



IN2P3
Les deux infinis



GDR, Mi2b



Le 05.10.2023

Imagerie à temps-de-vol pour l'imagerie des gamma prompts en protonthérapie

Alicia Garnier

Plan

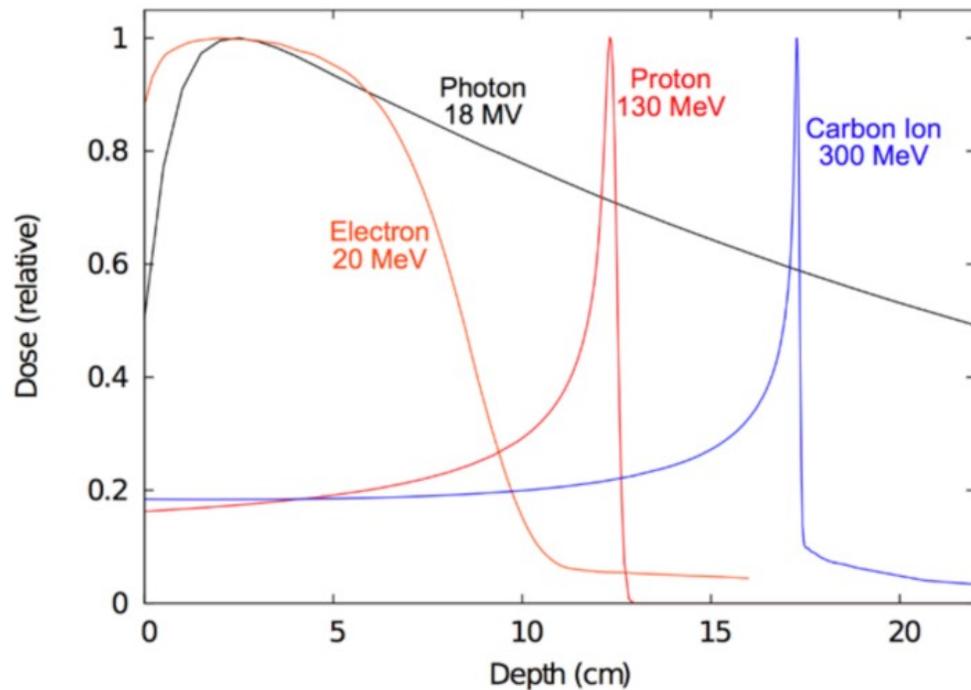
01
Contexte

03
Résultats

02
Projet PGTI

04
Perspectives

Hadronthérapie



Répartition de la dose en fonction de la profondeur de l'eau pour divers faisceaux de rayonnement clinique

Source : Kaiser, A. et al. Proton Therapy Delivery and Its Clinical Application in Select Solid Tumor Malignancies. *J. Vis. Exp.* (144), e58372, doi:10.3791/58372 (2019).

Hadronthérapie

Forme de **radiothérapie** se basant sur l'utilisation de protons ou noyaux légers (carbone)

Dépôt de dose

Énergie déposée par les particules ionisantes engendrant la destruction des cellules tumorales. La zone maximale du dépôt de dose pour les hadrons est appelée **Pic de Bragg**

La physique des protons + Gamma

Prompts

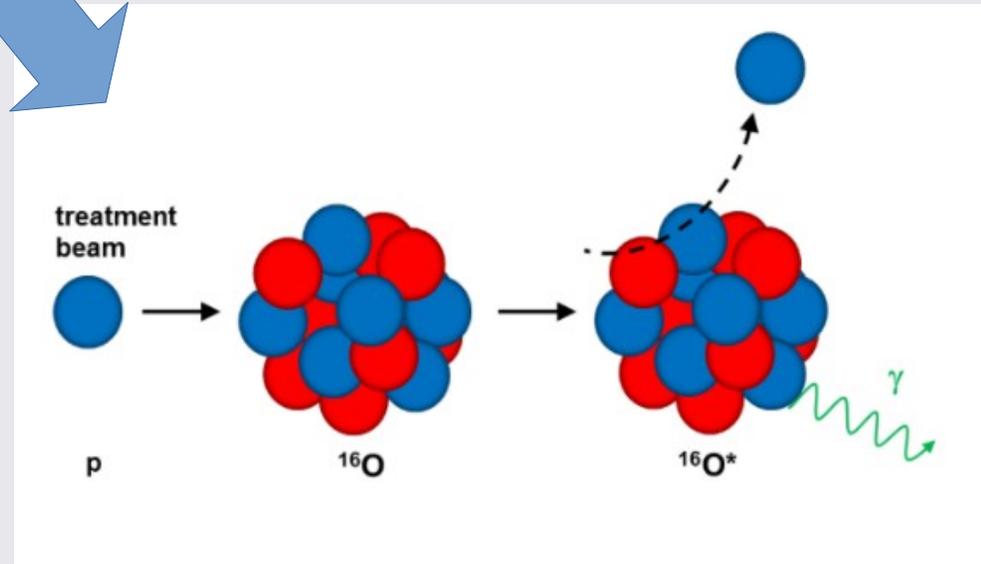
4

- Diffusions coulombiennes inélastiques
- Diffusions coulombiennes élastiques
- Bremsstrahlung
- Réactions nucléaires inélastiques

La physique des protons + Gamma Prompts

5

- Diffusion coulombiennes inélastiques
- Diffusion coulombiennes élastiques
- Bremsstrahlung
- Réactions nucléaires inélastiques
 - ◆ Émission secondaire de Gamma Prompt (GP)
 - ◆ Quasi instantanée (< 1 ps)



Projet PGTI (Prompt Gamma Time Imaging)

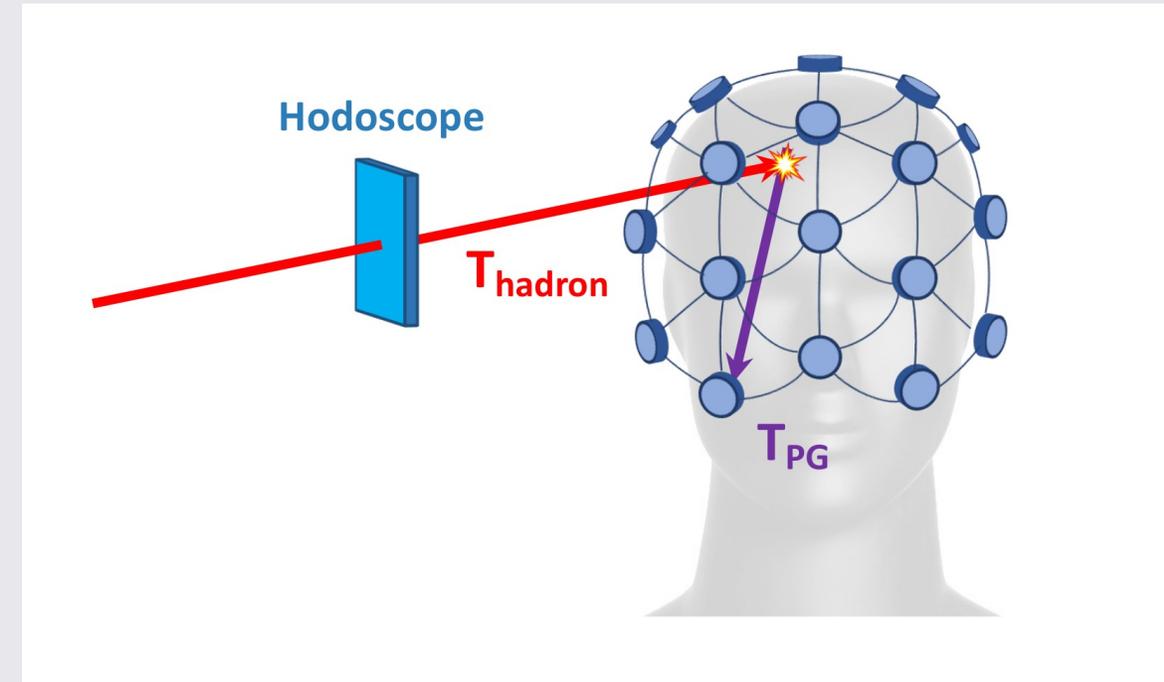
Objectifs :

Utilisation des gamma prompts pour traquer le parcours des protons

- Développement de 30 détecteurs (PbF_2 + SiPM)
- Un moniteur de faisceau

Répartition des tâches

- Détecteur expérimental (LPSC)
- Tests au CAL (centre de protonthérapie)
- Reconstruction et simulation Monte Carlo sur Geant4 (imXgam)



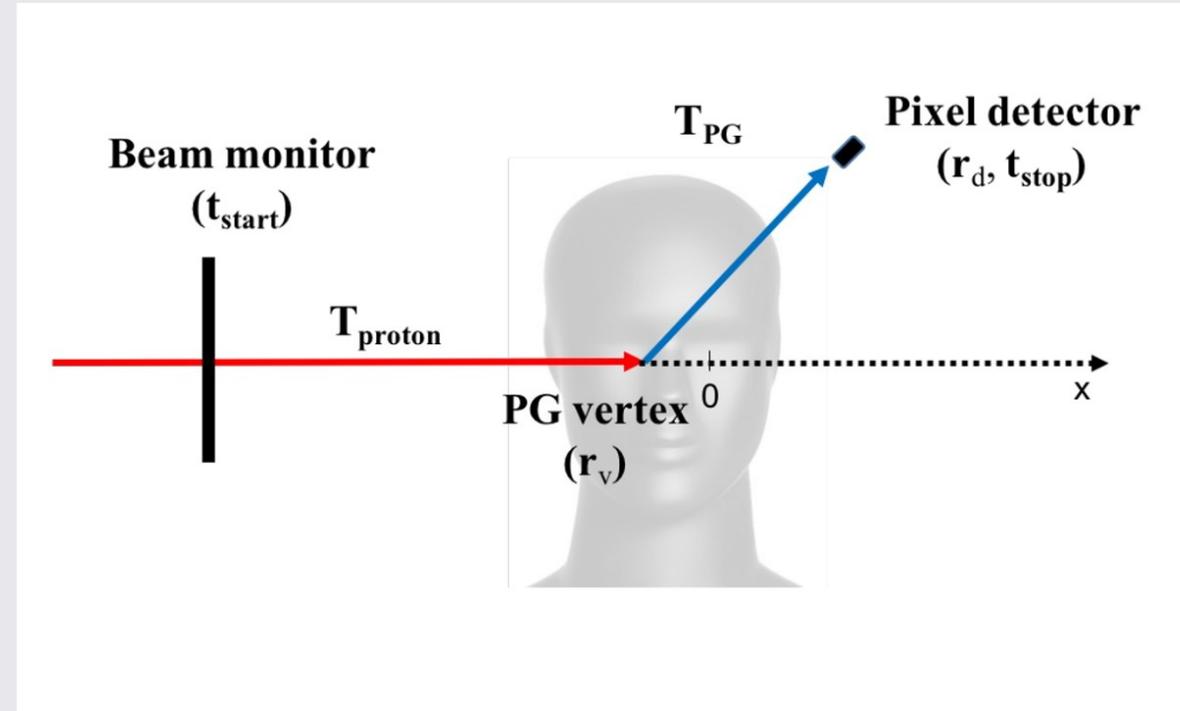
Projet PGTI (Prompt Gamma Time Imaging)

Objectif :

Suivi en temps réel des traitements de **protonthérapie**

⇒ Reconstruction des positions d'émission des **gamma prompt** (GP) sur le parcours des protons

Résolution temporelle visée : **100 ps**



Pour 1 proton :
$$TOF_{mesuré} = t_{stop} - t_{start} = TOF_{théorique} = T_{proton}(r_v, \mathbf{v}_{proton}) + T_{GP}(r_v)$$

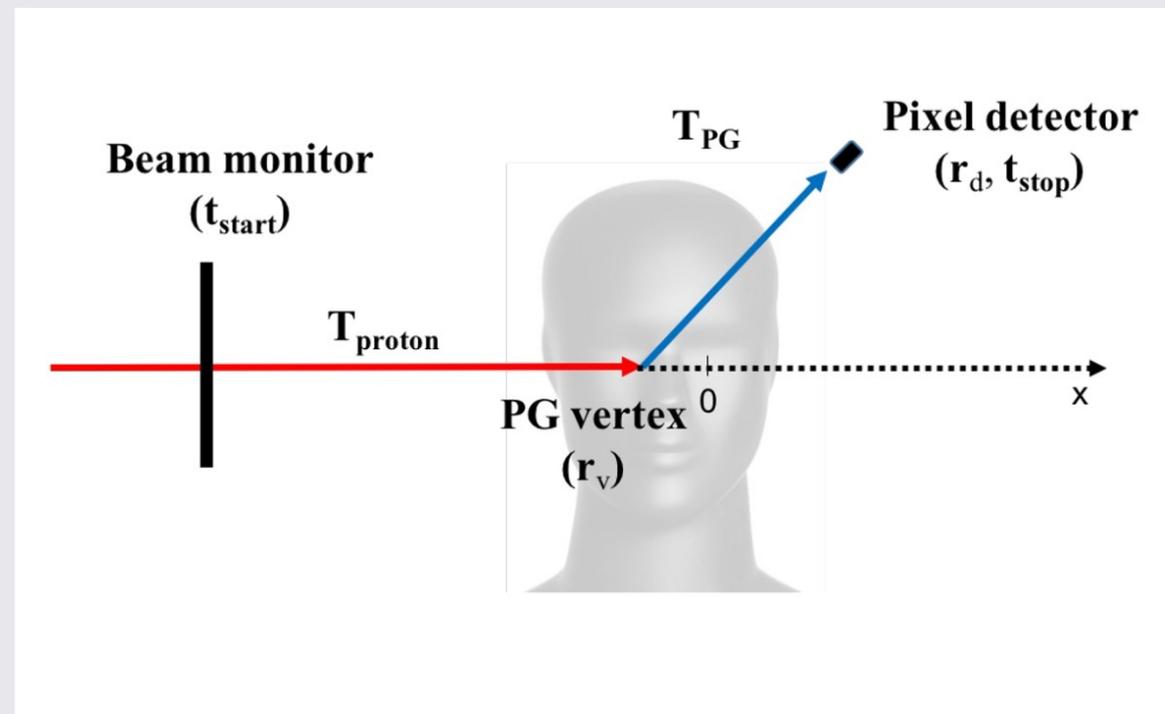
Projet PGTI (Prompt Gamma Time Imaging)

Objectif :

Suivi en temps réel des traitements de **protonthérapie**

⇒ Reconstruction des positions d'émission des **gamma prompt** (GP) sur le parcours des protons

Résolution temporelle visée : **100 ps**



Pour 1 proton : $TOF_{mesuré} = t_{stop} - t_{start} = TOF_{théorique} = T_{proton}(r_v, \mathbf{v}_{proton}) + T_{GP}(r_v)$

Pour plusieurs protons : $TOF_{mesuré} = t_{stop} - t_{start} = TOF_{théorique} = T_{protons}(r_v, \mathbf{v}_{protons}) + T_{GP}(r_v)$

Algorithme

➤ Problème inverse :

- ♦ Minimisation de la **fonction coût** :

$$C(\mathbf{r}_v, \mathbf{v}_{\text{protons}}) = \frac{1}{2\sigma^2} \left\| \mathbf{TOF}_{\text{mesuré}} - \mathbf{TOF}_{\text{théorique}}(\mathbf{r}_v, \mathbf{v}_{\text{protons}}) \right\|^2$$

- ♦ $\mathbf{r}_v = (r_1, \dots, r_N)$ vecteur de l'ensemble des positions des vertex (émission des GP)
- ♦ $\mathbf{v}_{\text{protons}} = (v_1, \dots, v_M)$ profil de vitesse moyen des protons
- ♦ $\mathbf{TOF}_{\text{mesuré}} = (t_1, \dots, t_N)$ vecteur de tous les temps-de-vol mesurés
- ♦ N nombre d'évènements
- ♦ M nombre de bins du profil de vitesse
- ♦ **Input** : Temps-de-vol (TOF) des protons et des gamma prompts
- ♦ **Output** : Positions des vertex et profil de vitesse moyen des protons
- ♦ Garantie théorique de convergence vers la bonne solution en utilisant un **algorithme itératif**

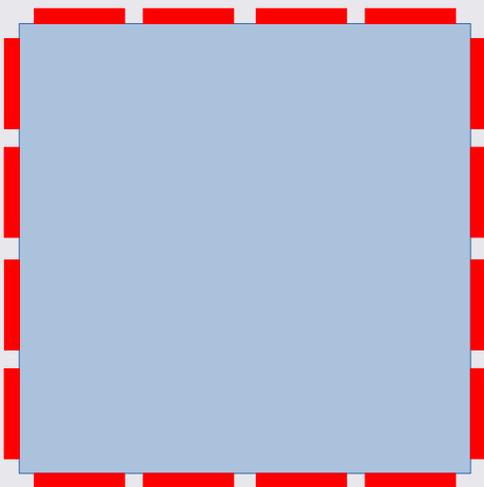


Rédaction d'article en cours

Dispositifs de détection

Scintillateur plastique

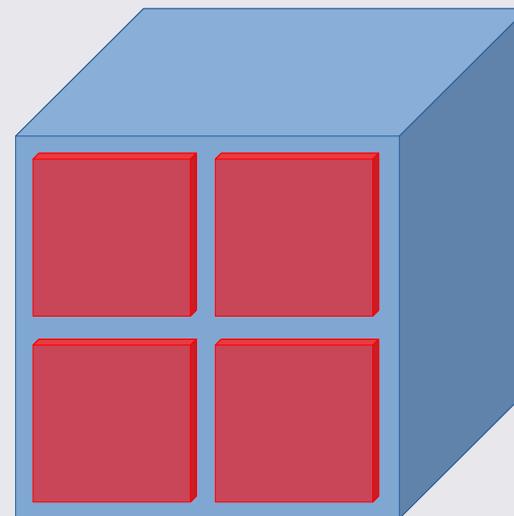
Dimensions : $1 \times 25 \times 25 \text{ mm}^3$
16 SiPM



Moniteur de faisceau

Radiateur Tcherenkov

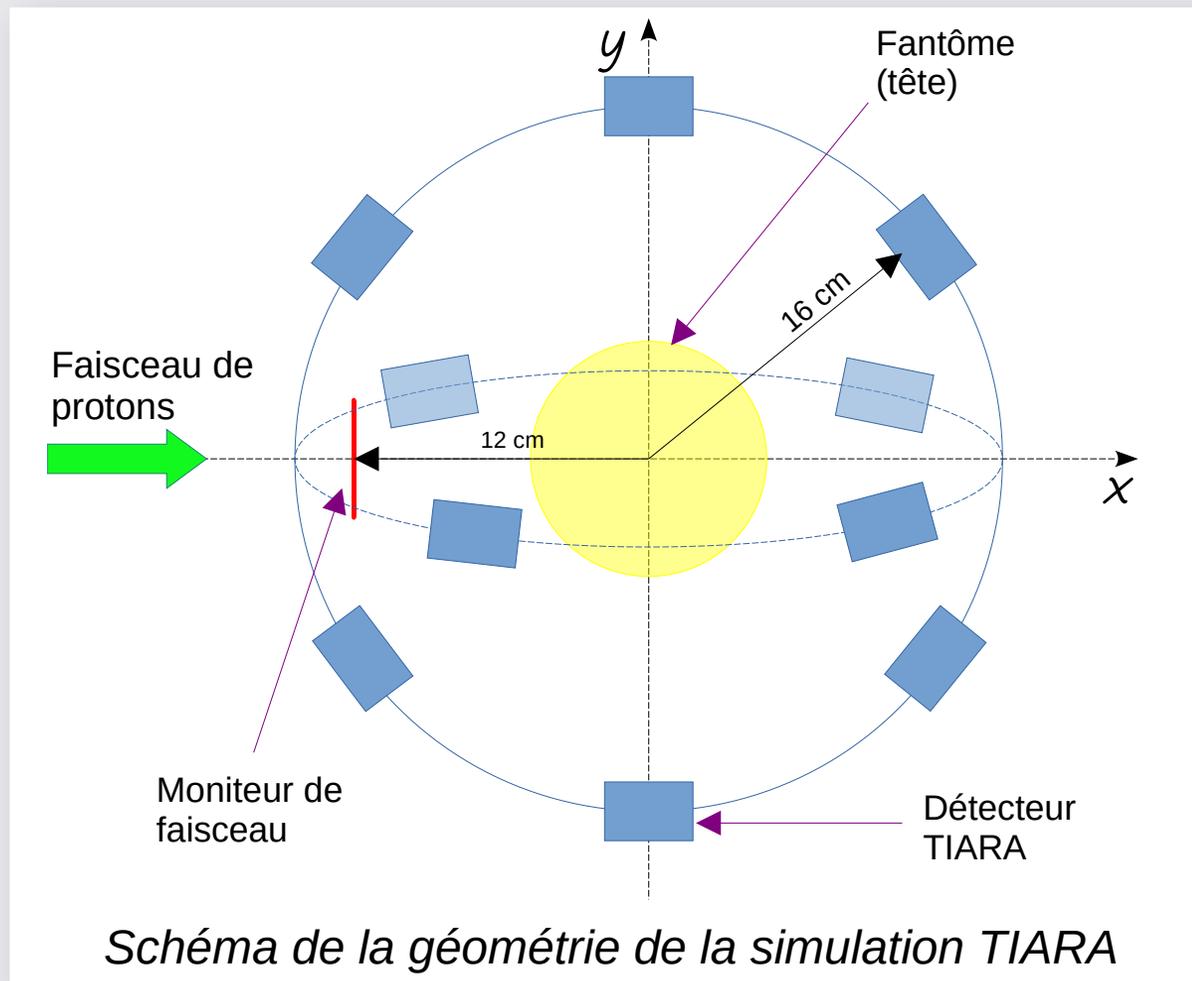
Dimensions : $1.5 \times 1.5 \times 1.5 \text{ cm}^3$ (PbF_2)
4 SiPM Hamamatsu ($6 \times 6 \text{ mm}^2$)



Détecteur TIARA

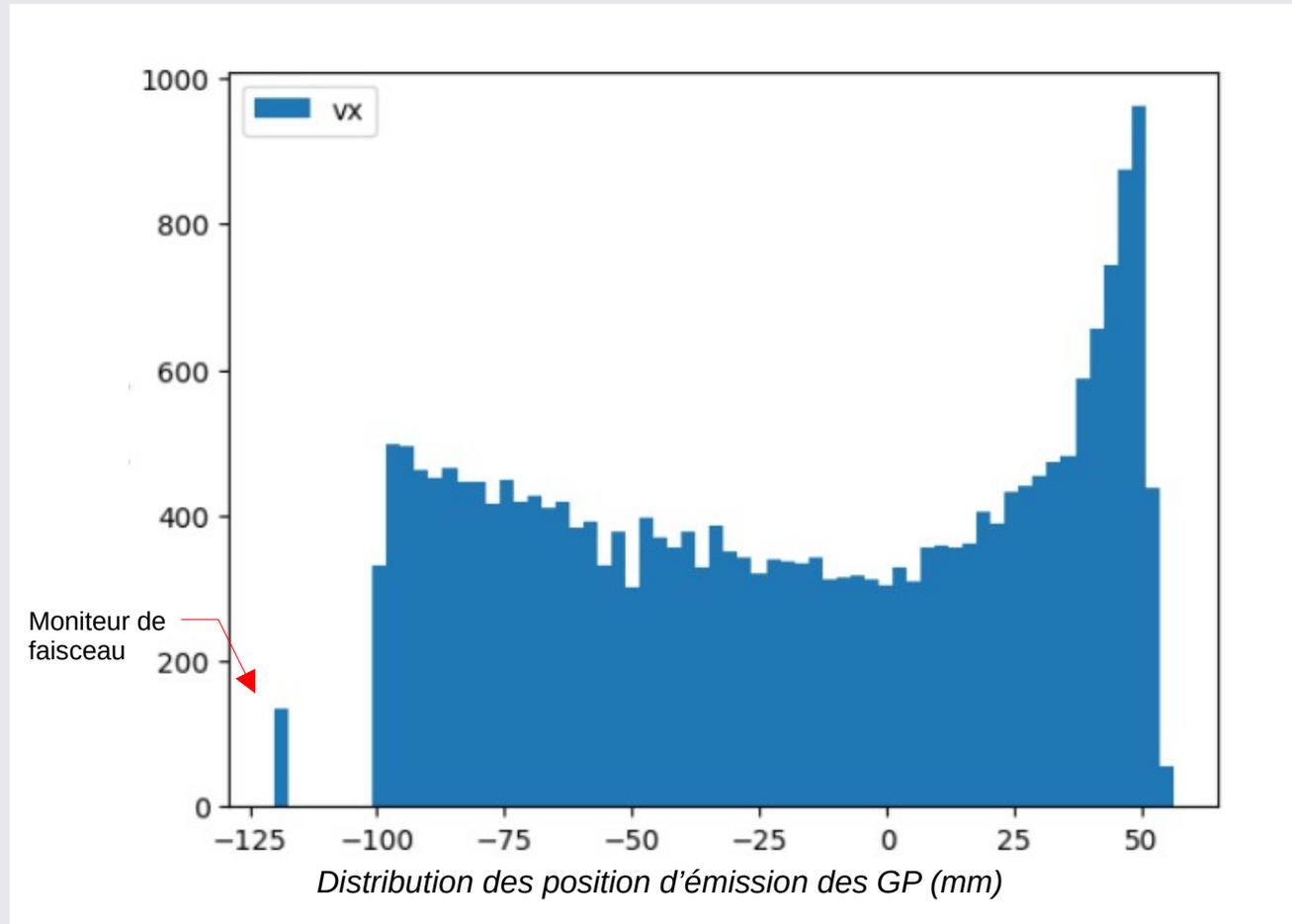
Simulation GEANT4

- ✓ Faisceau ponctuel de **148 MeV** de protons dirigé selon l'**axe x**
- ✓ **Moniteur de faisceau** placé sur l'axe de propagation du faisceau de protons
- ✓ **Fantôme** au centre de la simulation
- ✓ 30 détecteurs de **PbF₂** placés tout autour du fantôme

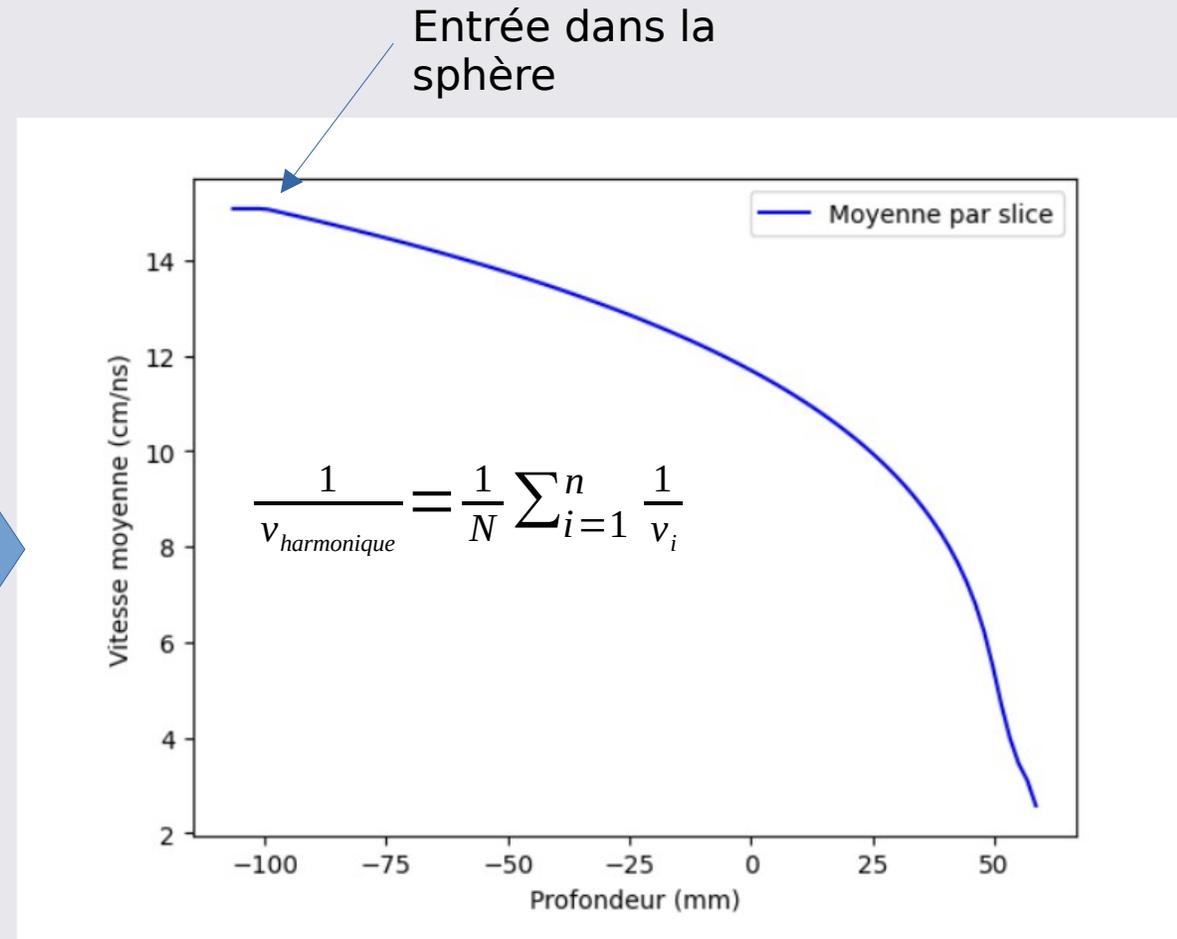
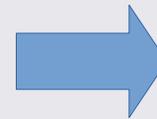
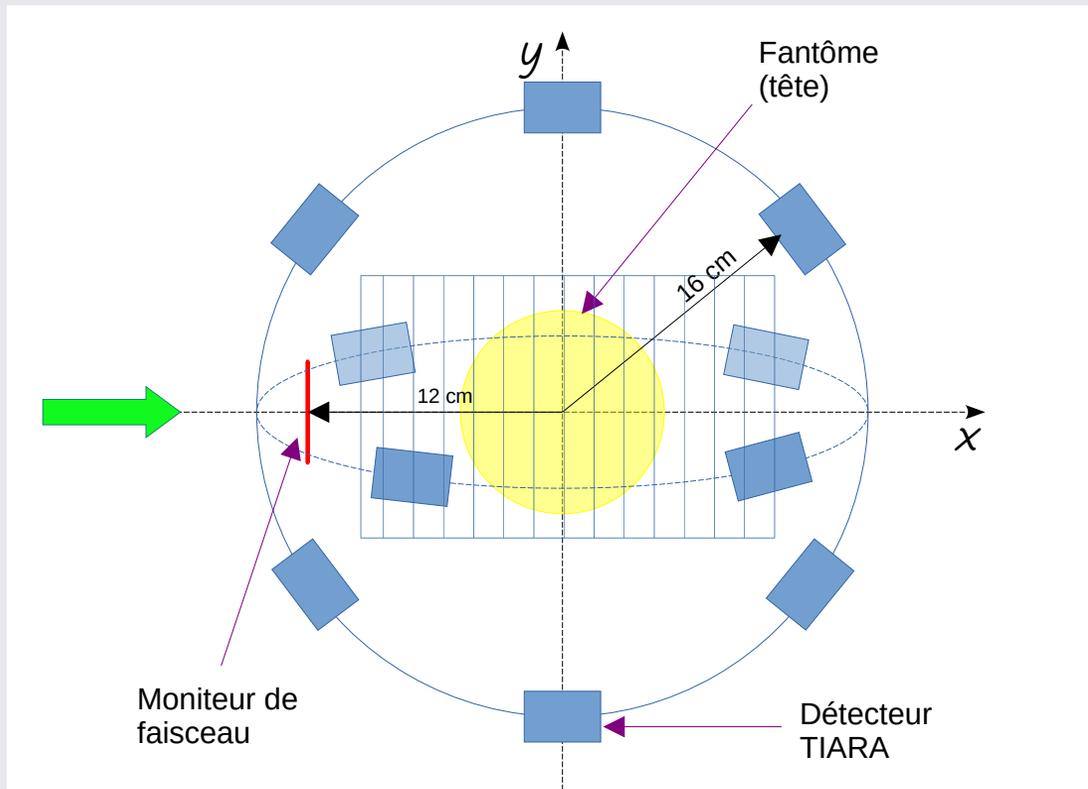


Résultats

- Fantôme : sphère d'eau de 20 cm
- 16 000 000 de protons (148 MeV) envoyés (détection de 3 GP pour 10 000 protons)

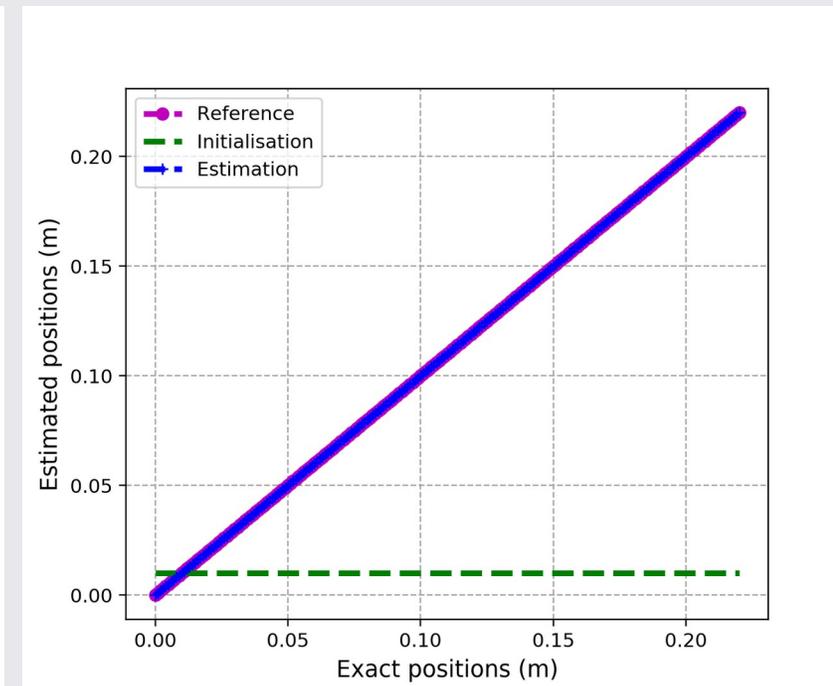
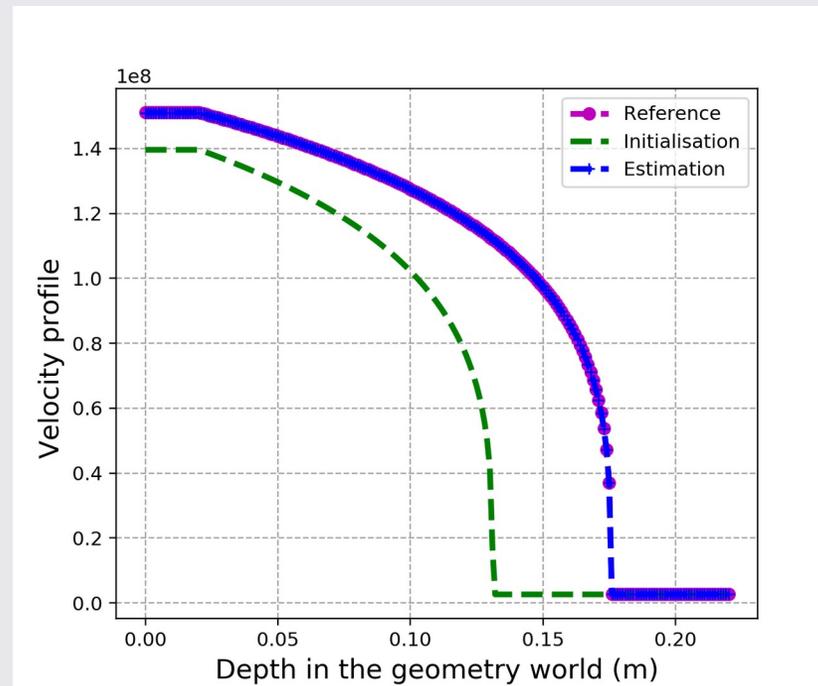
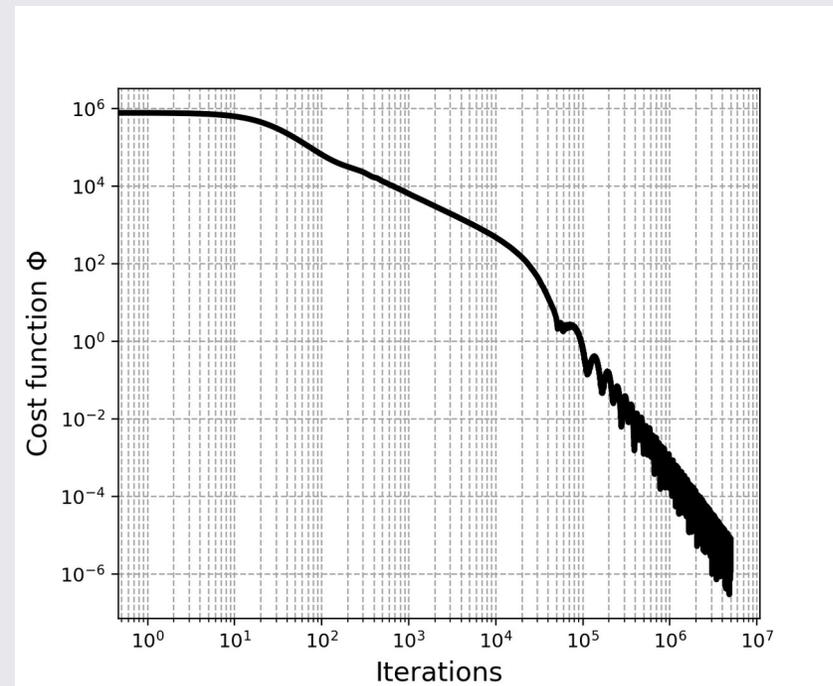


Résultats: Profil de vitesse



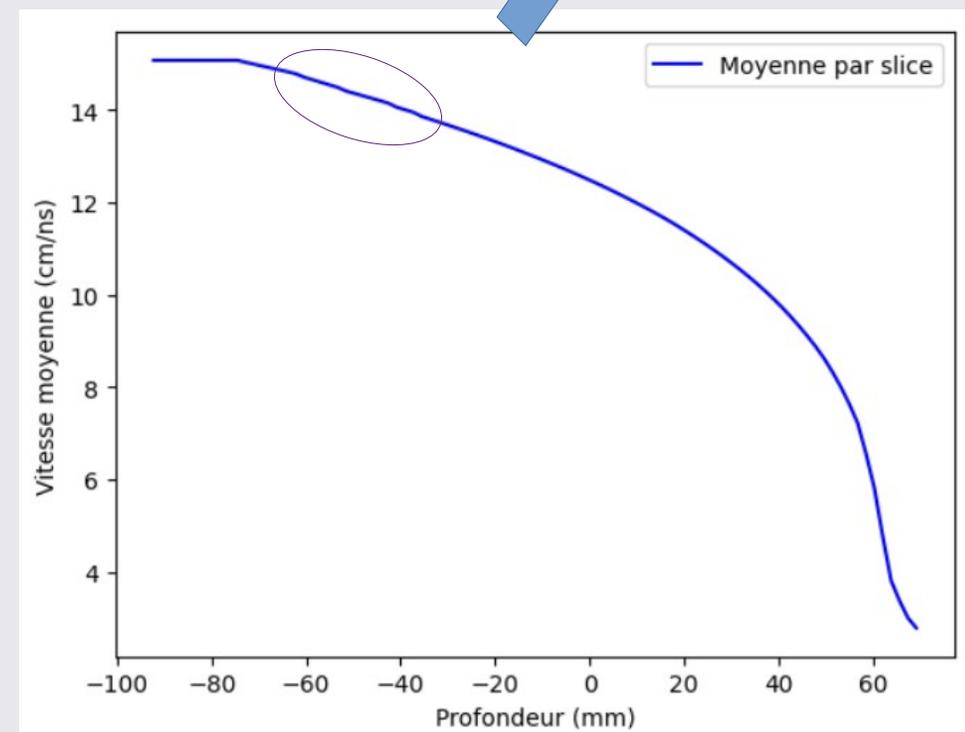
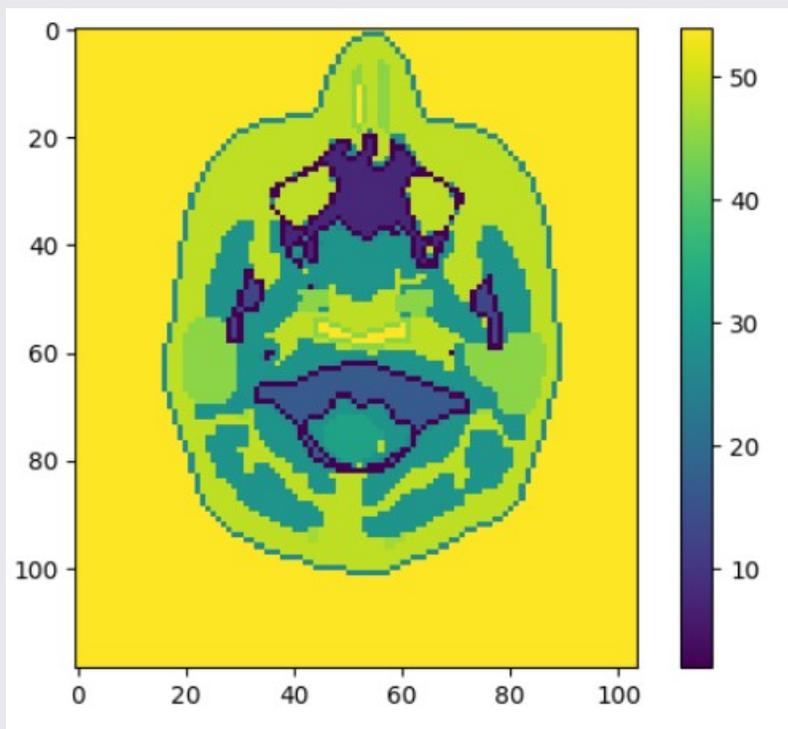
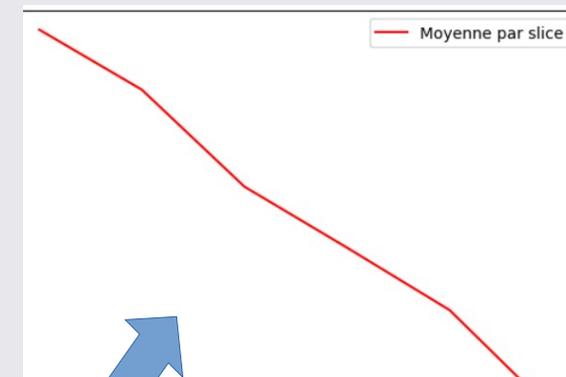
Algorithme : Validation

- Données analytiques



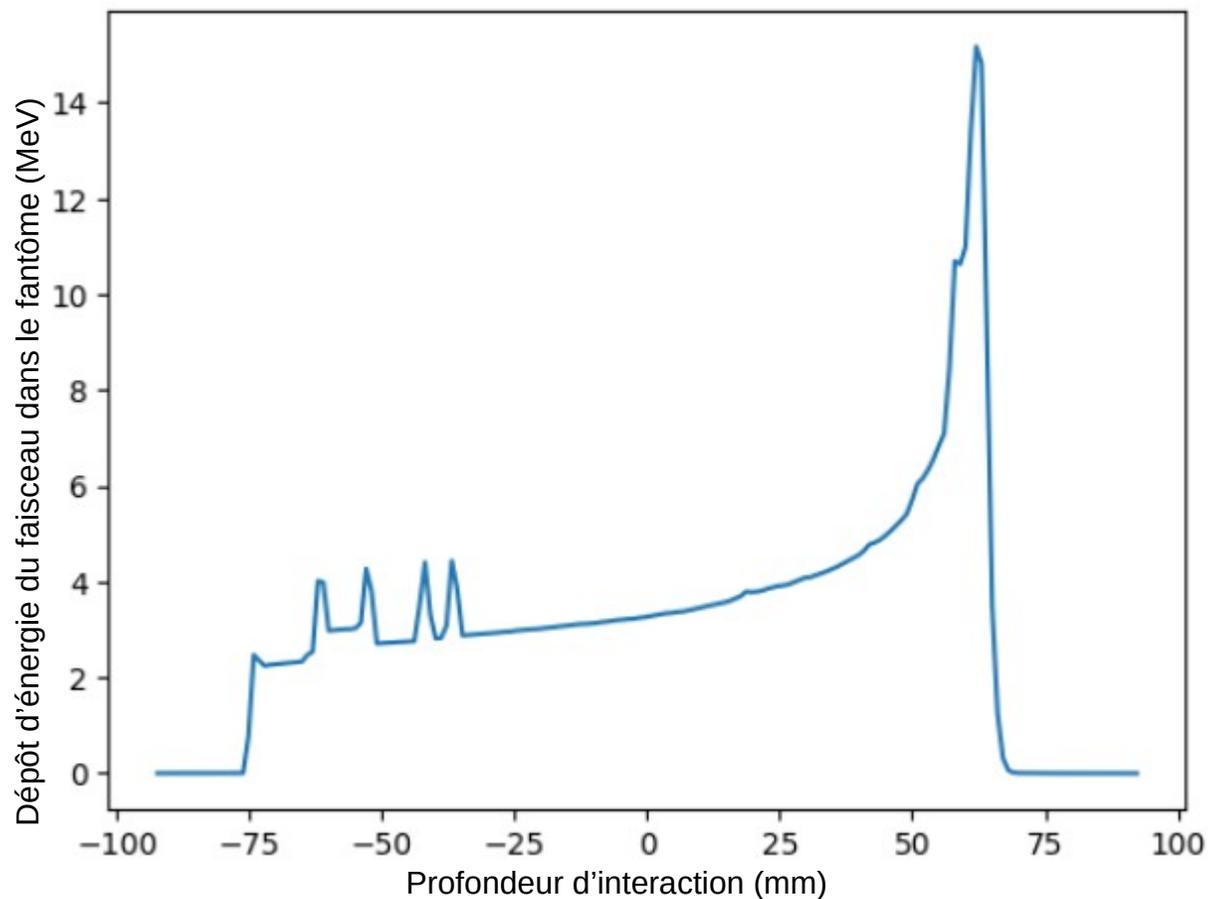
Résultats : Fantôme Anthropomorphique

- Changement du fantôme utilisé : sphère d'eau → fantôme anthropomorphique
- Pre-processing de l'image dans python pour pouvoir l'intégrer dans Geant4
- Implémentation des matériaux dans la simulation



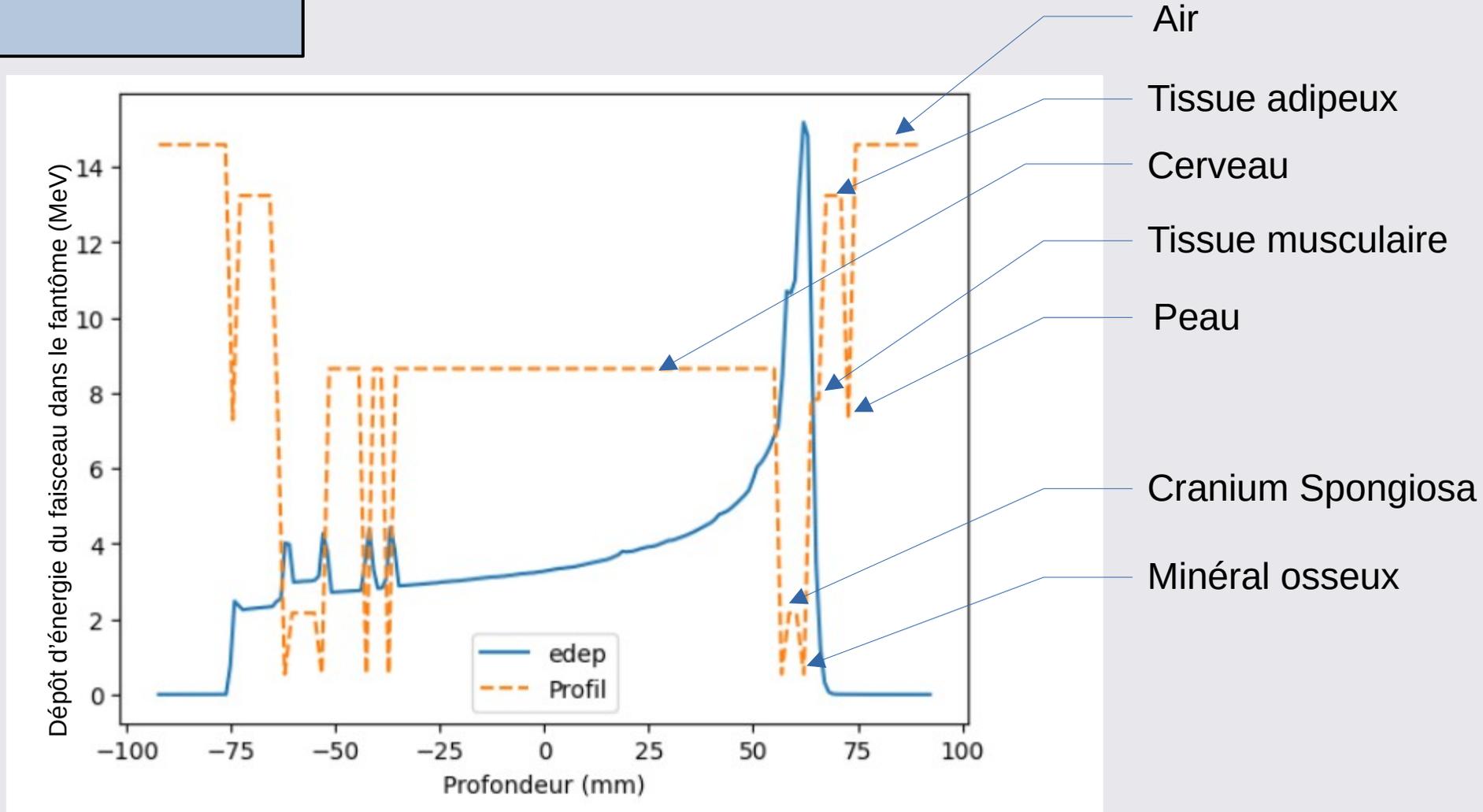
Résultats : Fantôme Anthropomorphique

- Fantôme : Fantôme anthropomorphique
- 1.4 millions de protons (148 MeV) envoyés



Résultats : Fantôme Anthropomorphique

- Fantôme : Fantôme anthropomorphique
- 1.4 millions de protons (148 MeV) envoyés

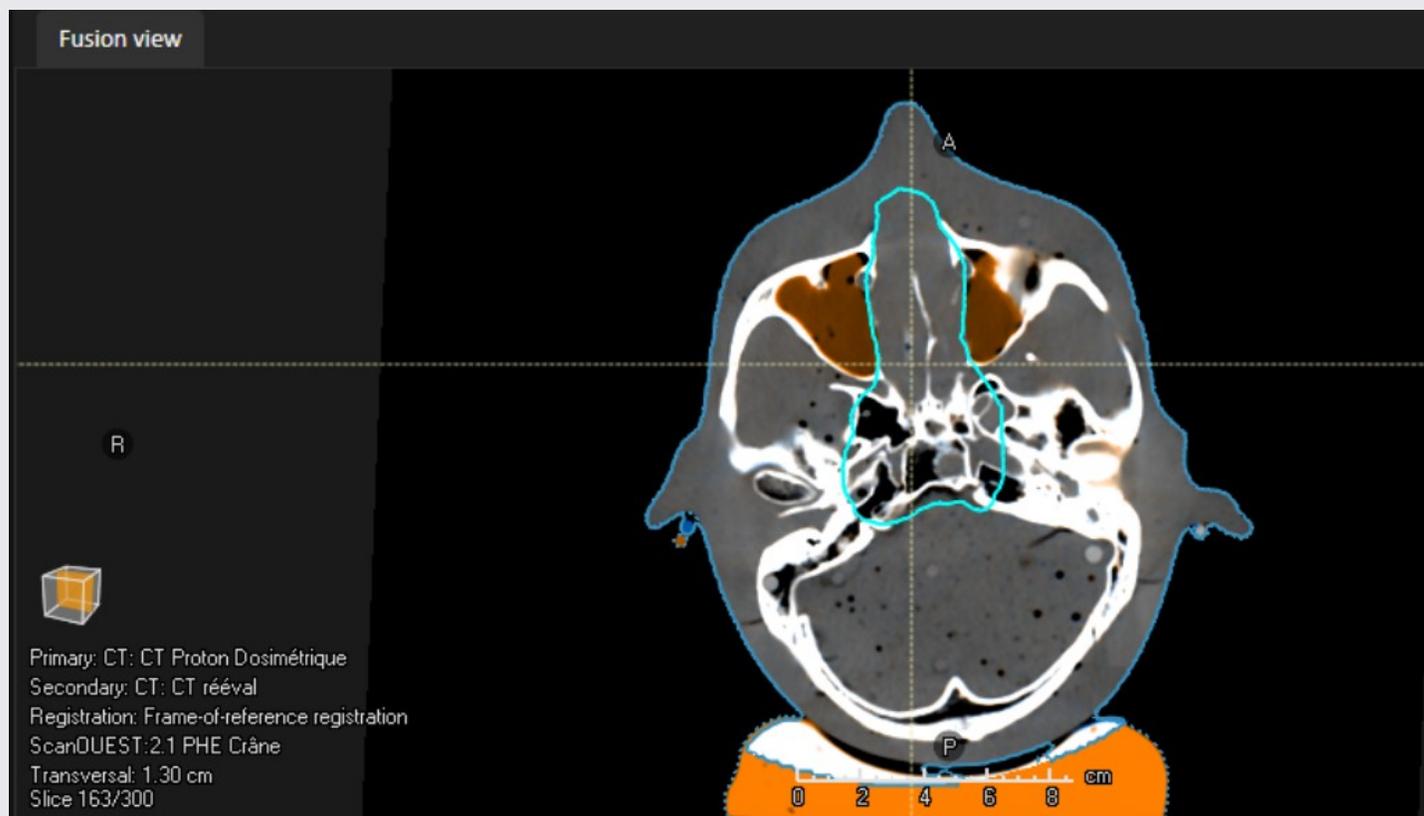


Perspectives

- Faire une simulation comparable aux tests au CAL \Rightarrow Intégration du fantôme du CAL dans la simulation et des caractéristiques du faisceau test

Etapes :

- Lire les données CT
- Les rendre lisible par Geant4
- Simuler tous les faisceaux du plan d'irradiation

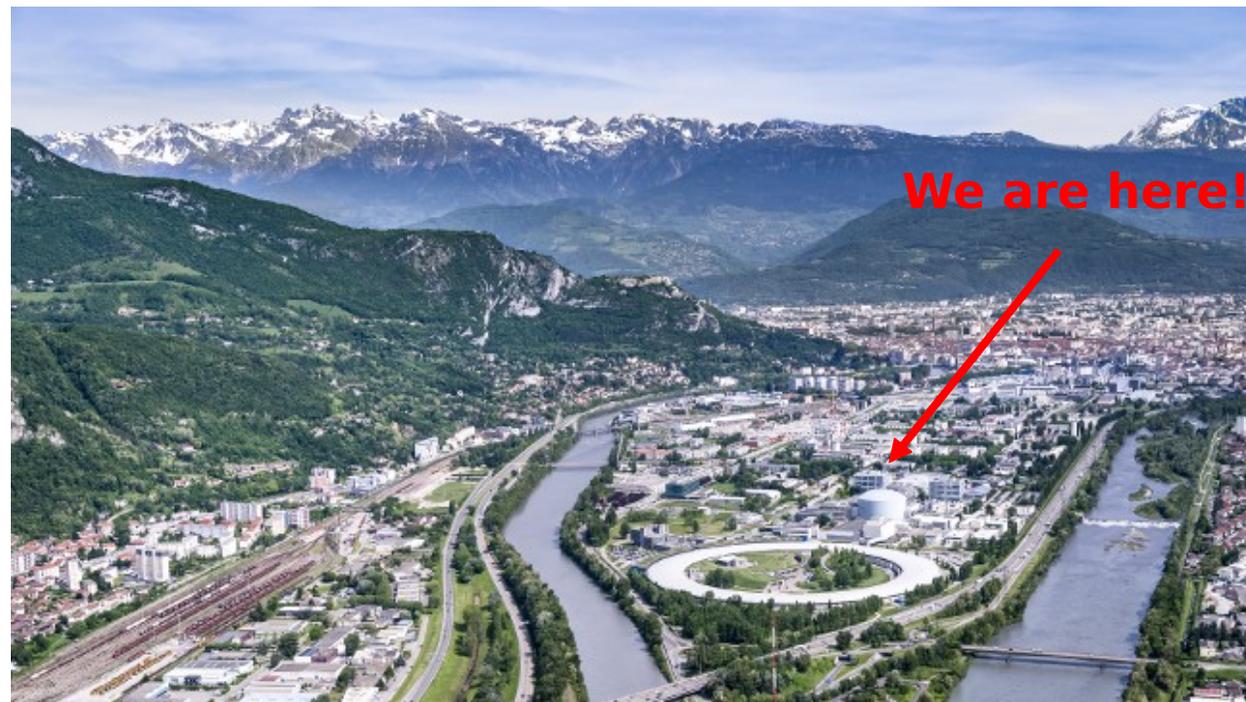


Merci pour votre attention

Postdoc position (2-years) at LPSC, Grenoble

Development of a novel technique for TOF-based proton imaging

within the Prompt Gamma Time Imaging project



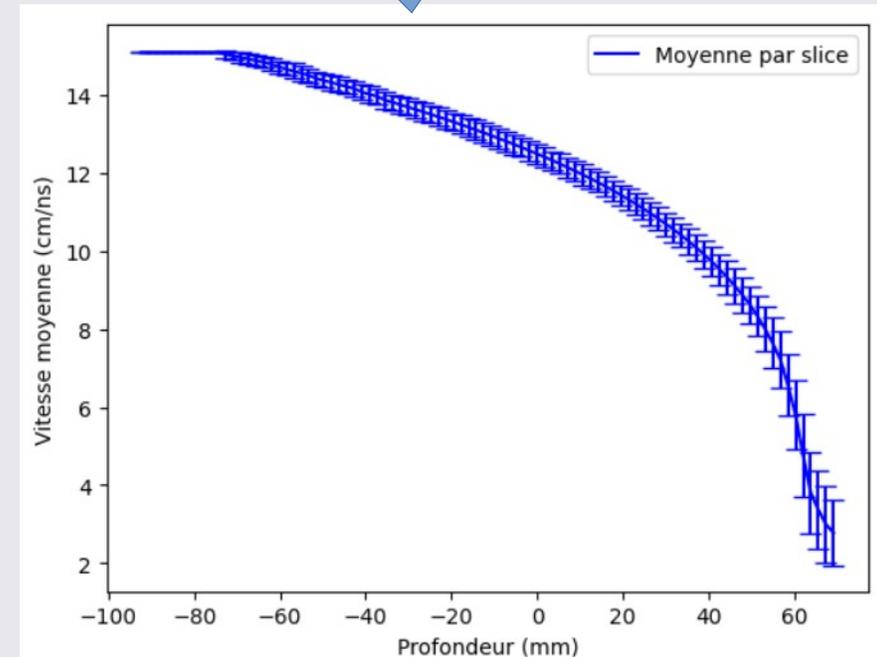
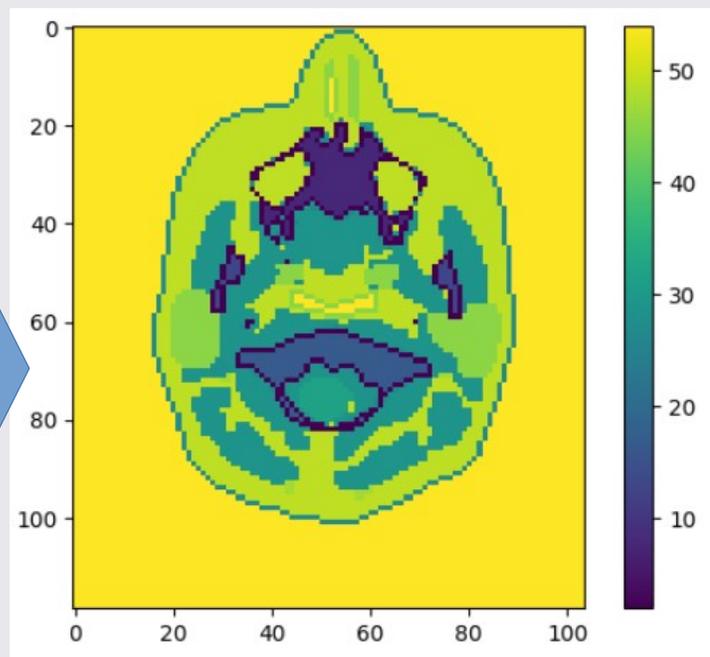
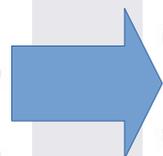
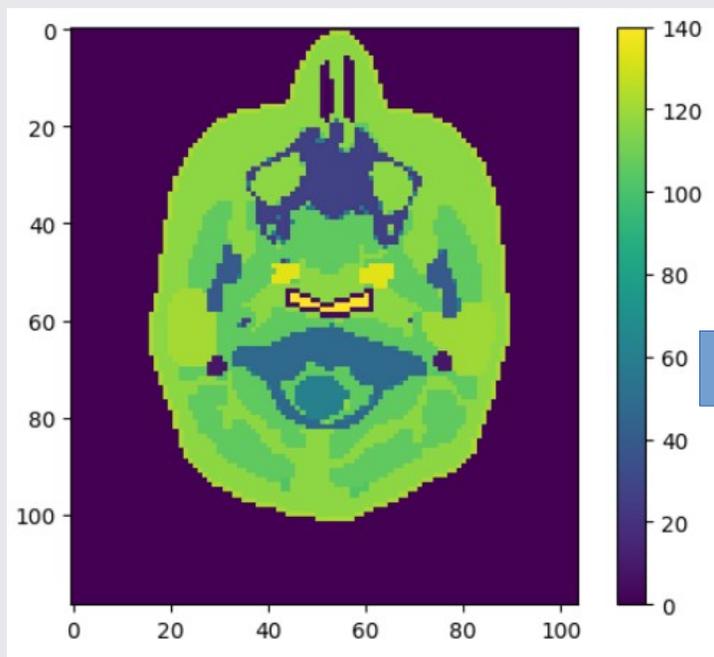
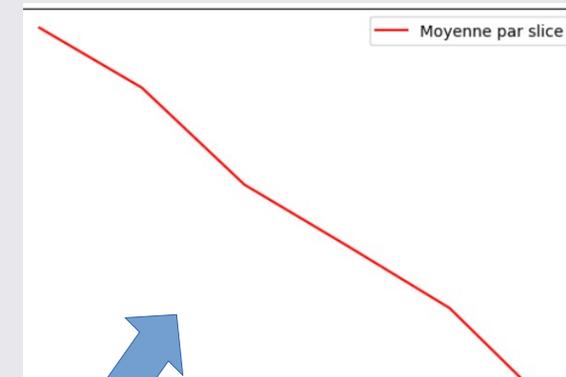
Info: sara.marcatili@lpsc.in2p3.fr



BACK UP

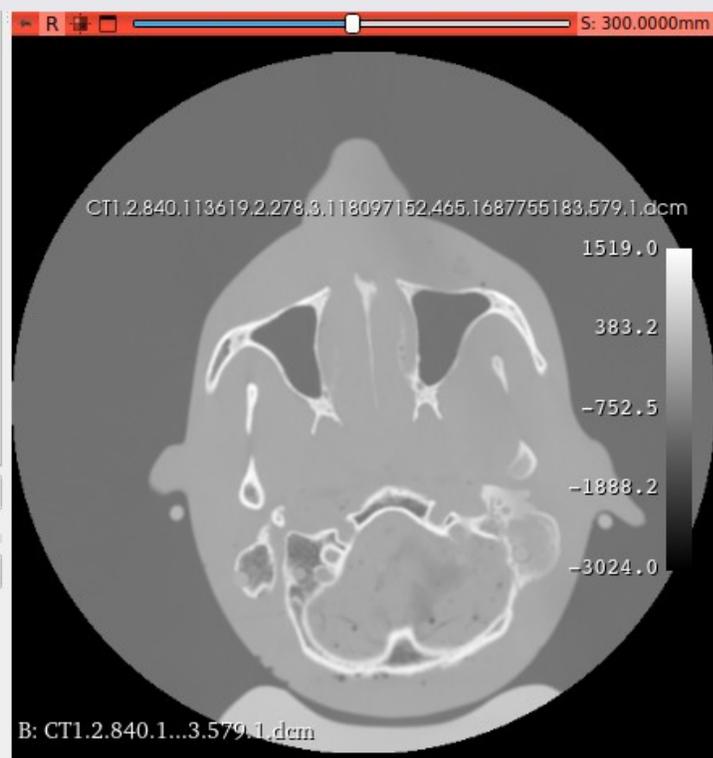
Résultats : Fantôme Anthropomorphique

- Changement du fantôme utilisé : sphère d'eau → fantôme anthropomorphique
- Pre-processing de l'image dans python pour pouvoir l'intégrer dans Geant4
- Implémentation des matériaux dans la simulation

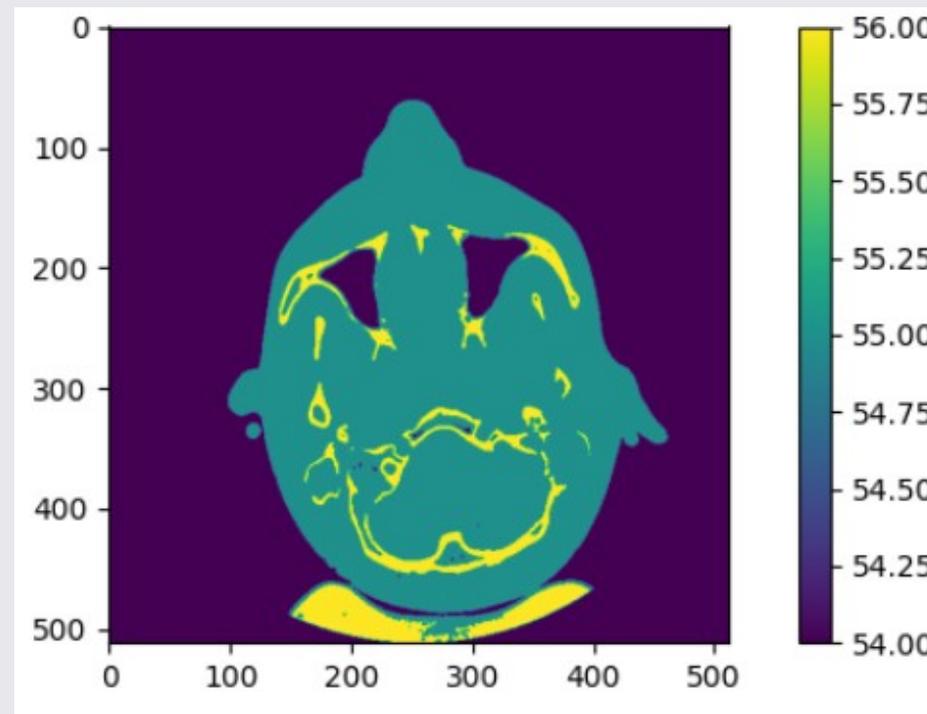


Perspectives

- Faire une simulation comparable aux tests au CAL \Rightarrow Intégration du fantôme du CAL dans la simulation et des caractéristiques du faisceau test



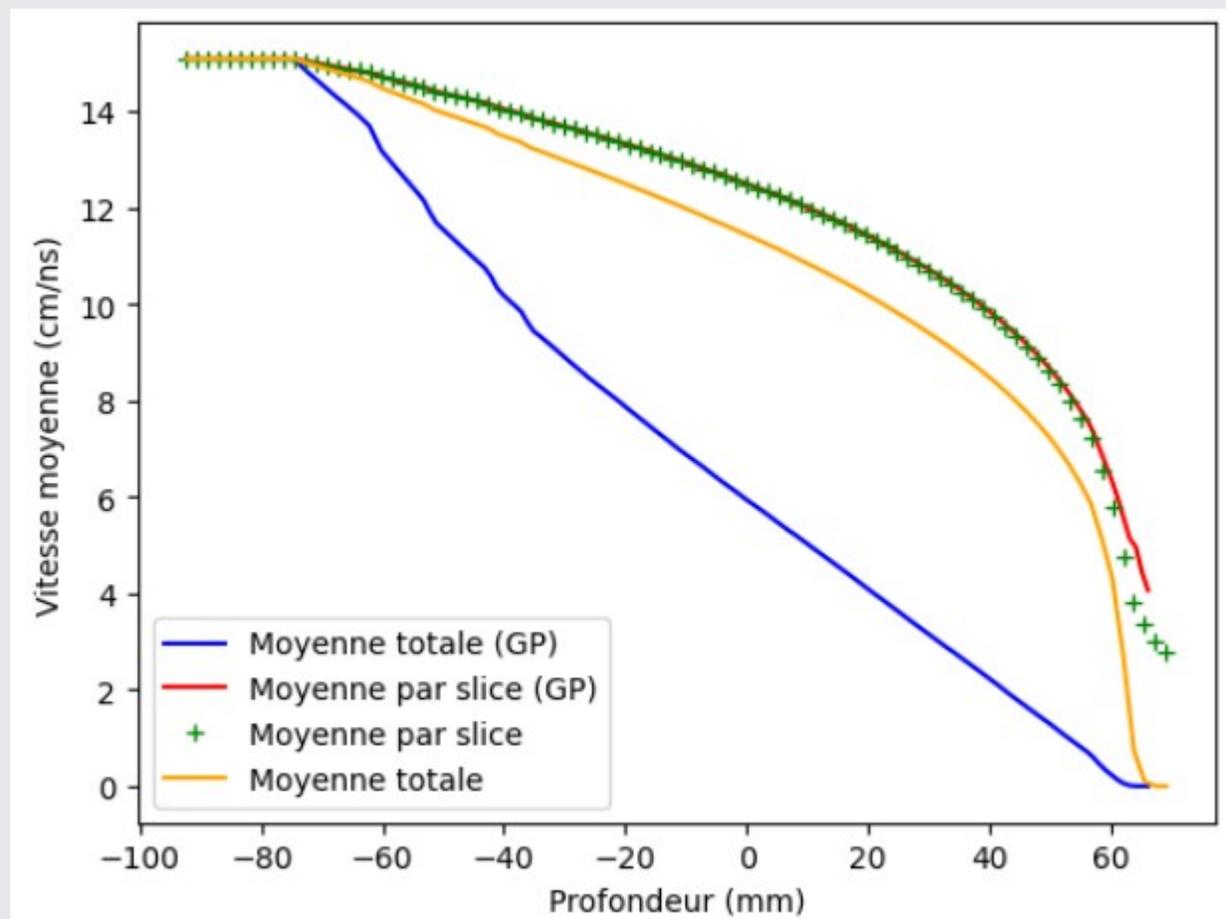
Fantôme (données DICOM)



Fantôme (après processing sur python)

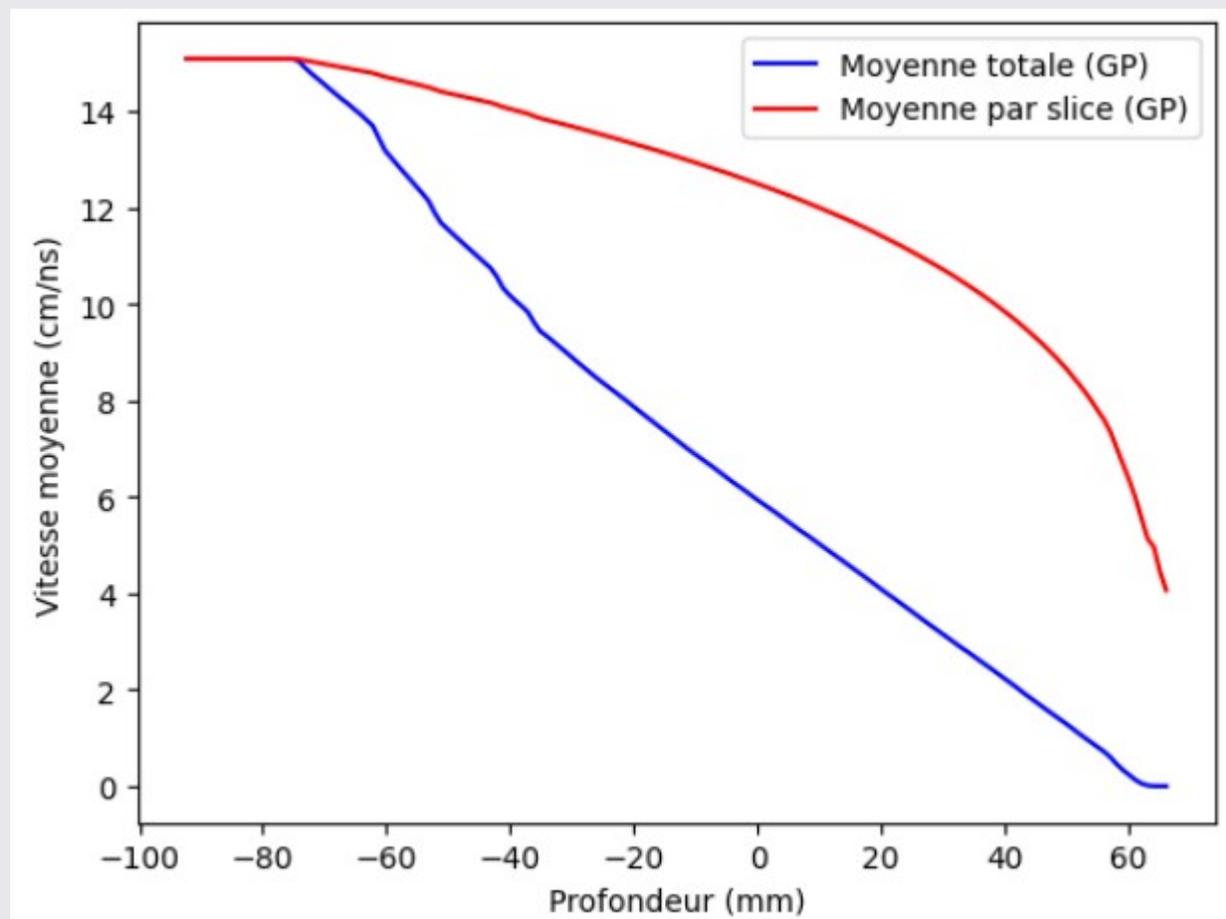
Résultats : Fantôme Anthropomorphique

Adaptation de la simulation pour ne considérer que le profil de vitesse des protons qui ont **émis un gamma prompt**



Résultats : Fantôme Anthropomorphique

Adaptation de la simulation pour ne considérer que le profil de vitesse des protons qui ont **émis un gamma prompt**

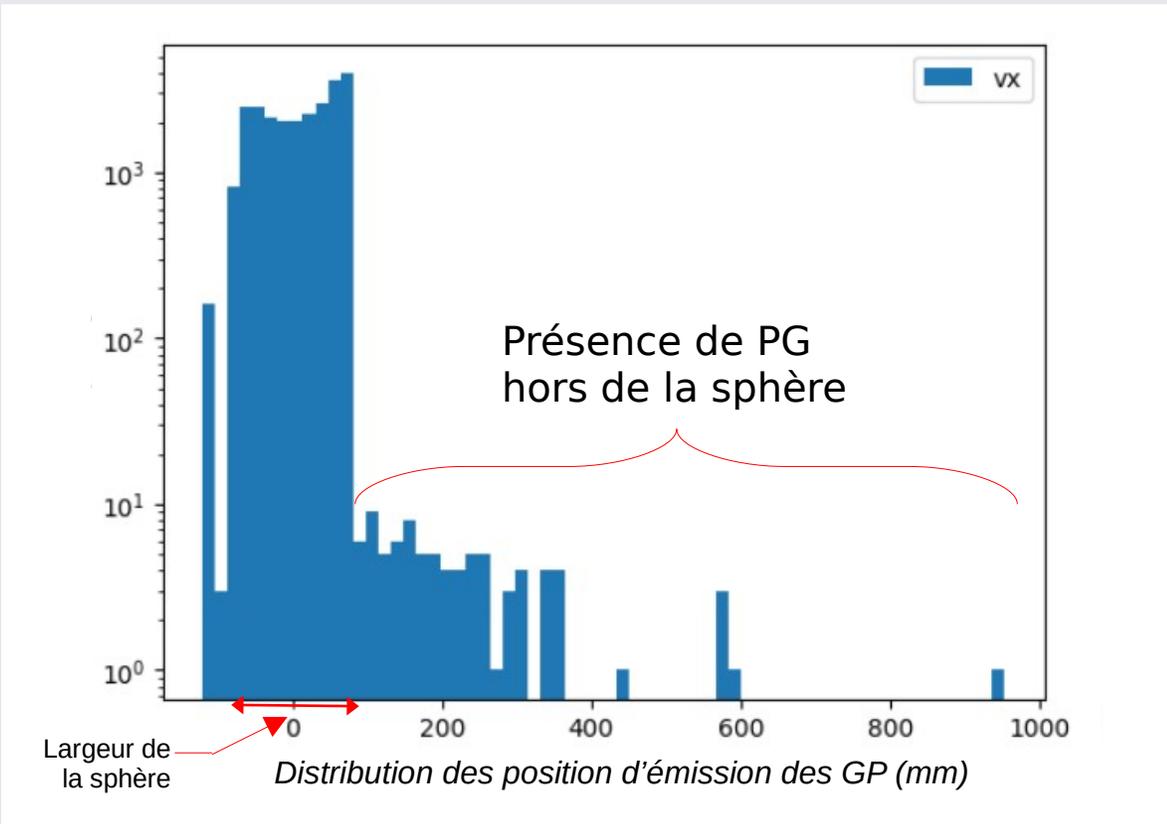
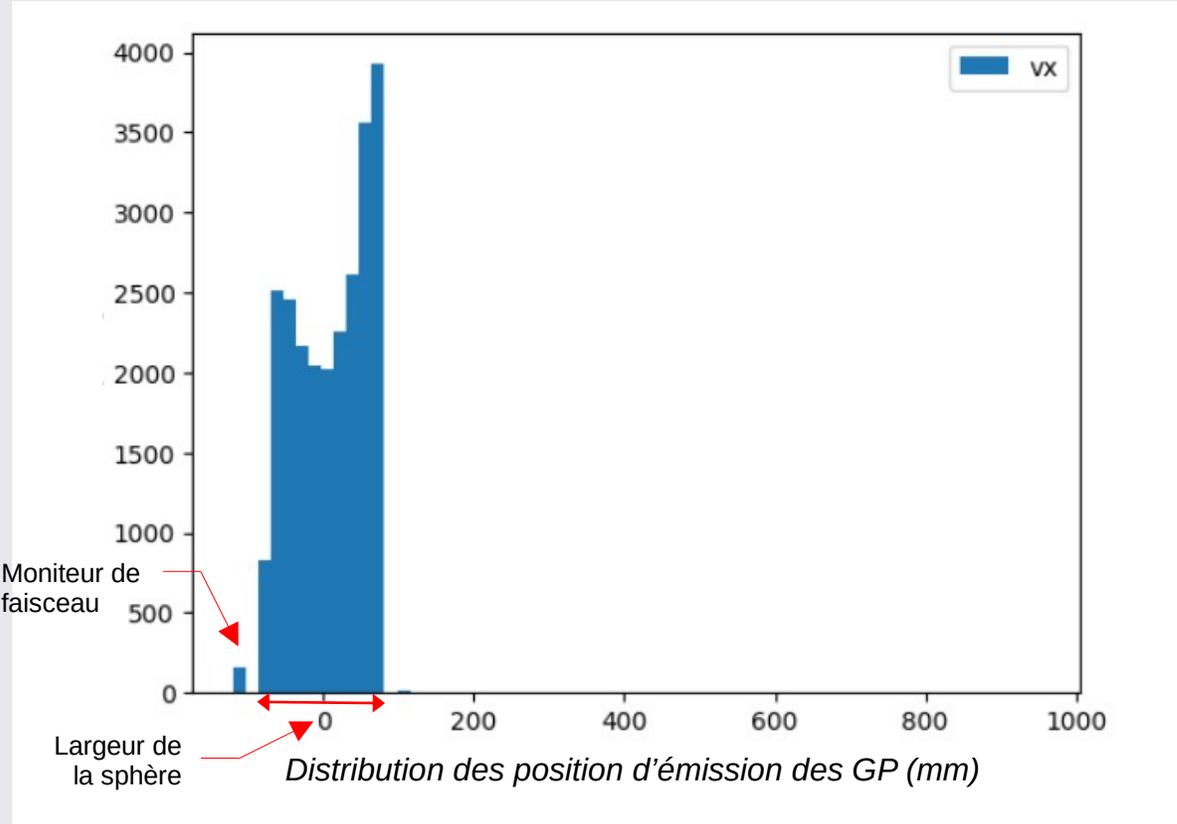


Objectifs

- Prochaines étapes
 - ✓ Calibration de la simulation pour pouvoir reproduire les tests fait en centre de protonthérapie (fantôme + faisceau)
 - ✓ Implémentation du système optique dans les détecteurs + ajout des SiPM

Résultats

- Fantôme : sphère d'eau de 15 cm
- 16 000 000 de protons (148 MeV) envoyés



Résultats: Profil de vitesse

