

Développement d'un solveur 3D des équations du transport de Boltzmann pour la dose en radiothérapie : vers une précision ajustable et intégrée au format DICOM

Mots-clés : radiothérapie, calcul de dose, transport de Boltzmann, Monte-Carlo, DICOM, modélisation numérique, python / C++

Candidat : étudiant(e) en Master 2, école d'ingénieur

Encadrement académique : Dr. Dimitri Reynard, Christophe Mazzara, Institut Daniel Hollard

Contact: christophe.mazzara@avec.fr , dimitri.reynard@avec.fr

Contexte et description générale :

En radiothérapie, les algorithmes de calcul de dose constituent le cœur de la planification des traitements. Leur précision conditionne directement la qualité de la délivrance et la sécurité du patient.

Les systèmes cliniques (AAA, AcurosXB, Collapsed Cone, etc.) implémentent des compromis temps-précision afin d'obtenir des résultats utilisables en pratique quotidienne. Pour le physicien médical, la dose calculée par ces algorithmes représente le "référentiel de vérité", bien qu'elle reste une approximation.

En réalité, un même plan irradiant le même patient donnera des distributions de dose 3D différentes selon l'algorithme employé. De plus, la précision numérique (nombre de directions, taille des voxels, discrétisation en énergie, etc.) est rarement accessible à l'utilisateur.

Le gold standard reste la méthode Monte-Carlo (Gate, Penelope, FLUKA, MCNP, EGSnrc...), offrant une précision de niveau recherche, mais à un coût computationnel prohibitif et avec une intégration DICOM souvent laborieuse.

L'alternative consiste à résoudre directement les équations stationnaires du transport de Boltzmann pour les photons et les électrons. Cette approche déterministe permet un contrôle fin de la précision par la discrétisation de l'espace des phases (énergie, position, direction).

Objectifs du stage :

Le but de ce stage est de développer un solveur 3D des équations du transport de Boltzmann appliqué à la radiothérapie, intégrant nativement les formats DICOM et permettant un ajustement explicite du compromis entre précision et temps de calcul.

Le projet s'articulera autour des axes suivants:

- 1- Modélisation mathématique : formulation discrète des équations stationnaires de Boltzmann (spatial, angulaire, énergétique).
- 2- Implémentation du solveur : sur différents types de maillages (grille régulière, octree adaptatif, grille tessellée / maillage tétraédrique).
- 3- Intégration DICOM native : lecture automatique des CT, RTPlan et RTStruct pour créer le domaine de calcul à partir de données réelles.
- 4- Optimisation du code : conception d'une architecture modulaire et paramétrable permettant de régler la précision sans modifier le code utilisateur.
- 5- Validation : comparaison des résultats avec un code Monte-Carlo de référence (Gate ou EGSnrc) sur des cas test simples.

Le but final est de concevoir un moteur de calcul "recherche-clinique", combinant rigueur scientifique, interopérabilité DICOM et simplicité d'utilisation pour le physicien médical.

Compétences développées au cours du stage :

- Physique du transport de particules (photons, électrons) et équations de Boltzmann.
- Simulation numérique et discrétisation d'équations intégrales-différentielles.
- Programmation scientifique avancée (Python, C++) et gestion de maillages 3D.
- Lecture et exploitation de données DICOM RT (CT, RTPlan, RTDose, RTStruct). Maintenance prédictive et interprétation physique des signaux de dérive.
- Comparaison avec Monte-Carlo et analyse de convergence / performance.

Perspectives :

Ce projet a vocation à poser les bases d'un solveur open-source à précision ajustable, comblant le vide entre les algorithmes cliniques opaques et les codes de recherche lourds. Il s'inscrit dans une perspective de développement d'un moteur de calcul opensource pour la recherche translationnelle en radiothérapie.