

MODÉLISATION DU PROTEUS ONE DU CENTRE DE PROTONTHÉRAPIE DE NORMANDIE AVEC GATE

Présentation aux journées des L.A.R.D. 2025
Date 01/07/2025

PRÉSENTÉ PAR : ARNAUD GABORIT

Encadrants: Dr. Christelle Huet ASNR
Dr. Yann Perrot ASNR

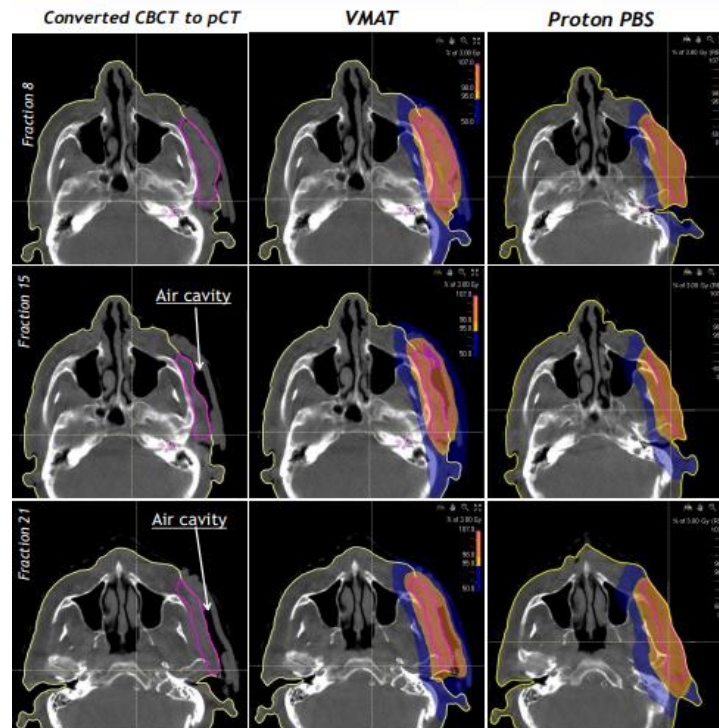
ASNR (Autorité de sûreté
nucléaire et de radioprotection)

CONTEXTE

► Traitement de Tumeurs Cutanées Non Mélanocytaires (TCNM) par protonthérapie mené par le Centre François Baclesse (CFB)

- Précision du dépôt de dose + limitation de dose aux tissus sains
- Peu de rechutes après traitement

CASE 2 Variation of the CTV dose coverage with daily fraction



Moignier et al. PTCOG 2023, Poster

Efficacy (% from primary intent 12 pts)	All patients N=12	Dose 3Gy per Fraction N=9	Dose 6Gy per Fraction N=3
Median follow-up (days)		90,5	39
Partial response	16,6%(2)	11,12%(1)	33,33%(1)
Complete response	83,4%(10)	88,88%(8)	66,66%(2)
Relapses	0%	0%	0%

Stefan et al. PTCOG 2023, Poster

► Comparaison Radiothérapie Photons VS protonthérapie sur TCNM

• Radiothérapie Photon avec bolus

Les + : plus de recul et d'expérience

Les - : dépôt de dose (après la tumeur) en profondeur
problème de poche d'air entre bolus et peau

• Protonthérapie

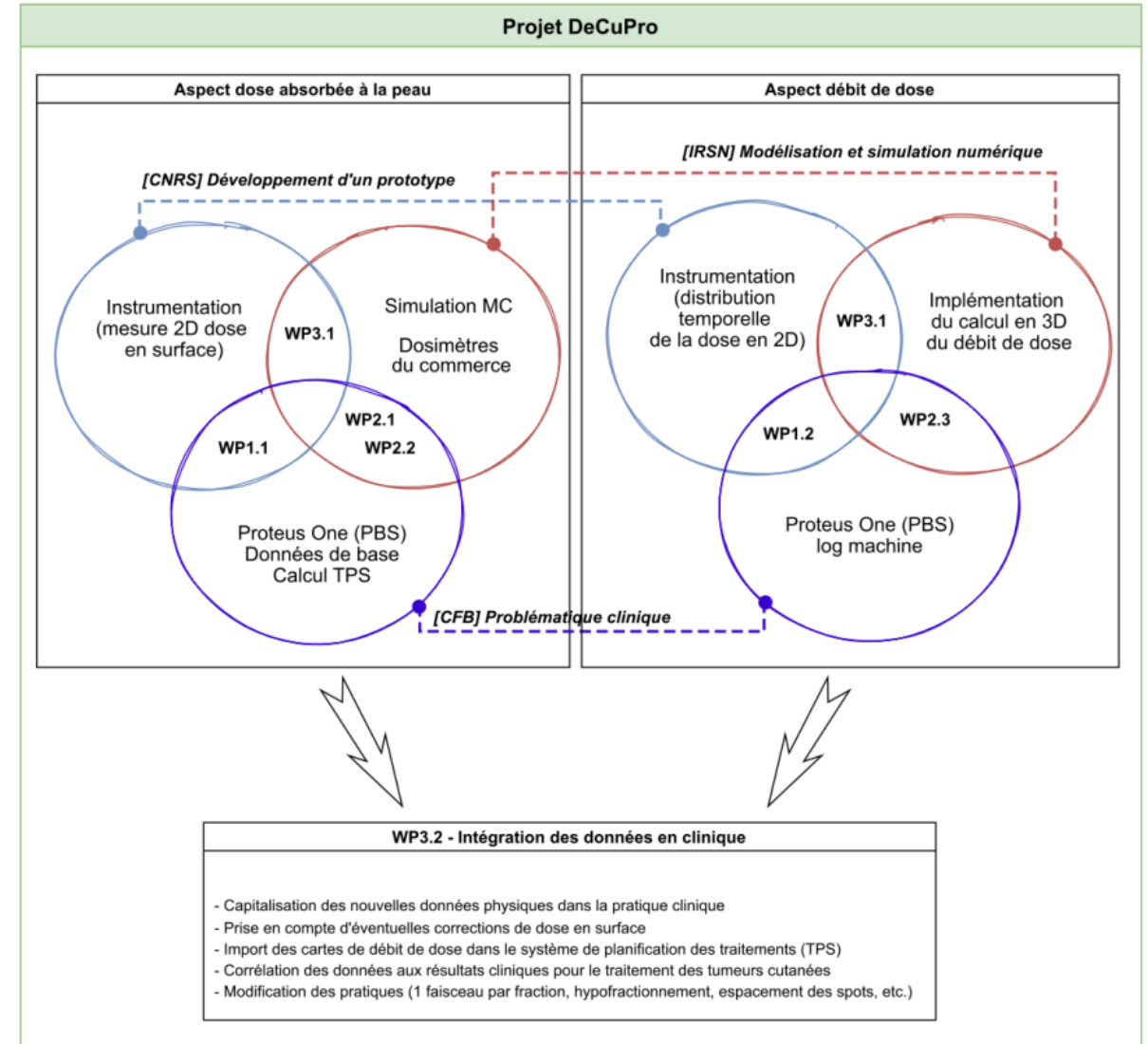
Les + : suppression de l'usage de bolus
meilleure conformation de la dose à la tumeur

Les - : Problème neutrons secondaires dose en profondeur

Détecteurs non adaptés mesure de dose faibles profondeurs (~ 3mm)

PROJET DECUPRO

- Partenaires: LPC de Caen, ASNR, CFB
- financement projet (MITI CNRS/IRSN)
- Amélioration de la caractérisation de la dose reçue à la peau dans le traitement des tumeurs cutanées non mélanocytaires (TCNM) par protonthérapie utilisant la technique Pencil Beam Scanning (PBS)
 - Développement d'un détecteur permettant une mesure de dose sur de faibles profondeurs (dose à la peau) basé sur une chambre à ionisation.
 - Développement d'un modèle Monte-Carlo du Proteus One.



BUT DU STAGE



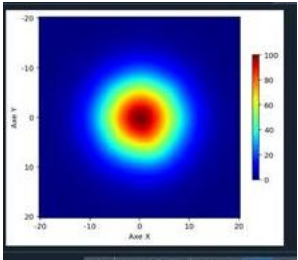
- ▶ Modéliser le Proteus one du CFB
- ▶ Utilisation de GATE version 10.0.0 (scripts en python)
- ▶ Méthode basée sur la publication: L Grevillot et al 2011 Phys. Med. Biol. 56 5203
- Modélisation de la source à la sortie du nozzle (source PBS)
- Ajustement des paramètres de la source (E , σE , x , y , θ , ϕ , $E_{\text{emittance}_x}$, $E_{\text{emittance}_y}$) en comparant les données expérimentales aux données simulées



DONNÉES DISPONIBLES

Données expérimentales

- PDD (pic de Bragg dans l'eau) pour 28 énergies allant de 98.4 MeV à 226 MeV acquis avec une chambre Stingray (chambre à ionisation cylindrique : Ø12cm * 1mm)
- Spot sizes dans l'air à 7 positions autour de l'isocentre pour 28 énergies allant de 98.4 MeV à 226 MeV acquis avec une matrice Lynx (matrice 2D de : 30x30 cm²)



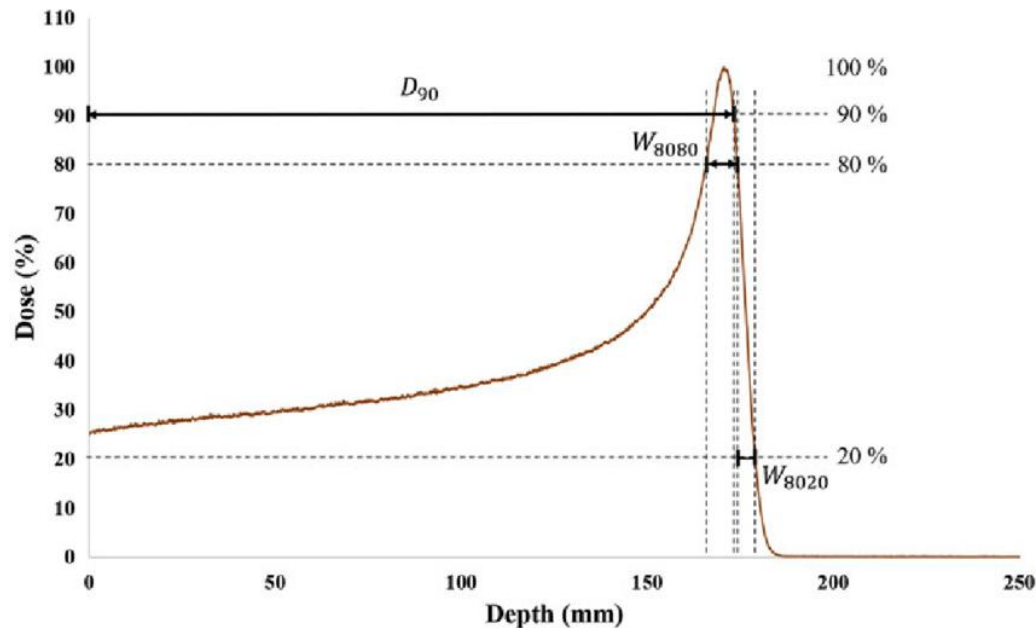
Données du modèle PBS du Centre Antoine Lacassagne (CAL) → valeurs initiales pour ajustement du

modèle

Energie	98.4	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175	180	185	190	195
a	-6.37E-08	-6.37E-08	-6.37E-08	-6.37E-08	-6.37E-08	-6.37E-08	-6.37E-08	-6.37E-08	-6.37E-08	-6.37E-08	-6.37E-08	-6.37E-08	-6.37E-08	-6.37E-08	-6.37E-08	-6.37E-08	-6.37E-08	-6.37E-08	-6.37E-08	-6.37E-08	-6.37E-08
b	6.82E-05	6.82E-05	6.82E-05	6.82E-05	6.82E-05	6.82E-05	6.82E-05	6.82E-05	6.82E-05	6.82E-05	6.82E-05	6.82E-05	6.82E-05	6.82E-05	6.82E-05	6.82E-05	6.82E-05	6.82E-05	6.82E-05	6.82E-05	6.82E-05
c	0.98261627	0.98261627	0.98261627	0.98261627	0.98261627	0.98261627	0.98261627	0.98261627	0.98261627	0.98261627	0.98261627	0.98261627	0.98261627	0.98261627	0.98261627	0.98261627	0.98261627	0.98261627	0.98261627	0.98261627	0.98261627
d	1.59993	1.59993	1.59993	1.59993	1.59993	1.59993	1.59993	1.59993	1.59993	1.59993	1.59993	1.59993	1.59993	1.59993	1.59993	1.59993	1.59993	1.59993	1.59993	1.59993	1.59993
E sim	98.89	100.48	105.45	110.43	115.41	120.39	125.37	130.35	135.34	140.33	145.32	150.31	155.31	160.30	165.30	170.30	175.31	180.31	185.32	190.32	195.33
a	-4.32E-05	-4.32E-05	-4.32E-05	-4.32E-05	-4.32E-05	-4.32E-05	-4.32E-05	-4.32E-05	-4.32E-05	-4.32E-05	-4.32E-05	-4.32E-05	-4.32E-05	-4.32E-05	-4.32E-05	-4.32E-05	-4.32E-05	-4.32E-05	-4.32E-05	-4.32E-05	-4.32E-05
b	0.00929653	0.00929653	0.00929653	0.00929653	0.00929653	0.00929653	0.00929653	0.00929653	0.00929653	0.00929653	0.00929653	0.00929653	0.00929653	0.00929653	0.00929653	0.00929653	0.00929653	0.00929653	0.00929653	0.00929653	0.00929653
c	0.264323	0.264323	0.264323	0.264323	0.264323	0.264323	0.264323	0.264323	0.264323	0.264323	0.264323	0.264323	0.264323	0.264323	0.264323	0.264323	0.264323	0.264323	0.264323	0.264323	0.264323
sigmaE	0.769703611	0.761861	0.764081863	0.76406215	0.76191863	0.767861	0.761209583	0.74259758	0.731024963	0.7188918	0.703798963	0.68654378	0.667128863	0.6453534	0.621817263	0.59892075	0.567863363	0.5376458	0.505674683	0.47072855	0.43402983
a	-1.93E-12	-1.93E-12	-1.93E-12	-1.93E-12	-1.93E-12	-1.93E-12	-1.93E-12	-1.93E-12	-1.93E-12	-1.93E-12	-1.93E-12	-1.93E-12	-1.93E-12	-1.93E-12	-1.93E-12	-1.93E-12	-1.93E-12	-1.93E-12	-1.93E-12	-1.93E-12	-1.93E-12
b	1.35E-09	1.35E-09	1.35E-09	1.35E-09	1.35E-09	1.35E-09	1.35E-09	1.35E-09	1.35E-09	1.35E-09	1.35E-09	1.35E-09	1.35E-09	1.35E-09	1.35E-09	1.35E-09	1.35E-09	1.35E-09	1.35E-09	1.35E-09	1.35E-09
c	-3.07E-07	-3.07E-07	-3.07E-07	-3.07E-07	-3.07E-07	-3.07E-07	-3.07E-07	-3.07E-07	-3.07E-07	-3.07E-07	-3.07E-07	-3.07E-07	-3.07E-07	-3.07E-07	-3.07E-07	-3.07E-07	-3.07E-07	-3.07E-07	-3.07E-07	-3.07E-07	-3.07E-07
d	9.50E-06	9.50E-06	9.50E-06	9.50E-06	9.50E-06	9.50E-06	9.50E-06	9.50E-06	9.50E-06	9.50E-06	9.50E-06	9.50E-06	9.50E-06	9.50E-06	9.50E-06	9.50E-06	9.50E-06	9.50E-06	9.50E-06	9.50E-06	9.50E-06
e	0.00627099	0.00627099	0.00627099	0.00627099	0.00627099	0.00627099	0.00627099	0.00627099	0.00627099	0.00627099	0.00627099	0.00627099	0.00627099	0.00627099	0.00627099	0.00627099	0.00627099	0.00627099	0.00627099	0.00627099	0.00627099
f	-0.92129	-0.92129	-0.92129	-0.92129	-0.92129	-0.92129	-0.92129	-0.92129	-0.92129	-0.92129	-0.92129	-0.92129	-0.92129	-0.92129	-0.92129	-0.92129	-0.92129	-0.92129	-0.92129	-0.92129	-0.92129
g	43.5026	43.5026	43.5026	43.5026	43.5026	43.5026	43.5026	43.5026	43.5026	43.5026	43.5026	43.5026	43.5026	43.5026	43.5026	43.5026	43.5026	43.5026	43.5026	43.5026	43.5026
x	4.527668307	4.44218	4.216110132	4.043097797	3.912296587	3.814136568	3.74034231	3.683929214	3.639178145	3.601588353	3.567808702	3.535547187	3.503458765	3.471011464	3.438330811	3.406022547	3.374973638	3.346131596	3.320262087	3.297684846	3.277967885
a	3.96E-12	3.96E-12	3.96E-12	3.96E-12	3.96E-12	3.96E-12	3.96E-12	3.96E-12	3.96E-12	3.96E-12	3.96E-12	3.96E-12	3.96E-12	3.96E-12	3.96E-12	3.96E-12	3.96E-12	3.96E-12	3.96E-12	3.96E-12	3.96E-12
b	-4.28E-09	-4.28E-09	-4.28E-09	-4.28E-09	-4.28E-09	-4.28E-09	-4.28E-09	-4.28E-09	-4.28E-09	-4.28E-09	-4.28E-09	-4.28E-09	-4.28E-09	-4.28E-09	-4.28E-09	-4.28E-09	-4.28E-09	-4.28E-09	-4.28E-09	-4.28E-09	-4.28E-09
c	1.90E-06	1.90E-06	1.90E-06	1.90E-06	1.90E-06	1.90E-06	1.90E-06	1.90E-06	1.90E-06	1.90E-06	1.90E-06	1.90E-06	1.90E-06	1.90E-06	1.90E-06	1.90E-06	1.90E-06	1.90E-06	1.90E-06	1.90E-06	1.90E-06
d	-4.43E-04	-4.43E-04	-4.43E-04	-4.43E-04	-4.43E-04	-4.43E-04	-4.43E-04	-4.43E-04	-4.43E-04	-4.43E-04	-4.43E-04	-4.43E-04	-4.43E-04	-4.43E-04	-4.43E-04	-4.43E-04	-4.43E-04	-4.43E-04	-4.43E-04	-4.43E-04	-4.43E-04
e	0.0572535	0.0572535	0.0572535	0.0572535	0.0572535	0.0572535	0.0572535	0.0572535	0.0572535	0.0572535	0.0572535	0.0572535	0.0572535	0.0572535	0.0572535	0.0572535	0.0572535	0.0572535	0.0572535	0.0572535	0.0572535
f	-3.90429	-3.90429	-3.90429	-3.90429	-3.90429	-3.90429	-3.90429	-3.90429	-3.90429	-3.90429	-3.90429	-3.90429	-3.90429	-3.90429	-3.90429	-3.90429	-3.90429	-3.90429	-3.90429	-3.90429	-3.90429
g	113.565	113.565	113.565	113.565	113.565	113.565	113.565	113.565	113.565	113.565	113.565	113.565	113.565	113.565	113.565	113.565	113.565	113.565	113.565	113.565	113.565
y	3.977978056	3.90161	3.708309117	3.567729221	3.462957384	3.3810625	3.312494812	3.250530052	3.190758169	3.130616671	3.068968555	3.005724844	2.941511728	2.8773823	2.814572894	2.754304023	2.697625925	2.645308698	2.597777044	2.550089612	2.51696294
a	2.32E-09	2.32E-09	2.32E-09	2.32E-09	2.32E-09	2.32E-09	2.32E-09	2.32E-09	2.32E-09	2.32E-09	2.32E-09	2.32E-09	2.32E-09	2.32E-09	2.32E-09	2.32E-09	2.32E-09	2.32E-09	2.32E-09	2.32E-09	2.32E-09
b	-9.76E-07	-9.76E-07	-9.76E-07	-9.76E-07	-9.76E-07	-9.76E-07	-9.76E-07	-9.76E-07	-9.76E-07	-9.76E-07	-9.76E-07	-9.76E-07	-9.76E-07	-9.76E-07	-9.76E-07	-9.76E-07	-9.76E-07	-9.76E-07	-9.76E-07	-9.76E-07	-9.76E-07
c	9.94E-05	9.94E-05	9.94E-05	9.94E-05	9.94E-05	9.94E-05	9.94E-05	9.94E-05	9.94E-05	9.94E-05	9.94E-05	9.94E-05	9.94E-05	9.94E-05	9.94E-05	9.94E-05	9.94E-05	9.94E-05	9.94E-05	9.94E-05	9.94E-05
d	0.0011173	0.0011173	0.0011173	0.0011173	0.0011173	0.0011173	0.0011173	0.0011173	0.0011173	0.0011173	0.0011173	0.0011173	0.0011173	0.0011173	0.0011173	0.0011173	0.0011173	0.0011173	0.0011173	0.0011173	0.0011173

EXPLOITATION DES PICS DE BRAGG EXPÉRIMENTAUX

- Conversion des courbes en ionisation en courbe en dose (TRS398)
- Normalisation par rapport au maximum de dose
- Interpolation linéaire (fonctions `make_interp_spline` et `ppoly`, bibliothèque `scipy`) et extraction des paramètres d'intérêt (`R80P`, `R90D`, `R80D`, etc.) (fonction `roots`, bibliothèque `scipy`)



AJUSTEMENT DE L'ÉNERGIE ET DE LA DISPERSION EN ÉNERGIE

► Construction de la simulation GATE

- Géométrie :

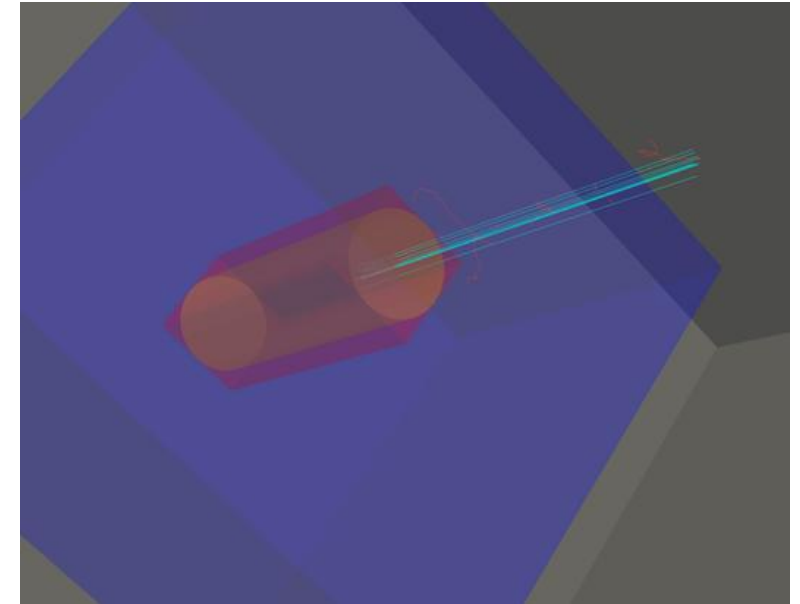
- Cuve à eau de 67.5 cm x 64.5 cm x 56.0 cm
- Cylindre d'eau de 12 cm de diamètre (diamètre de la chambre Stingray)

- 5 maillages de 12 cm x 12 cm x 0.1 cm voxels (décalés de 0.2 mm suivant z) superposés sur la géométrie (dose absorbée dans l'eau)

- Physics list: QGSP_BIC_HP_EMZ

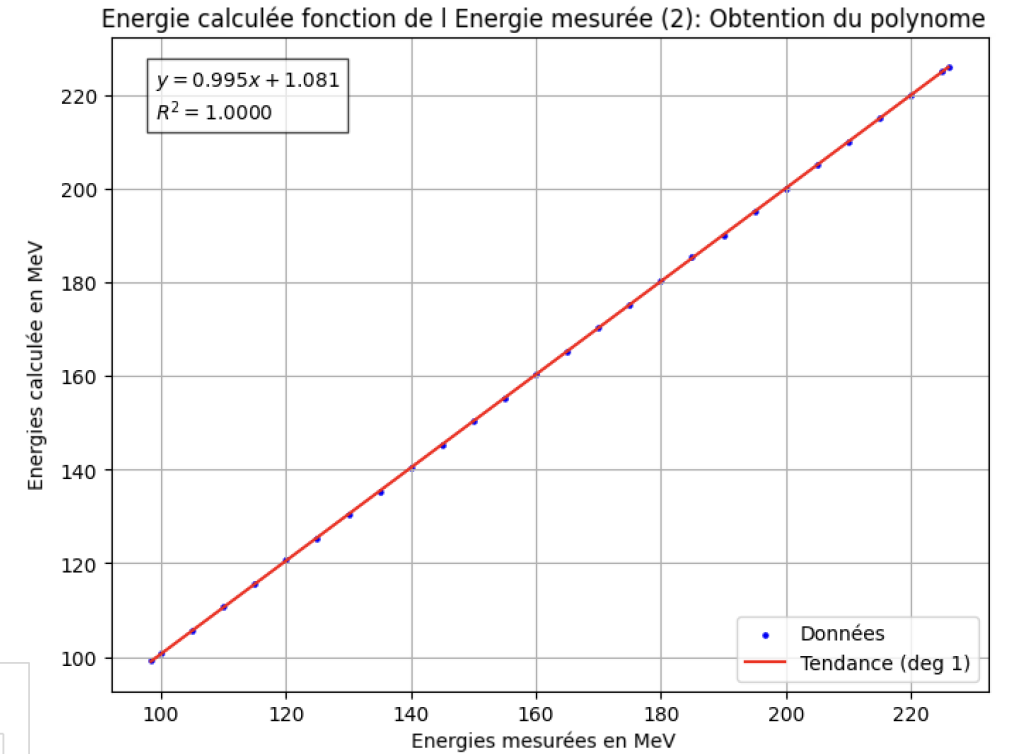
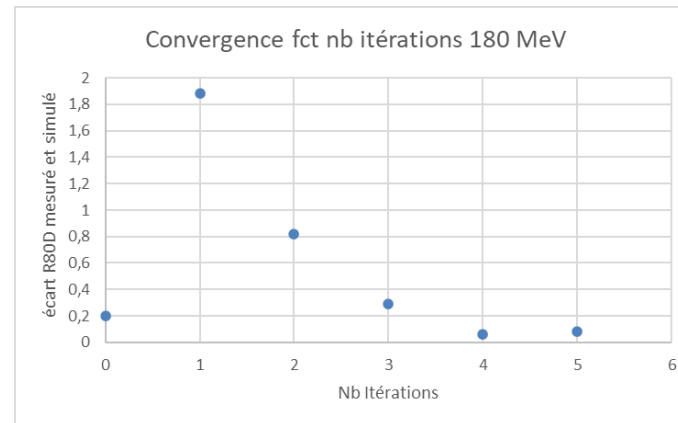
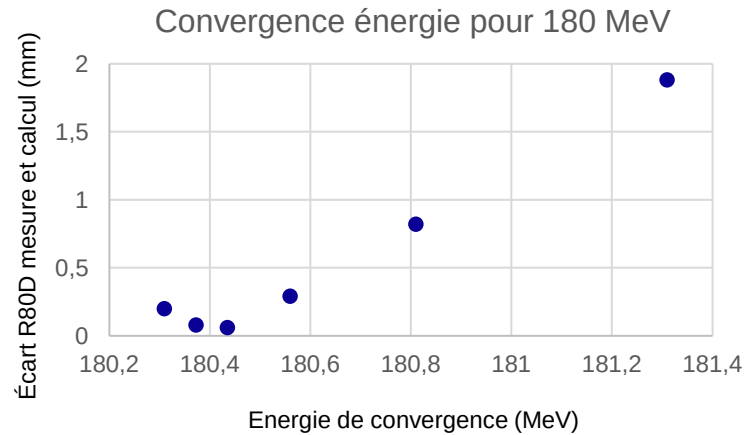
- Nombre de particules : 1 000 000 (incertitude statistique de l'ordre de 0,1% au niveau du pic de Bragg)

- Source PBS: utilisation des données du CAL comme valeurs par défaut pour la source



AJUSTEMENT DE L'ÉNERGIE

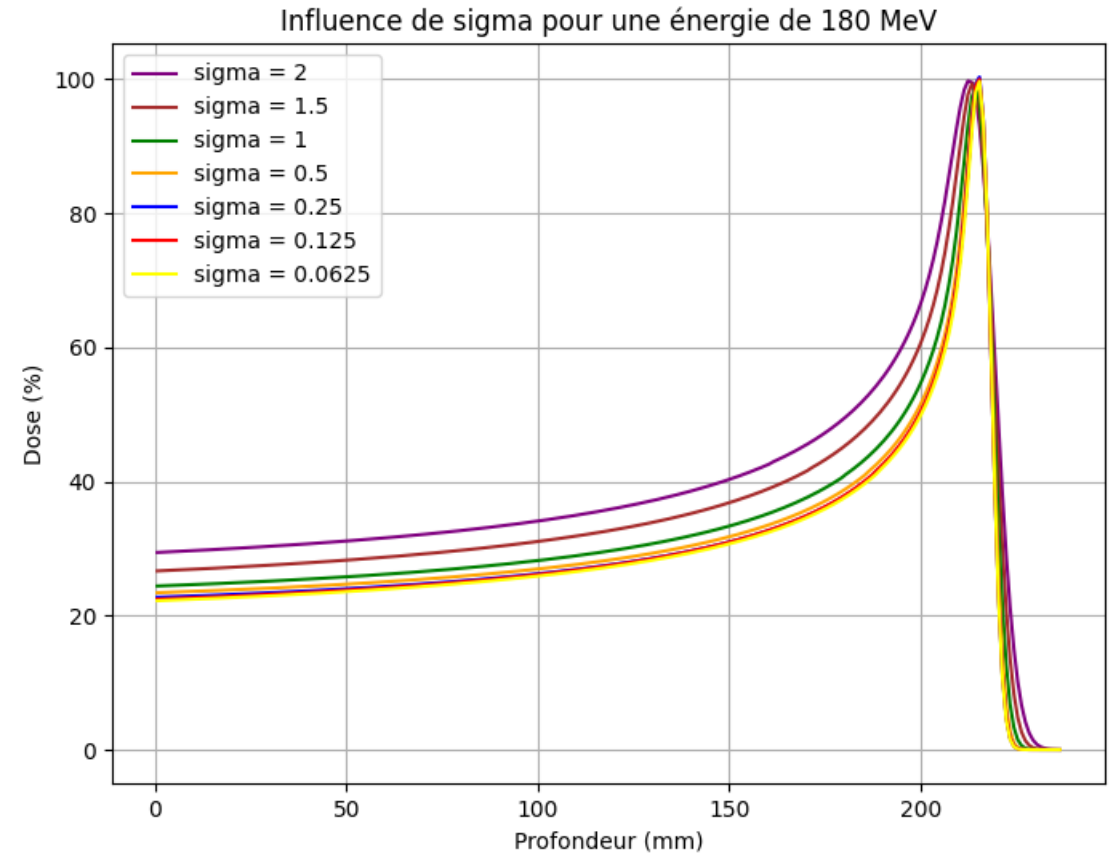
- Energie première simulation: énergie obtenue avec polynôme CAL
- Plage d'énergie considérée: $E_{\text{CAL}} - 1 \text{ MeV} < E < E_{\text{CAL}} + 1 \text{ MeV}$
- Energie ajustée par dichotomie
- Critère: $|R80D_{\text{mes}} - R80D_{\text{sim}}| < 0.2 \text{ mm}$ OU 10 itérations max



AJUSTEMENT DE L'ÉTALEMENT EN ÉNERGIE : ANALYSE DE SENSIBILITÉ

► Influence de l'étalement en énergie sur l'allure du pic de Bragg :

- augmentation de la largeur du pic à 80% lorsque σ augmente
- augmentation de la dose au niveau du plateau lorsque σ augmente
- pas de variation du R80D lorsque σ augmente



AJUSTEMENT DE L'ÉTALEMENT EN ÉNERGIE

► Critères d'ajustement dans la littérature

Grevillot et al. (2011)

MeV resolution. The best energy spread was determined by evaluating the dose-to-peak and mean point-to-point dose differences. The dose-to-peak difference corresponds to the percentage of difference between measurement and simulation for the maximum dose point. The mean point-to-point deviation was evaluated using the following equation:

$$\epsilon = \sum_{i=1}^N \left(\frac{|d_i - d_{ref_i}|}{d_{ref_i}} \times \frac{\Delta_i}{L} \right), \quad (3)$$

where ϵ is the mean point-to-point dose deviation, i corresponds to a given curve point, N is the number of points evaluated, Δ_i is the distance between two consecutive points, L is the integration length and corresponds to the distance between the first measured point and the range, d_i and d_{ref_i} are the evaluated and reference doses, respectively. Eventually, a third-order

Fuchs et al. (2020)

For range and peak assessment, laterally integrated depth dose curves (IDC) in water were used. The beam range, defined at 80% of the intensity maximum beyond the peak (R_{80}) as well as the peak width at 50% (BPW_{50}) and 80% (BPW_{80}) of the peak maximum were determined using linear interpolation. For optimization of beam energy and energy distribution, the R_{80} and the BPW_{80} parameter were considered, respectively. The BPW_{50} was only used for evaluation.

Aitkenhead et al. (2020)

- (2) The distance between the proximal and distal 80% points on the IDD. This allows E_{std} to be tuned.
- (3) The ratio between the maximum dose at the Bragg peak and the dose at the 2 cm reference point. This allows E_{std} to be tuned.

► Critère utilisé : $\Delta R_{80} = |R_{80_P} - R_{80_D}|$

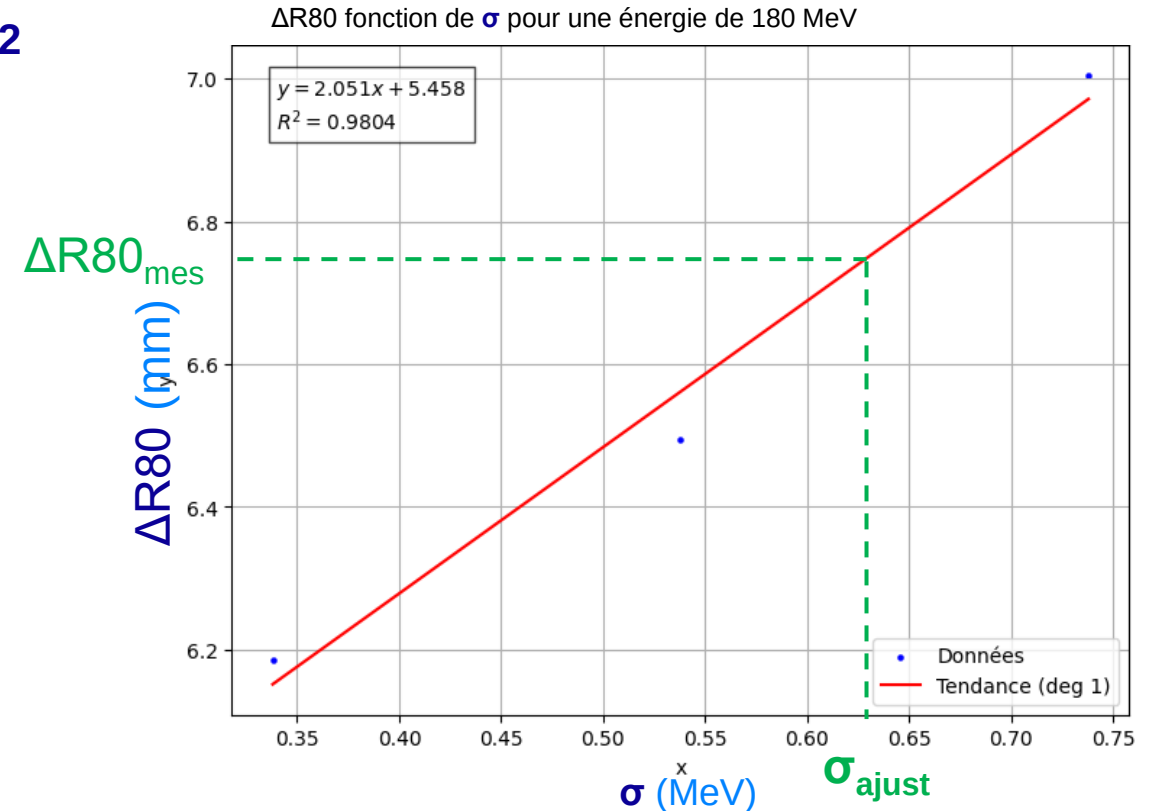
AJUSTEMENT DE L'ÉTALEMENT EN ÉNERGIE

► Pour chaque énergie :

- Simulation du pic de Bragg pour 3 valeurs de σ : $\sigma_{E,CAL} - 0.2$ MeV ; $\sigma_{E,CAL}$; $\sigma_{E,CAL} + 0.2$ MeV
- Détermination du $\Delta R80$ associé à chaque valeur de σ
- Fit des points pour obtenir une courbe de tendance :

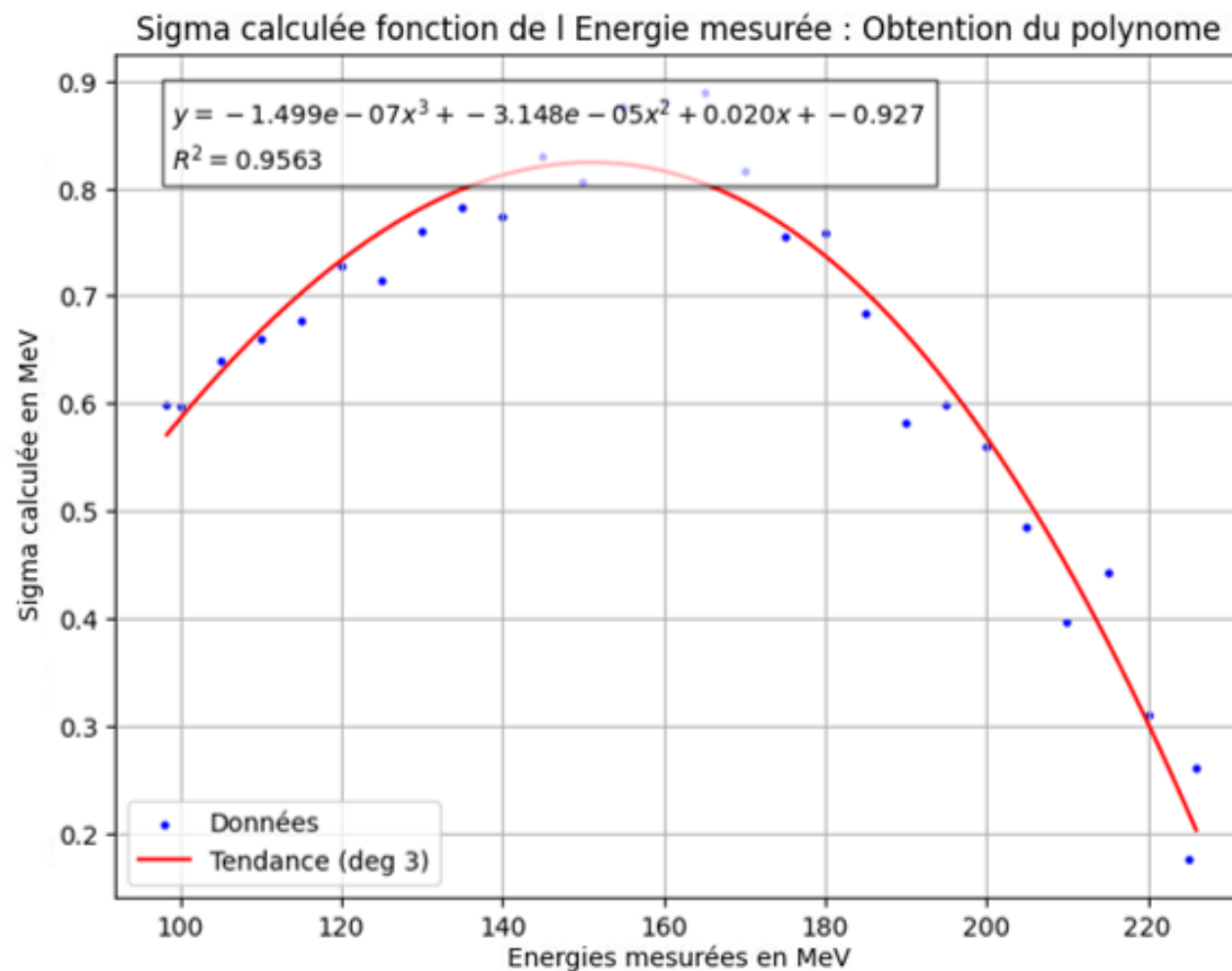
$$\Delta R80_{sim} = f(\sigma)$$

- A partir de la courbe détermination du σ correspondant à $\Delta R80_{mes}$: $\sigma_{ajust} = f^{-1}(\Delta R80_{mes})$
- Simulation du pic de Bragg avec cette valeur de σ



AJUSTEMENT DE L'ÉTALEMENT EN ÉNERGIE

Résultats préliminaires:



CONCLUSION ET PERSPECTIVES

- Modélisation de la source du ProteusOne du CFB
 - Ajustement de l'énergie
 - Ajustement de l'étalement en énergie
-
- Validation de l'ajustement en énergie
 - Ajustement des paramètres optiques
 - Validation du modèle Monte-Carlo du ProteusOne du CFB

MERCI POUR VOTRE ATTENTION

MATÉRIEL

- ▶ PC windows intel core i5 / macbook M3 10 CPU
- ▶ Simulation sous machine virtuelle Ubuntu (PC windows) via VMware Workstation
- ▶ Accès au cluster de l'ASNR (FARUX)

- ▶ Opengate v10 fonctionnant sous python 3.12



- Bibliothèques python utilisées : numpy / matplotlib / pandas / random / scipy / SimpleITK / sklearn / opengate
- Fonctions : interp1d / curve_fit / UnivariateSpline / make_interp_spline / Ppoly

VMware Workstation Player



OpenGATE/Gate

Official public repository of Gate



68 Contributors 102 Issues 9 Discussions 252 Stars 277 Forks