensuite présenté la méthodologie utilisée pour concevoir, optimiser et valider notre modèle GATE du DMI4. Nous avons montré que notre modèle avait des performances très proches de celles du DMI4 en termes de sensibilité, de taux de comptage et de résolution spatiale. Pour étudier la qualité des images reconstruites, nous avons développé un logiciel basé sur les outils de reconstruction clinique fournis avec le scanner DMI4 (algorithme et corrections). Nous avons montré que ce logiciel, combiné à notre modèle GATE, était capable de produire des images TEP réalistes pour des reconstructions TOF-OSEM de type clinique. Enfin, nous avons détaillé les difficultés liées à l'évaluation de la résolution TOF de notre système selon NEMA. En effet, les données TOF du DMI4 (première génération) sont compressées et ne peuvent pas être utilisées telles quelles pour l'analyse NEMA. Nous avons développé une méthode permettant de le faire et nous avons évalué la résolution NEMA TOF du DMI4 et de son modèle GATE.