

Simulations MC pour l'amélioration de la délivrance de la dose en hadronthérapie

Étienne Testa (IP2I) — Jean M Létang (CREATIS)

Objectifs et défis scientifiques



Dose biologique :

- Disposer d'outils de simulation Monte Carlo de calcul de la dose biologique
- Actuellement : BioDose Actor (dose biologique “standard”)
- Défis : Vers une modélisation de l'hypoxie

Contrôle en ligne par détection des rayons gamma prompts (PG) :

- Développer des modules de calcul justes et rapides (*VRT*)
- Actuellement : module “vpgTLE” pour les protons (+ neutrons)
- Défis : Étendre aux ions lourds (He, C)

Structure du projet

- Personnes et laboratoires impliqués (IN2P3 et associés) et leur rôle
 - CREATIS: J. M. Létang
 - IP2I: É. Testa, M. Beuve
 - LPC Clermont: L. Maigne
 - LPSC : S. Marcatili
- Cadre récent de ces développements
 - Thèses du Labex PRIMES (Y. Ali, O. Allegrini), CDD IN2P3 (A. Pereda), Stages de M2 (Labex PRIMES)
- Collaborations nationales et internationales
 - Collaboration GATE
 - Projet TIARA
- Plateformes
 - CAL-Nice
 - CNAO
- Partenaires industriels

Faits marquants 2025/26

- Nouveaux résultats scientifique
 - Portage (partiel) sur GATE 10 du *vpgTLE Actor* (M2 J.-P. Anagonou)
 - Portage sur Gate 10 de l'expérience TIARA (M2 E. Lopez-Miguel)
 - Développement du BioDose Actor dans Gate (*mMKM* et *NanOx*)
- Publications
 - Article PMB sur le *BioDose Actor* (modèles *mMKM* et *NanOx*)
 - Poster SFPM sur portage (partiel) sur GATE 10 du *vpgTLE Actor*

IOP Publishing

Phys. Med. Biol. 71 (2026) 155027

<https://doi.org/10.1088/1361-6560/ae8358>

Physics in Medicine & Biology

IPEM
Institute of Physics and Engineering in Medicine

Check for updates

PAPER

Calculating biological dose distributions in hadrontherapy using GATE: the BioDose actor

Alexis Pereda¹, Thomas Berger², Michaël Beuve³, Hermann Fuchs^{4,5}, Dietmar Georg⁶, Barbara Knäusel^{1,5,6}, Jean Michel Létang⁶, Lydia Maigne^{1,*} and Étienne Testa⁶

¹ Université Clermont Auvergne, CNRS, Laboratoire de Physique de Clermont Auvergne, 63178 Aubière, France
² Université Claude Bernard Lyon 1, CNRS/IN2P3, Institut de Physique des deux Infinis de Lyon, 69100 Villeurbanne, France
³ INSA Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, CNRS, Inserm, CRATIS UMR 5220, U1206, 69373 Lyon, France
⁴ Department of Radiation Oncology, Medical University of Vienna, Vienna, Austria
⁵ MedAustron Ion Therapy Center, Wiener Neustadt, Austria
⁶ Christian Doppler Laboratory for Image and Knowledge Driven Precision Radiation Oncology, Medical University of Vienna, Vienna, Austria

* Author to whom any correspondence should be addressed.

E-mail: lydia.maigne@clermont.in2p3.fr

Keywords: Monte carlo, GATE, biological dose, hadrontherapy, treatment planning

Optimisation of the vpgTLE Estimator for Prompt- γ Emission in Hadrontherapy (p. ¹⁶He, ¹²C)

Content

- Online beam range monitoring in Hadron therapy remains a major clinical challenge
- Prompt gammas (PG), correlated with the Bragg peak, are a promising real-time signal

Need of MC simulations to design detection stages

- Present Gamma Energy Integration (PGEI)
- Present Gamma Time-of-flight Imaging
- Analog MC: run time ($\sim 10^{-3}$ PG/proton step) requires 10^6 - 10^7 primaries: prohibitive computation time

vpgTLE module reduces MC cost via 3 stages

- Stage 0: PG yield stochastic generation per element
- Stage 1: analytical PG source map per CT voxel
- Stage 2: PG propagation to the detector

Limitations

- Stage 0: Gate 9 only: protons only
- ROOT dependency limiting reusability
- PGs: N elements $\Rightarrow N$ separate simulations
- Neutron support: pure Geant4 only, complex physics list
- Stage 1: computationally expensive for large CT volumes

Improvements

- Port Stage 0 to Gate 10
- Remove ROOT dependency
- Generate full PGs in a single simulation
- Extend to secondary neutrons
- Stage 1 acceleration via material loop

vpgTLE MODULE - PRINCIPLE: Track Length Estimator (TLE) replaces stochastic PG emission by a continuous estimator $S(x)$ along the proton track

Analog MC vs vpgTLE Module

Stage 0 (PGs)

- Pre-computation of the PG linear yield $F_{PG}(E)_{PG}$ per element Z (1) [1]
- For each material m , in the CT, $F_{PG}(E)$ derived via the Bragg additivity rule (2) [1]

Stage 1a

- 1a: MC Simulation on patient CT $\rightarrow L(E, x) \rightarrow$ track length of a proton with energy E , in voxel x
- 1b: Combination with PGs $\rightarrow$ Two 4D maps: $S(x, E_0) \rightarrow$ PG energy map, $S(x, E_0) \rightarrow$ PG timing map where E_0 = Prompt gamma energy, t_{PG} = Prompt gamma emission time

Stage 2

- Using $S(x, E_0)$, $S(x, t_{PG})$ on input
- Gain ~ 50 in relative uncertainty vs analog MC [2]

(3) Stage 3 (PGs): Tuning, Improvements & Neutron Extension

Neutron & Neutrons

- New Gate 10 actor without ROOT dependency (OstealysiaLettang)
- Physics list: QGSP_BIC_HP_2017
- Test geometry: oxygen ion, monoenergetic proton/neutron source at 200 MeV
- Bin-by-bin comparison via relative difference $R(x)$ and normalized residuals $R(x)/\sigma_x$, where:

Validation Histograms of proton results

Validation Histograms of neutron results

Multi-element method

- A composite material ALLElements generates the full PGs in a single simulation. Mass fractions w_i ensure equal A_{PG}
- A second simulation uniformizes N_i using $N_{tot}/N_i = \eta_i^{(opt)}$ (optional)

where A_{PG} : mass number, N_{tot} : isotopic interaction, N_i : prompt gamma produced

Stage 3b: Computational Acceleration

Results

Conclusions

- Complete porting of Stage 0 to Gate 10: full PGs generation in a single simulation
- Stage 1b acceleration: ~ 7.4 for head and neck irradiation

Perspectives

- Extend Stage 0 to heavy ions (¹⁶O, ¹²C)
- Adapt Stage 1a and Stage 1b accordingly
- Port Stage 2 to Gate 10

References

[1] El Khatib et al., Monte Carlo simulation of prompt γ -ray emission in proton therapy using a specific track length estimator. Phys. Med. Biol., 60(20) 8067-8086, 2015.
 [2] Halman et al., Accelerated prompt gamma estimation for clinical proton therapy simulations. Phys. Med. Biol., 61(21)7725-7743, 2016.

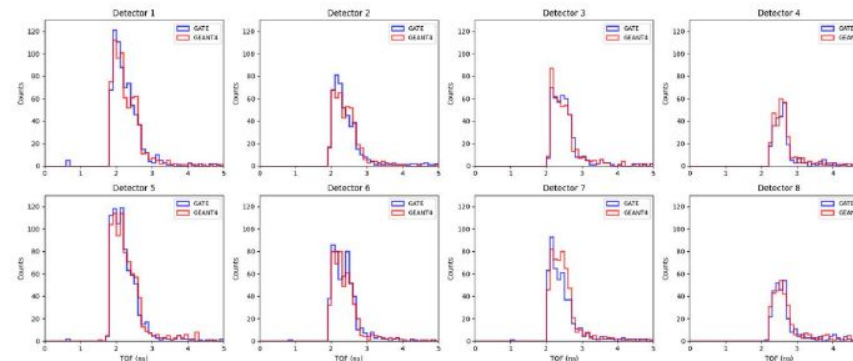
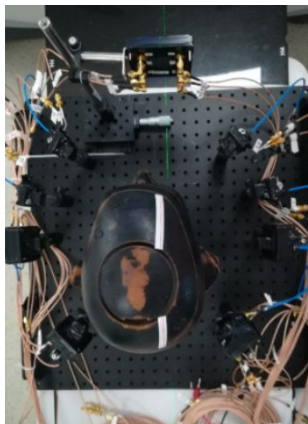
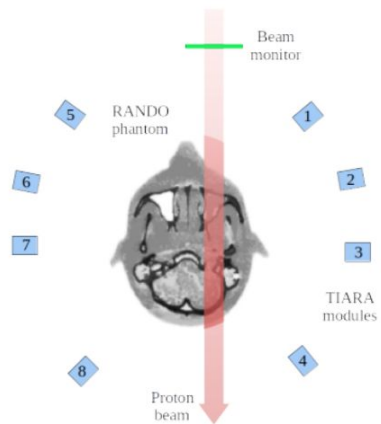
Portage sur Gate 10 de TIARA (M2 E. L-M)

- Motivation

- Utilisation de Gate et de son module vpgTLE pour générer rapidement de grandes bases de données nécessaires, pour TIARA, au développement d'une reconstruction de l'image basée sur IA

- Résultats

- Validation détaillée des simulations Gate par rapport aux simulations Geant4 de référence et à des données expérimentales obtenues sur le Proteus One du CAL avec un fantôme de tête anthropomorphe
- Mesure millimétrique du centre de gravité de la distribution PG pour 10^7 protons incidents
 - Bon accord mesure/simu
 - Possibilité d'utiliser cette information dans la reconstruction PGTI (avant traitement) et pour le contrôle pendant traitement



(a) Full-sinus configuration.

	Δx_{COG} (mm)	Δy_{COG} (mm)	Δz_{COG} (mm)
Experimental	-0.8 ± 5.8	-7.1 ± 4.4	0.24 ± 0.14
Simulation	0.2 ± 5.8	-9.1 ± 4.4	0.18 ± 0.15

Vision 2030

- Dans le cadre (notamment) de CYCLHAD, besoin d'un outil de **simulation Monte Carlo intégré compatible avec la clinique** (sortie TPS, données CT...)
- **2 grands axes de développement dans Gate :**
 - **Modélisation de la dose biologique**
 - Unifier les actors Gate existants (RBE-Actor et BiodoseActor)
 - Comparaison des cartes de dose obtenues avec différents modèles (LEM, mMKM, NanOx...)
 - Comparaison avec les TPS (e.g. Raystation)
 - Intégration de nouveaux modèles radiobiologiques (ex : intégration d'une modélisation de l'hypoxie dans NanOx)
 - **Calcul rapide de l'émission des rayons gamma prompts** pour la conception et la simulation de systèmes de contrôle PG
 - Structure temporelle des faisceaux cruciale pour ces systèmes PG
 - CYCLHAD : unique centre d'hadronthérapie par faisceau d'ions carbone produit par un cyclotron

Nouvelles collaborations

- Possibilités au sein du MP hadronthérapie
 - Dose biologique (modélisation de l'hypoxie)
 - PHABIO (IP2I) : NanOX (+R. Delorme, LPSC)
 - J. Thariat (Université de Caen) : simulations/TPS et données cliniques
 - François Chevalier, Louis-Bastien Weiswald (Université de Caen) : données expérimentales sur organoïdes
 - M. Badoual (IJCLab) : modélisation de l'évolution du volume tumoral
 - A.-S. Wozny et C. Rodriguez-Lafrasse (IP2I) : données in vitro
 - Calcul rapide de l'émission des rayons gamma prompts
 - CREATIS + I2PI (+ LPSC)
 - Vers le développement d'un système PG pour CYCLHAD?
- ou externes
 - Dose biologique (modélisation de l'hypoxie)
 - Raysearch

AaP en cours et visés (2-5 ans)

- Appel PCSI (pas encore publié)
 - Contraintes : soumission d'un seul projet par équipe
 - Date limite (en 2025) : ~20 décembre
- HFSP : Human Frontier Science Program
 - Letter of intent (end of March) before submission of full proposal
 - Eligibility
 - Teams of independent leaders of research groups.
 - The research teams must be international (preferably intercontinental).
 - Team members should not have collaborated before, they will normally not have published original research together, and the project must be significantly different from their ongoing research.

Besoins 2027

- Budget 2026
 - PHABIO (IP2I) : 2 k€ (sur ligne budgétaire RCM)
 - Utilisation pour mission à la conférence IC3DDose (Caen, juin 2026)
- Budget
 - Quelques k€ pour des participations à des conférences et des réunions de collaboration