

Etude des Neutrons Secondaires en Radiothérapie RX de Haute Energie

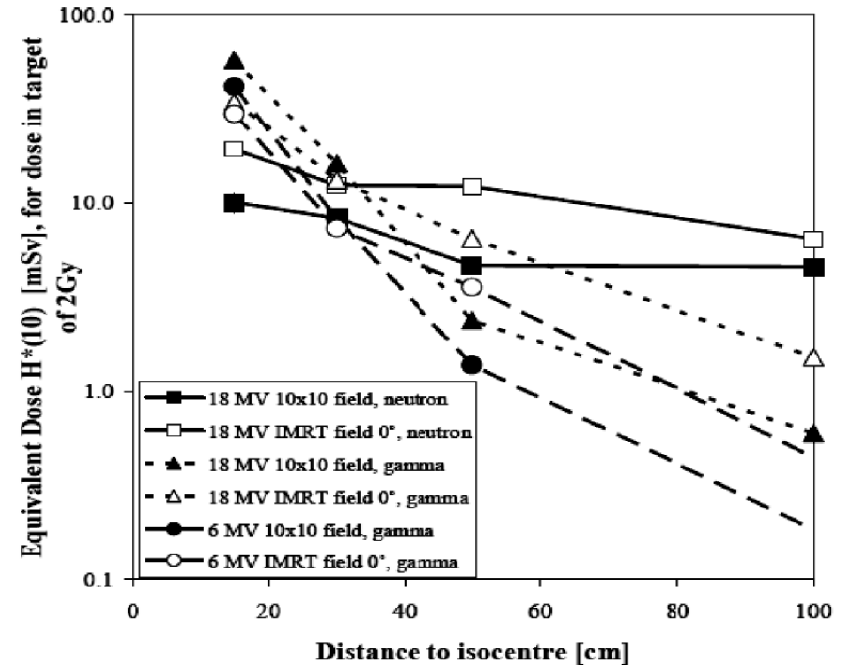
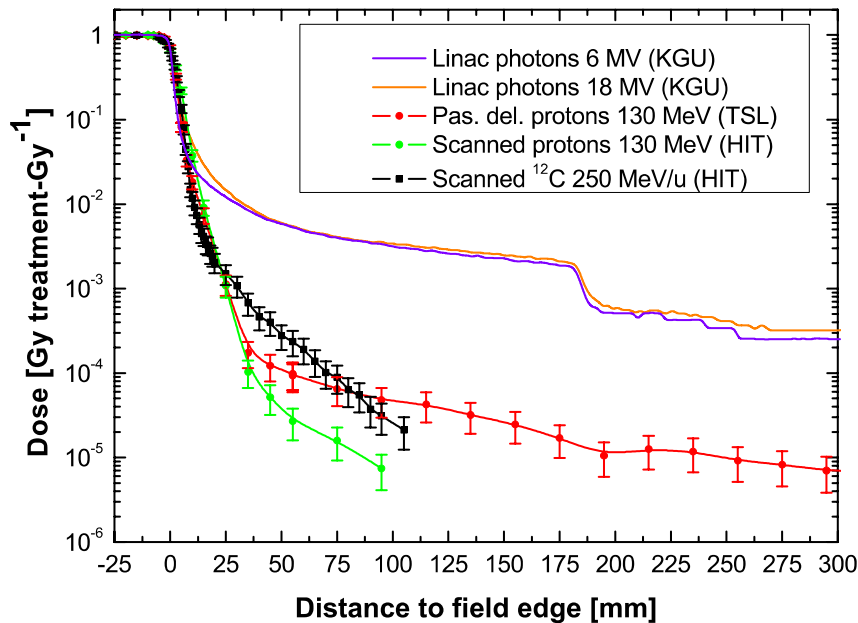
H. Elazhar, N. Arbor, T. Deschler, J.M. Létang, P. Meyer, A. Nourreddine

Plan

- ❑ Production des neutrons secondaires en salle de traitement
- ❑ Etude expérimentale et par simulation de l'influence de la taille du champ sur la production des neutrons secondaires
- ❑ Algorithme Monte Carlo pour le calcul de dose

Dose en Radiothérapie

- 3 composantes de dose :
 - Primaire : Dose photons volume cible
 - Secondaire : Photons diffusés, neutrons
 - Imagerie de contrôle
- Dose neutron prépondérante à partir de 50 cm de l'isocentre



Dose hors-champ
(R. Kaderka, *Phys. Med. Biol.*, 2012)

Dose photon vs neutron : 6 MV et 18 MV traitement prostate IMRT pour différentes tailles de champ et angulation
(Vanhavere et al, *Radiat Prot Dosimetry*, 2004)

Photoneutrons : production

- Réaction photonucléaire : ${}^A X(\gamma, n){}^{A-1} X$ or ${}^A X(\gamma, 2n){}^{A-2} X$
- Seuil de production dans les matériaux de la tête de l'accélérateur :

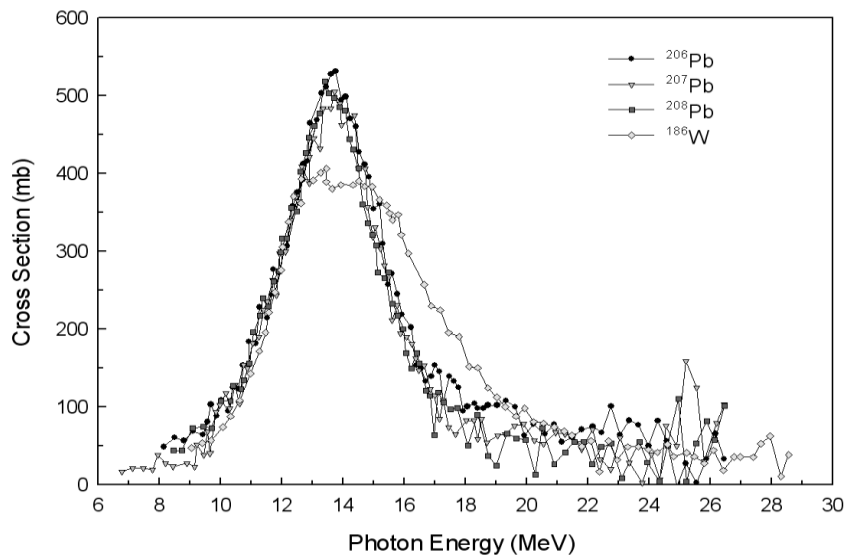
Al : ~13 MeV

Fe : ~11 MeV

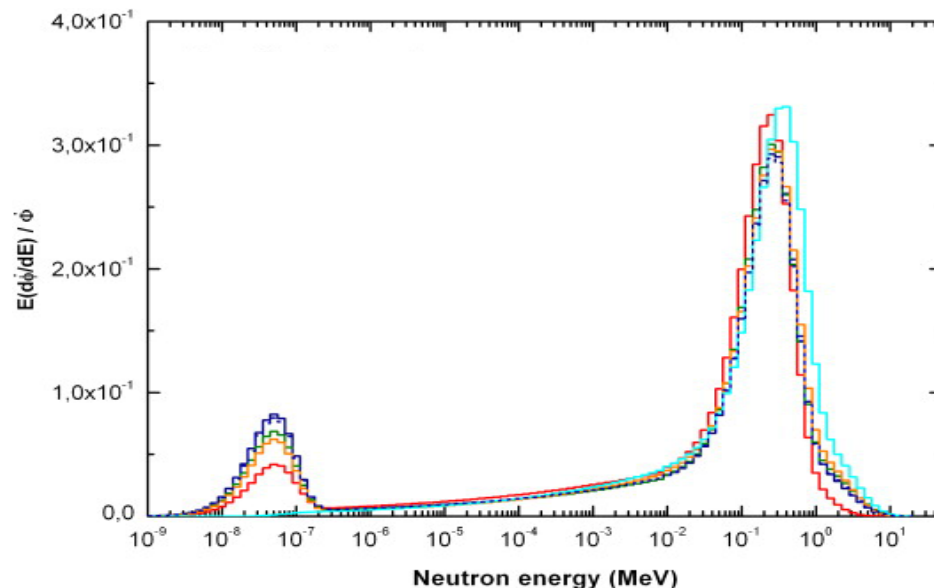
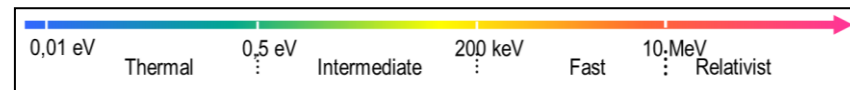
Cu : ~10 MeV

Au : ~8 MeV

W, Pb : ~6,5 MeV



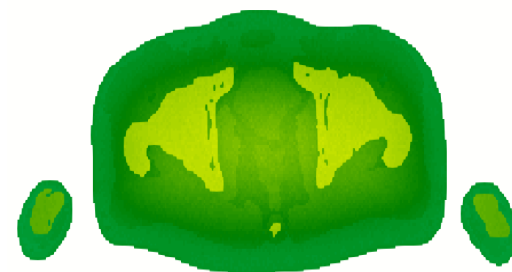
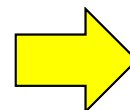
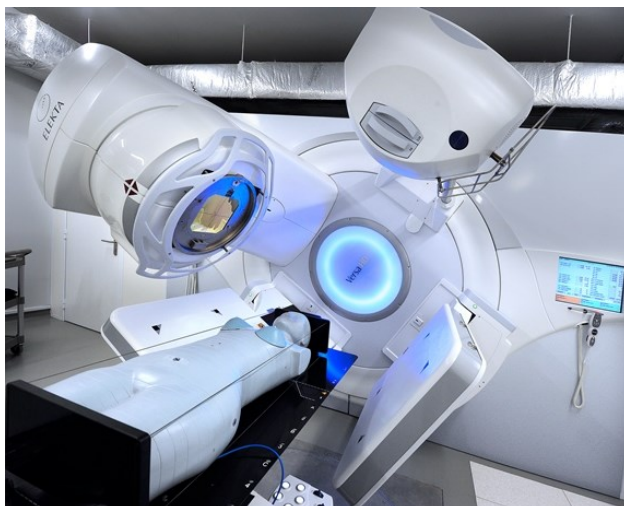
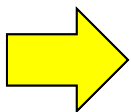
Section efficace photo-nucléaire : ${}^{186}\text{W}$, ${}^{206}\text{Pb}$, ${}^{207}\text{Pb}$ and ${}^{208}\text{Pb}$
trouvés dans la tête d'un LINAC
(*Berman, 1975*)



Spectre de neutrons en salle de traitement
(*C. Domingo et al, Radiation measurements, 2010*)

Objectifs

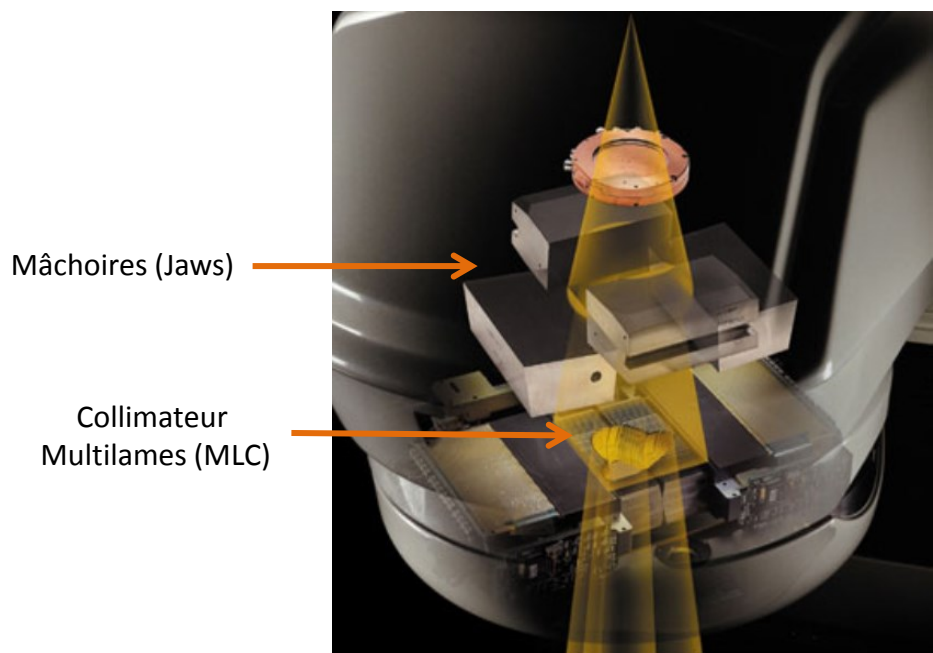
- ➔ Influence de la taille du champ en RT sur la production de neutrons (Varian Novalis Tx, Centre Paul Strauss Strasbourg)
- ➔ Développement d'un code MC pour calcul de dose neutron



Paramètres d'influence sur la production des neutrons secondaires

Production des neutrons secondaires en RT

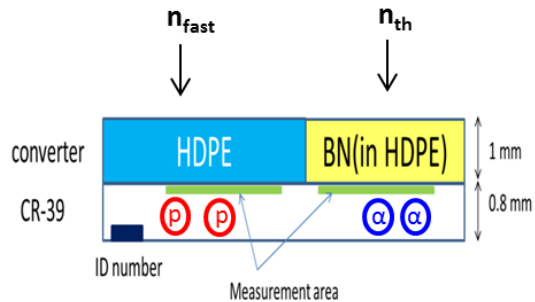
- Modulation d'intensité en RT = Variation taille de champ + Rotation tête pendant l'irradiation
→ Influence sur la production des neutrons secondaires
- Etude par :
 - Simulation MC : Modélisation de la tête de l'accélérateur Novalis Tx avec Gate/Geant4
 - Expérience : détecteur actif vs passif



Qualité du faisceaux [MV]	15
Débit de dose [UM.min⁻¹]	600
UM [run⁻¹]	3000
Angulation tête [°]	0/90
Distance de l'isocentre [cm]	0/62
Configuration Mâchoires/MLC [cm²]	40x40 20x20 / 22x22 10x10 2x2 0,5x0,5

Détecteurs à neutrons

- **Détecteur passif : CR-39**

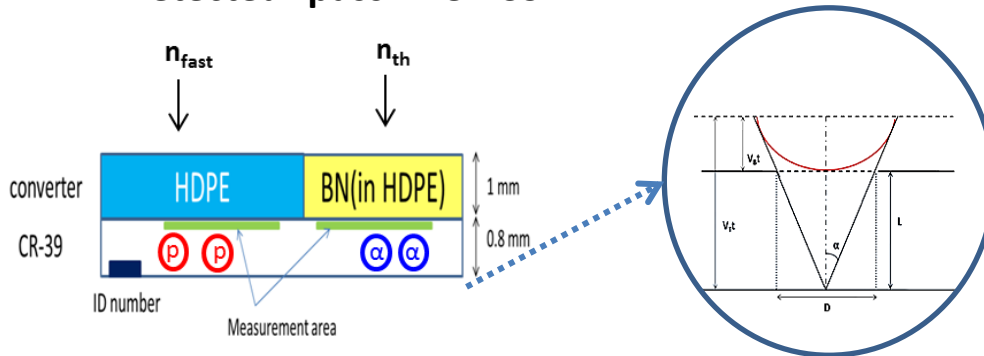


✓ **Conversion des neutrons en :**

- Protons (n_{fast} , PE)
- α 1,4 MeV (n_{th} , BN)

Détecteurs à neutrons

- **Détecteur passif : CR-39**



- ✓ **Conversion des neutrons en :**

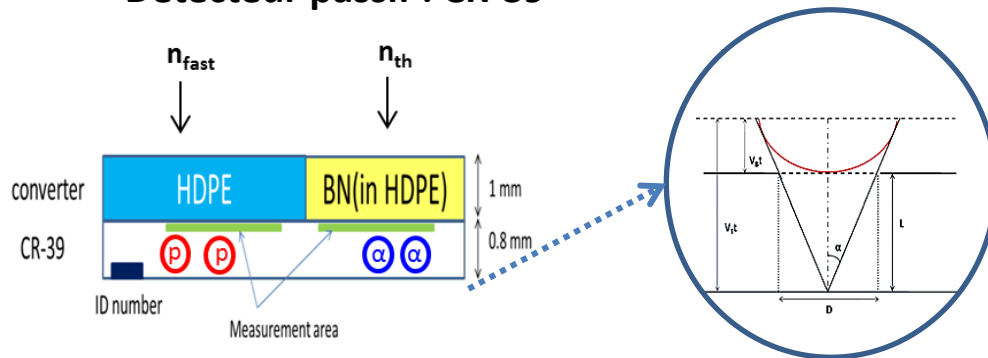
- Protons (n_{fast} , PE)
- α 1,4 MeV (n_{th} , BN)

- ✓ **Transfert d' énergie des particules ionisantes aux e- du milieu**

→ formation de traces dues aux dégâts moléculaires le long du trajet de la particule

Détecteurs à neutrons

- **Détecteur passif : CR-39**



- ✓ **Conversion des neutrons en :**

- Protons (n_{fast} , PE)
- α 1,4 MeV (n_{th} , BN)

- ✓ **Transfert d' énergie des particules ionisantes aux e- du milieu**

→ formation de traces dues aux dégâts moléculaires le long du trajet de la particule

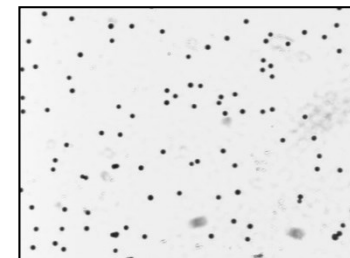
- ✓ **Traitement**



Développement chimique
KOH (90°, 2,5h, 30%)



Lecture
Microscope
optique

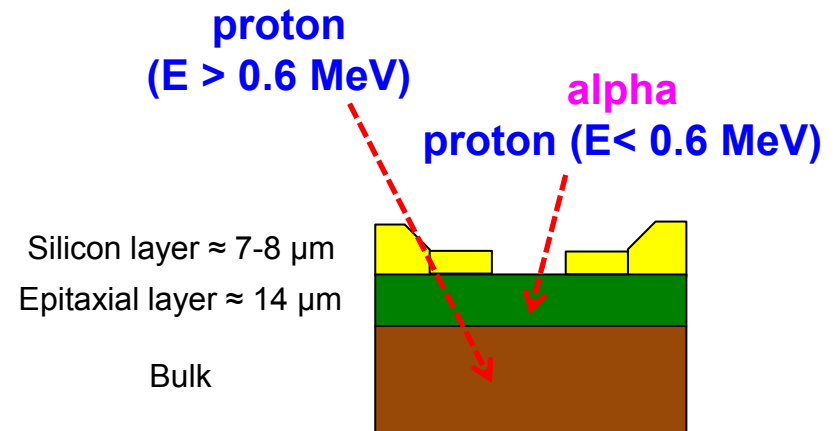
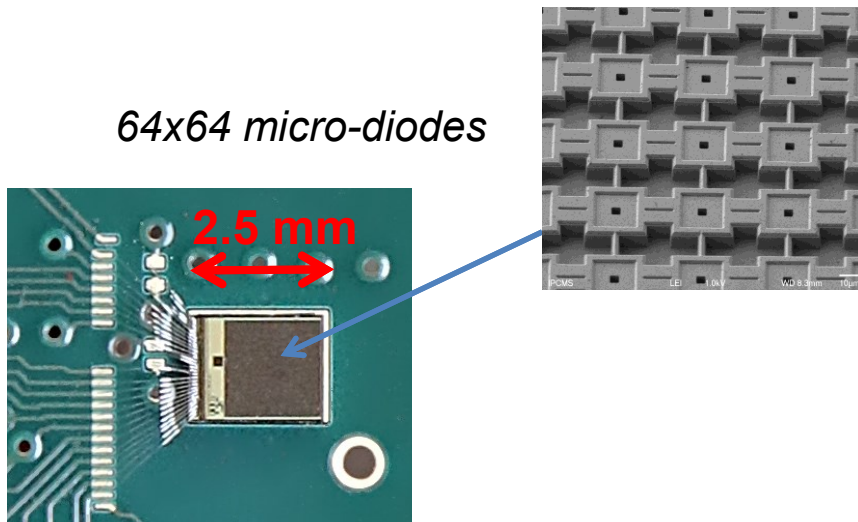


Détecteurs à neutrons

- **Détecteur actif : CMOS**

- Compact et simple d'utilisation (temps réel, électronique intégrée, faible consommation d'énergie)

- Détection neutrons rapides et thermiques (p et α de recul)



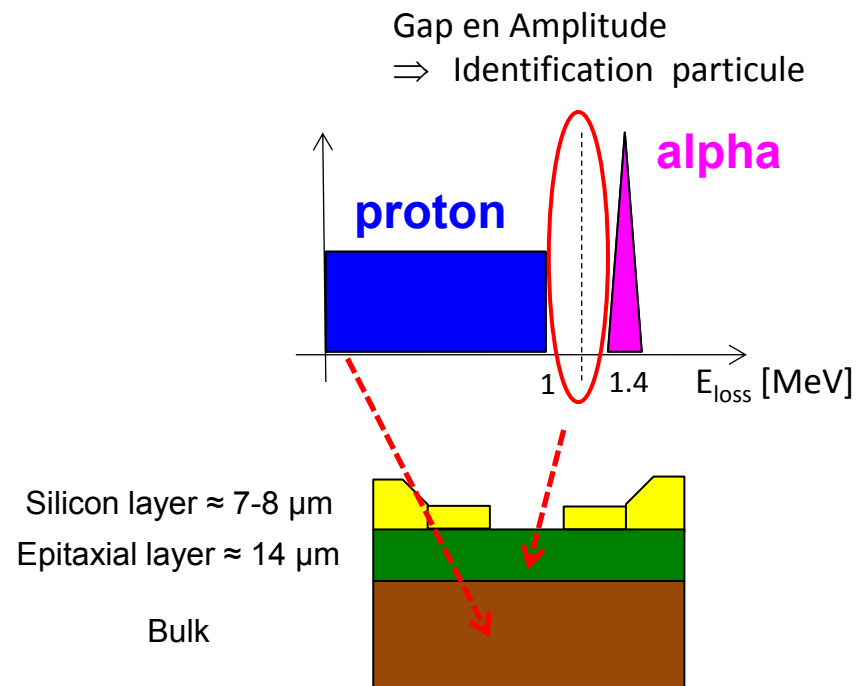
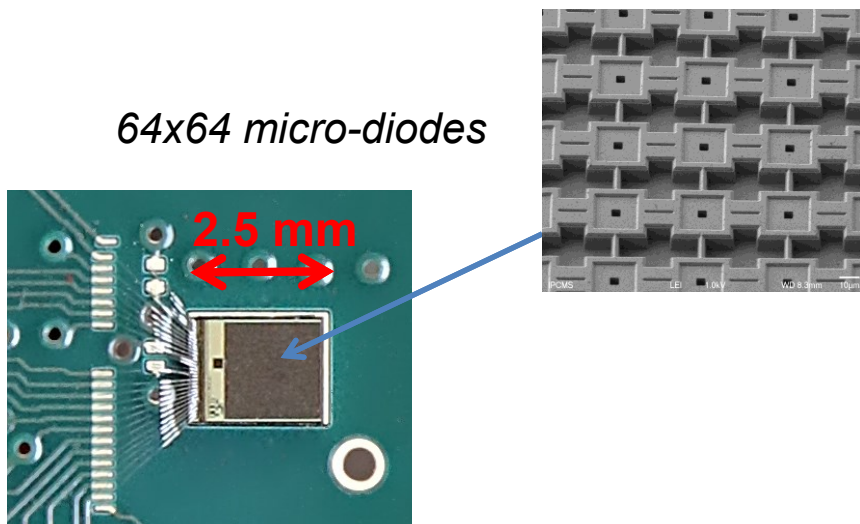
Détecteurs à neutrons

- **Détecteur actif : CMOS**

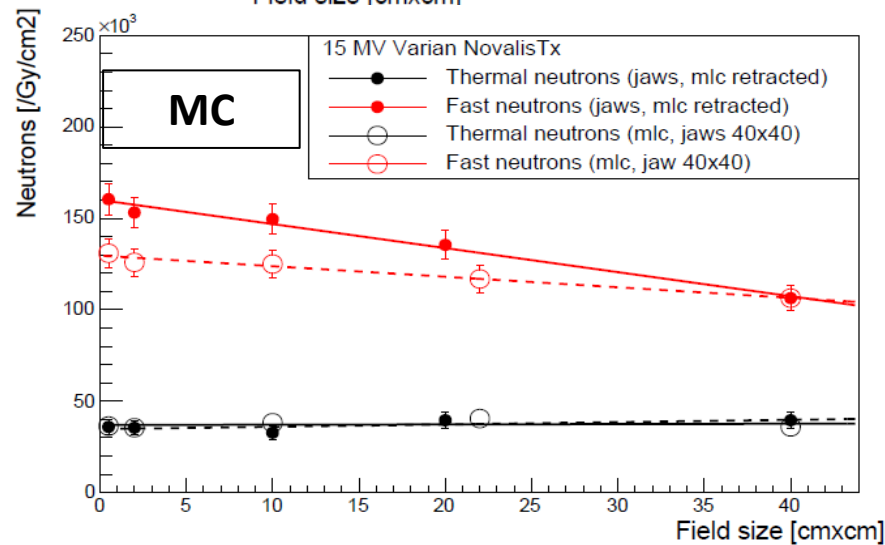
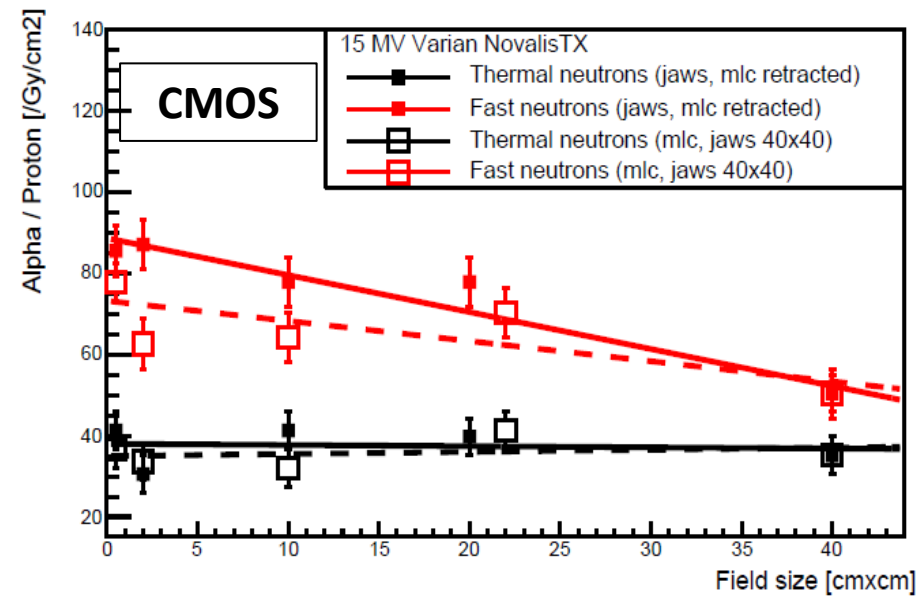
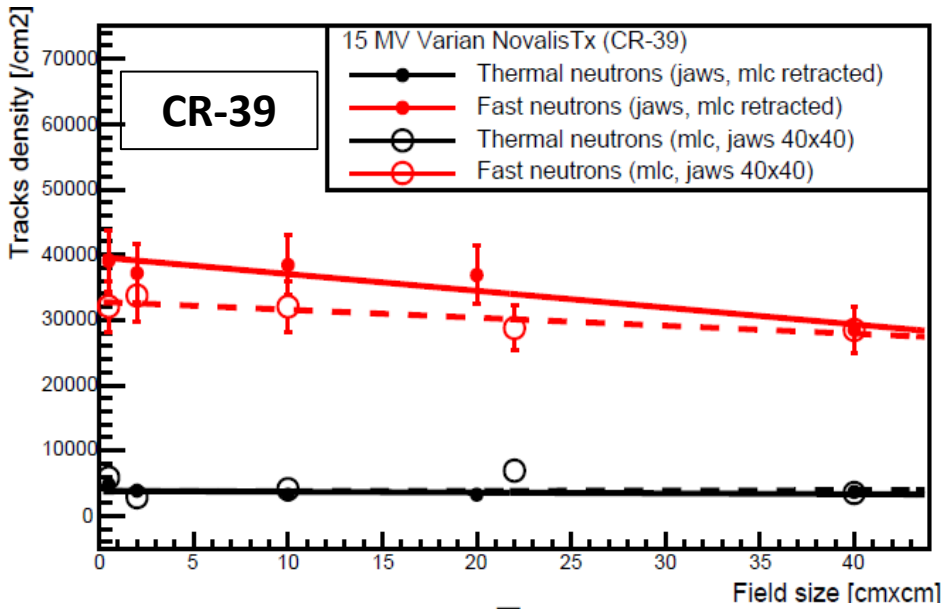
- Compact et simple d'utilisation (temps réel, électronique intégrée, faible consommation d'énergie)

- Détection neutrons rapides et thermique (p et α de recul)

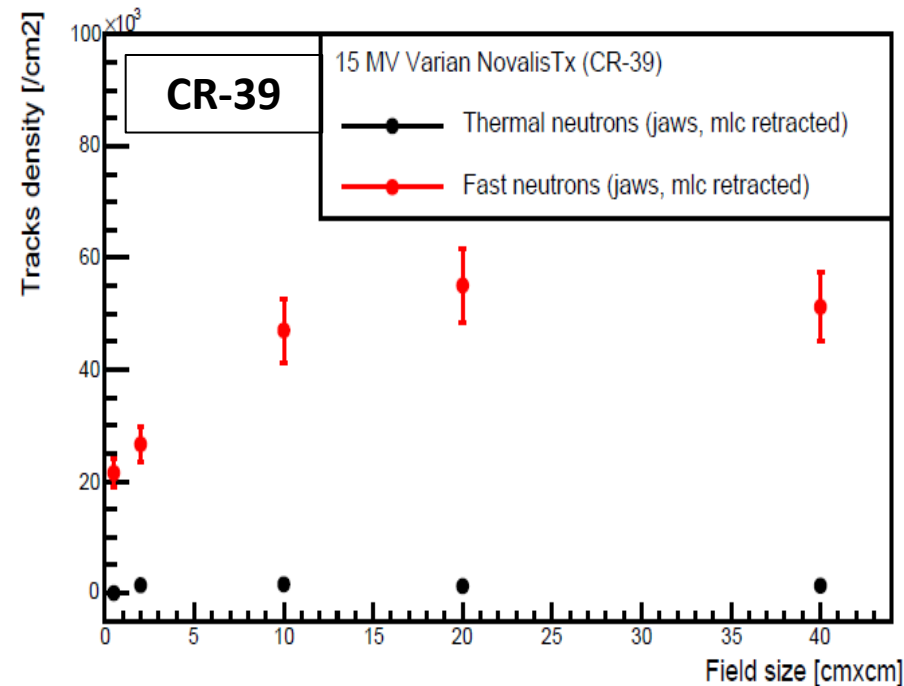
- Perte d'énergie max des protons ≈ 1 MeV



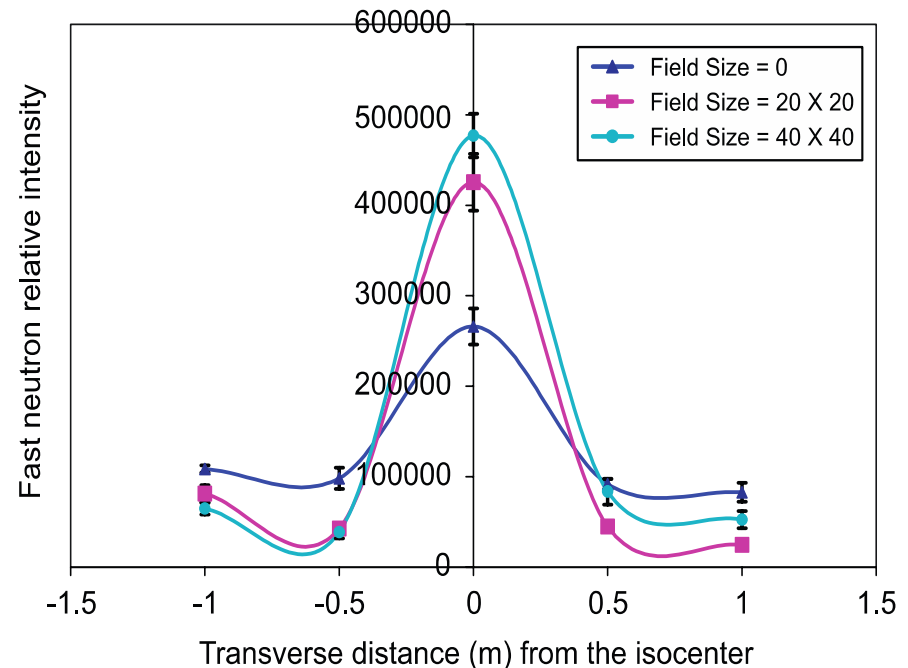
Résultats : Mâchoires et MLC



Résultats : Mâchoires et MLC (Isocentre)



Neutrons production as a function of field size at the isocenter
(*N. Arbor et al, Phys. Med. Biol., 2017*)



Proton track density produced from fast neutrons as a function of transversal distance from the isocenter of linear accelerator and field size
(*Al Ghamdi et al, Radiation Measurement, 2008*)

- ✓ Corrélation opposée entre production des neutrons rapides à l'isocentre et en périphérie en fonction de la taille de champ
- ✓ Production des neutrons rapides dépend de taille du champ et de la position à l'isocentre

Conclusion

- ❖ **Neutrons rapides :**

- Dépendants de la taille du champ et de la distance de l'isocentre

- ❖ **Neutrons thermiques :**

- Indépendants de la taille du champ et de la distance de l'isocentre

- ❖ **Capteur CMOS :**

- Information flux CMOS : simulation MC pour calcul de dose

Conclusion

- ❖ **Neutrons rapides :**

- Dépendants de la taille du champ et de la distance de l' isocentre

- ❖ **Neutrons thermiques :**

- Indépendants de la taille du champ et de la distance de l' isocentre

- ❖ **Capteur CMOS :**

- Information flux CMOS : simulation MC pour calcul de dose

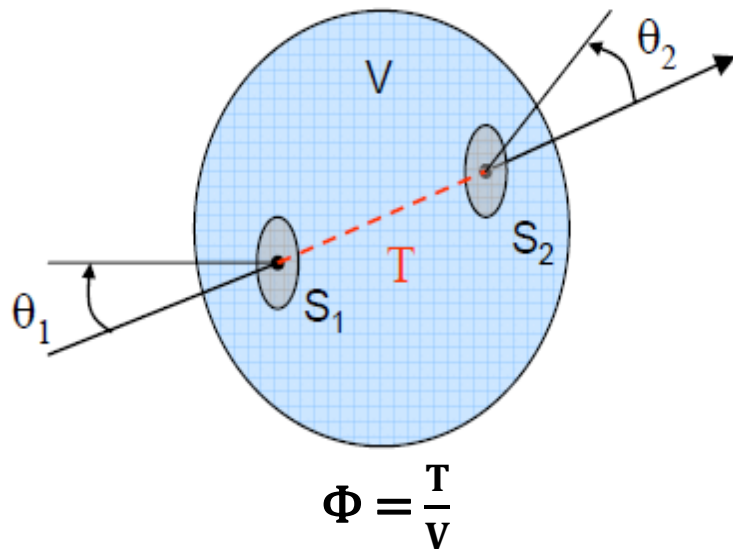
Calcul de dose neutron dans GATE :

- 500 h de calcul (1 CPU), 5% d'erreur statistique (voxel: 40 mm³, épaisseur fantôme : 10 cm)
- Développement d'une méthode de réduction de variance pour accélération du calcul de dose neutron

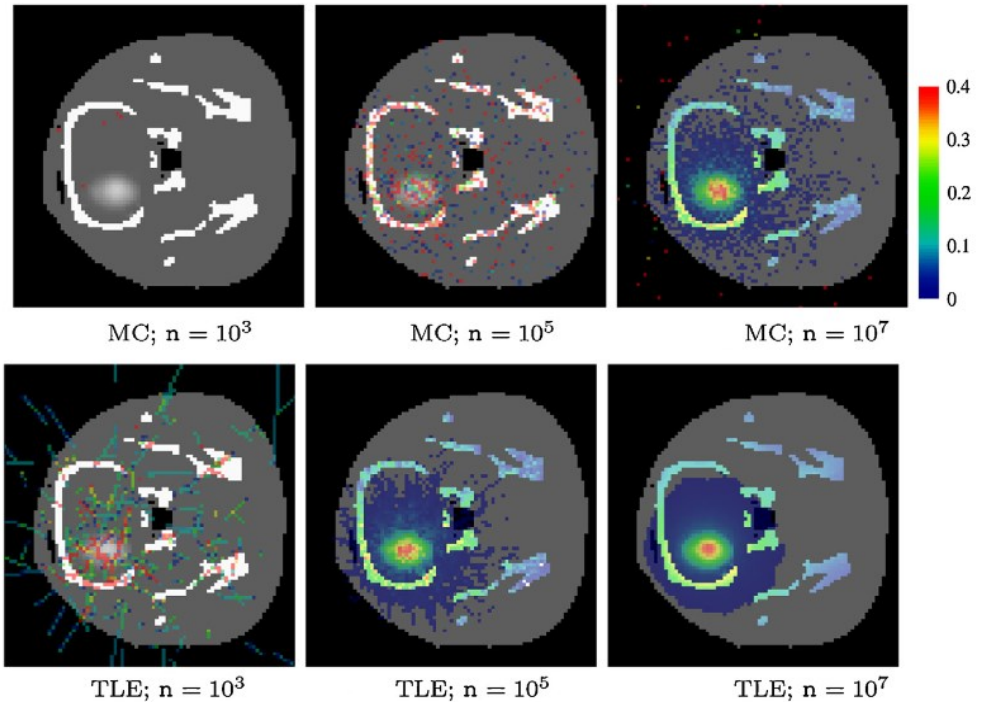
Algorithme MC pour le calcul de dose

Méthode du TLE (GATE)

- Méthode du TLE : Track Length Estimator
- Dépôt continu d'énergie dans tous les voxels rencontrés entre points d'interactions successifs
- Electrons secondaires pas suivis : dépôt local d'énergie dans le voxel

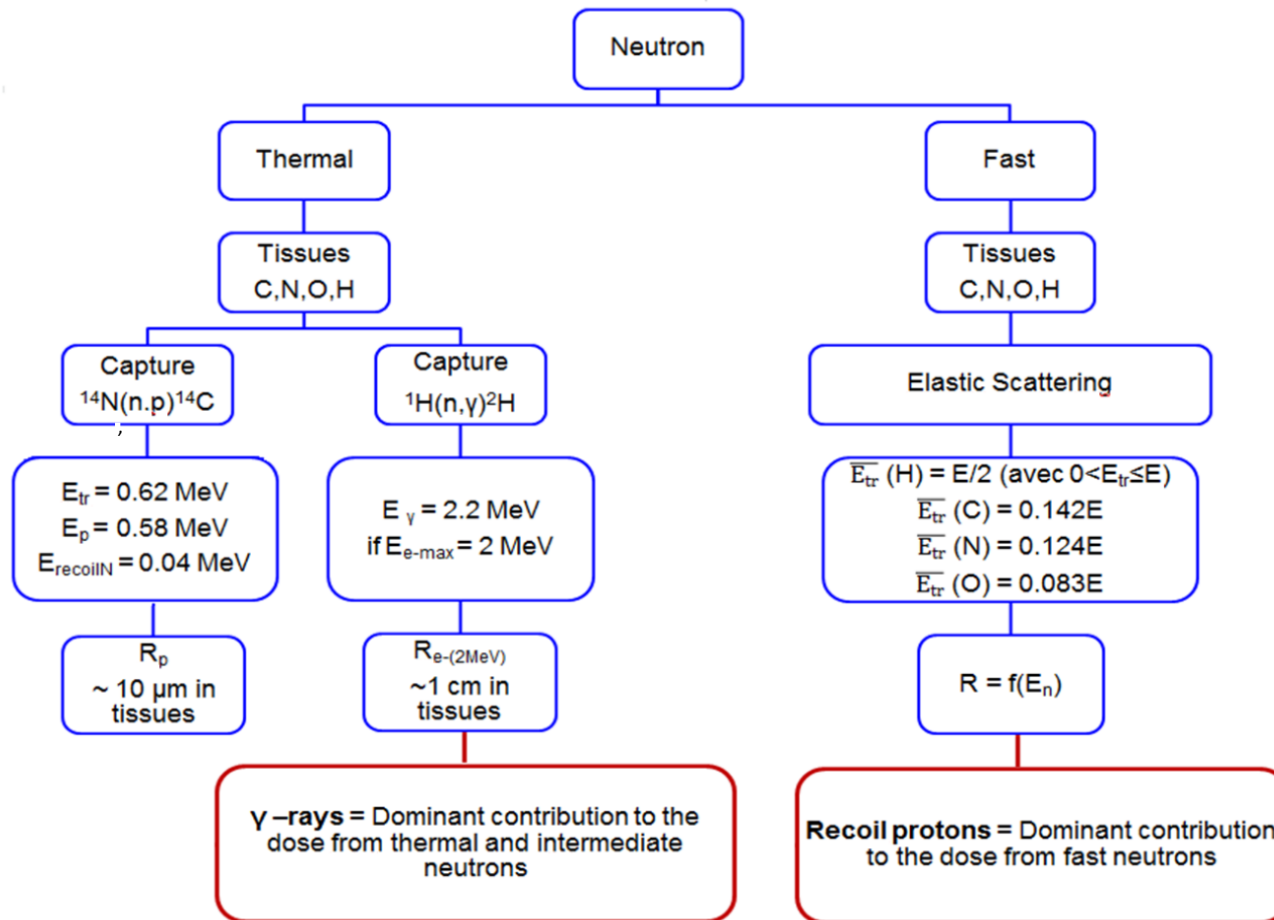


$$D_{\gamma} = \Phi \cdot E \cdot \frac{\mu_{en}}{\rho}$$



Dose maps of an irradiated rat head in SSRT test case
(*F. Baldacci et al. Z Med Phys. (2014)*)

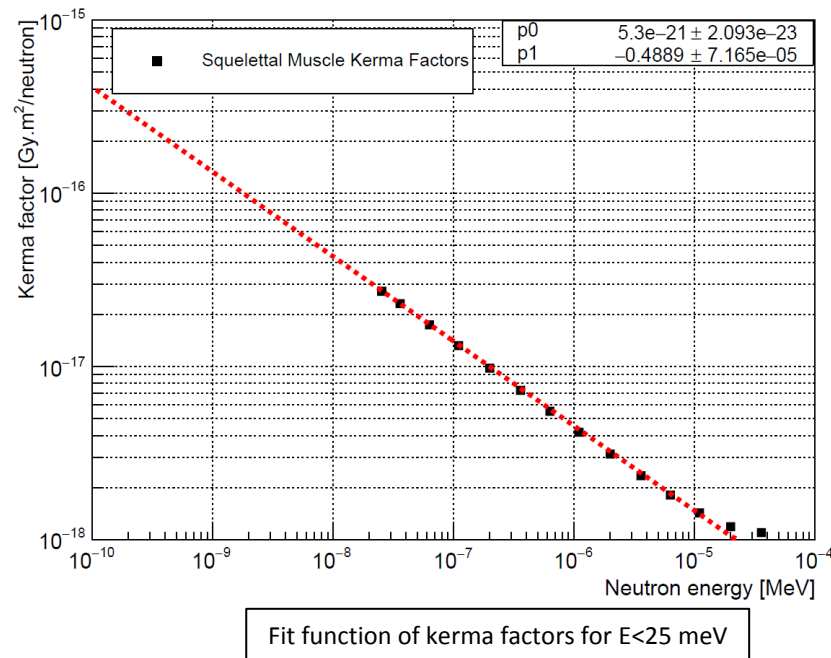
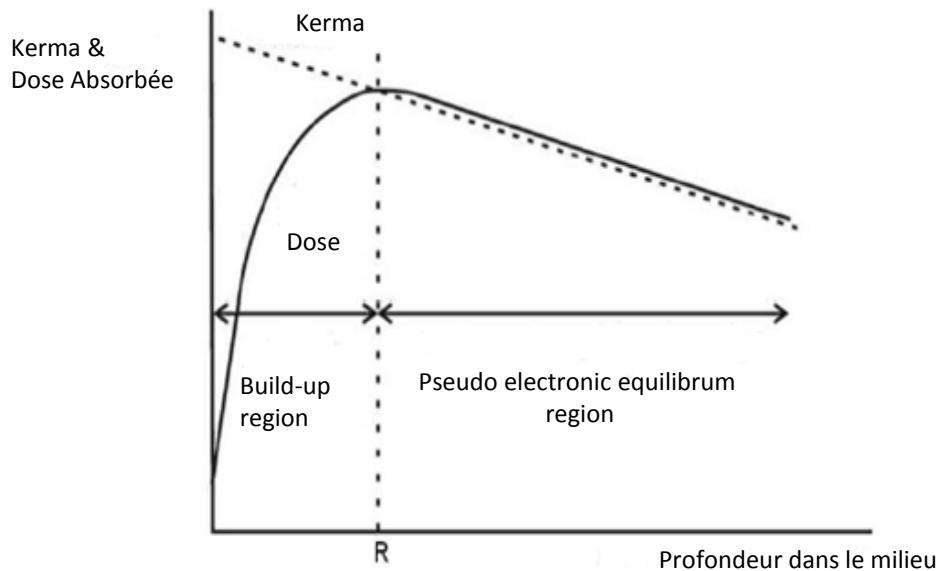
Dépôt de Dose : Particules secondaires produites



- ✓ Approximation dépôt local de dose → erreur spatiale sur calcul de dose neutron avec TLE :
 - Erreur moyenne de 5 mm pour neutrons thermique
 - Erreur moyenne < 1 mm pour neutrons rapides

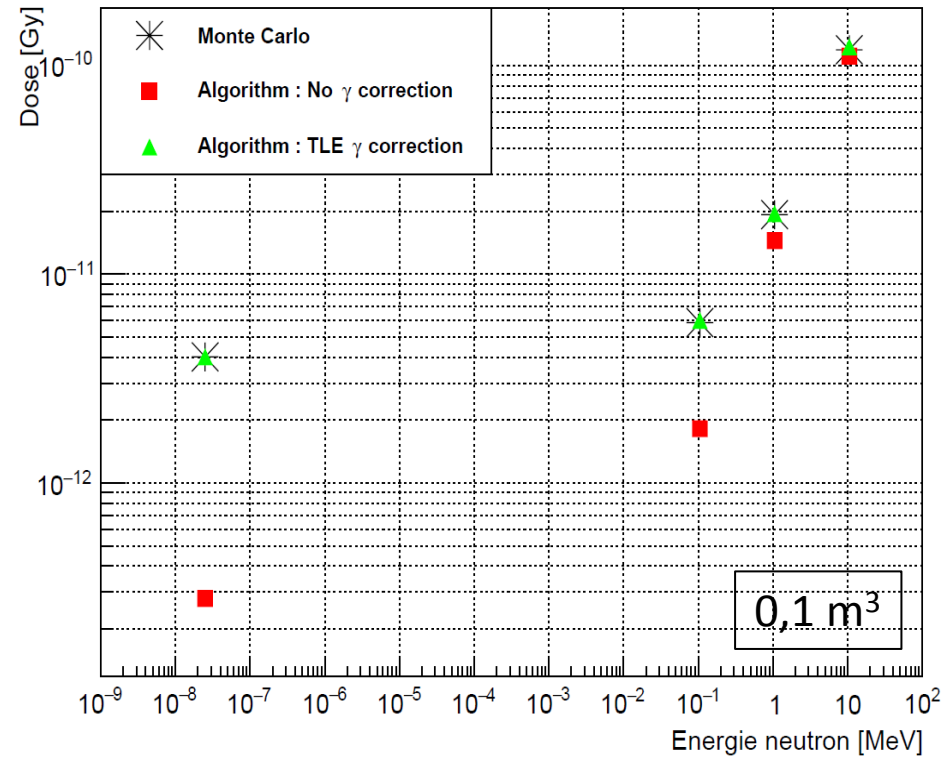
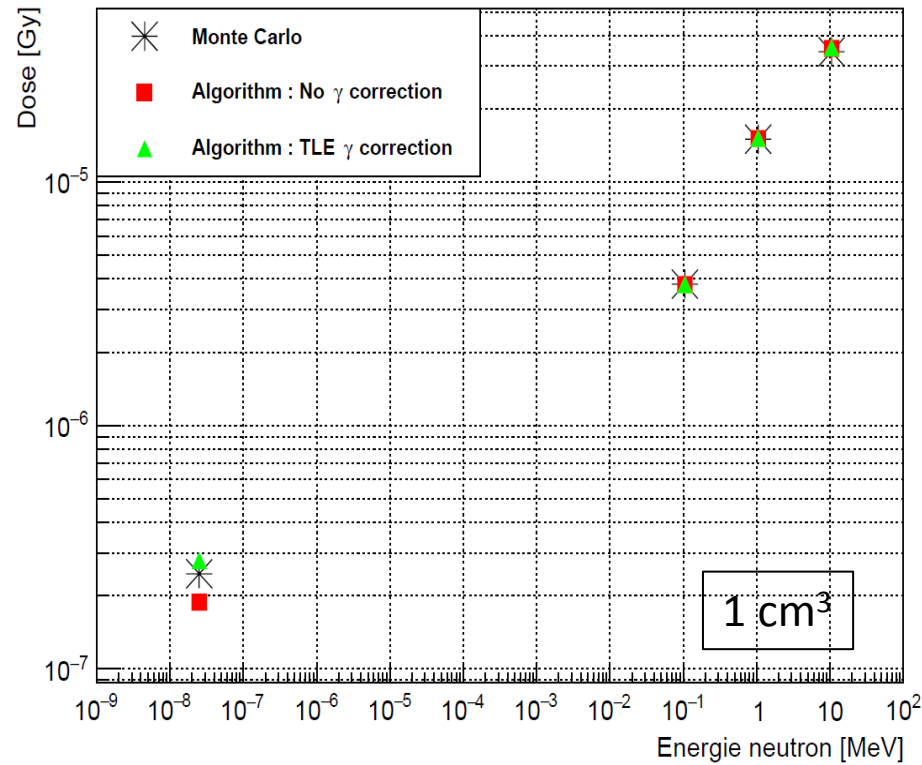
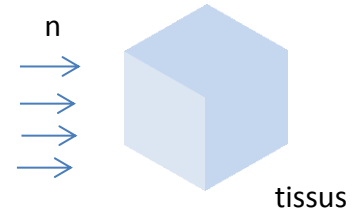
Calcul de Dose Neutron

- En CPE : $D^{CPE} = K = F_n \cdot \Phi$ avec $\Phi = \frac{T}{V}$
- Interpolation linéaire des Kerma factor tabulés dans l'intervalle [25 meV - 29 MeV]
- Extrapolation pour $E < 2,53 \cdot 10^{-8}$ MeV (Goorley, Kiger, and Zamenhof. Reference Dosimetry Calculation for NCT. 2001)



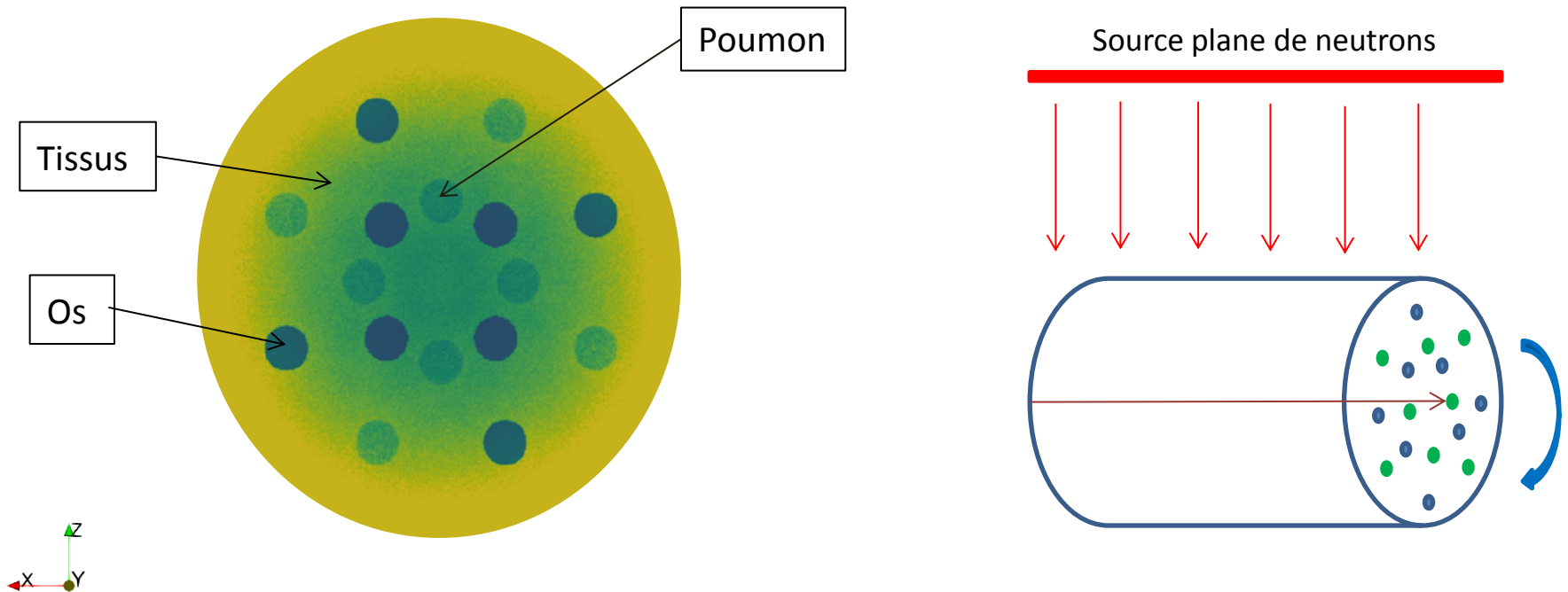
Correction de la dose Photon

- Photons de 2,2 MeV générés via ${}^1\text{H}(n,\gamma){}^2\text{H}$
- Dose non incluse dans le calcul du Kerma des neutrons
- Nécessité d'appliquer des corrections pour la prise en compte de cette dose



➡ Extrapolation de la méthode TLE basse énergie à plus haute énergie

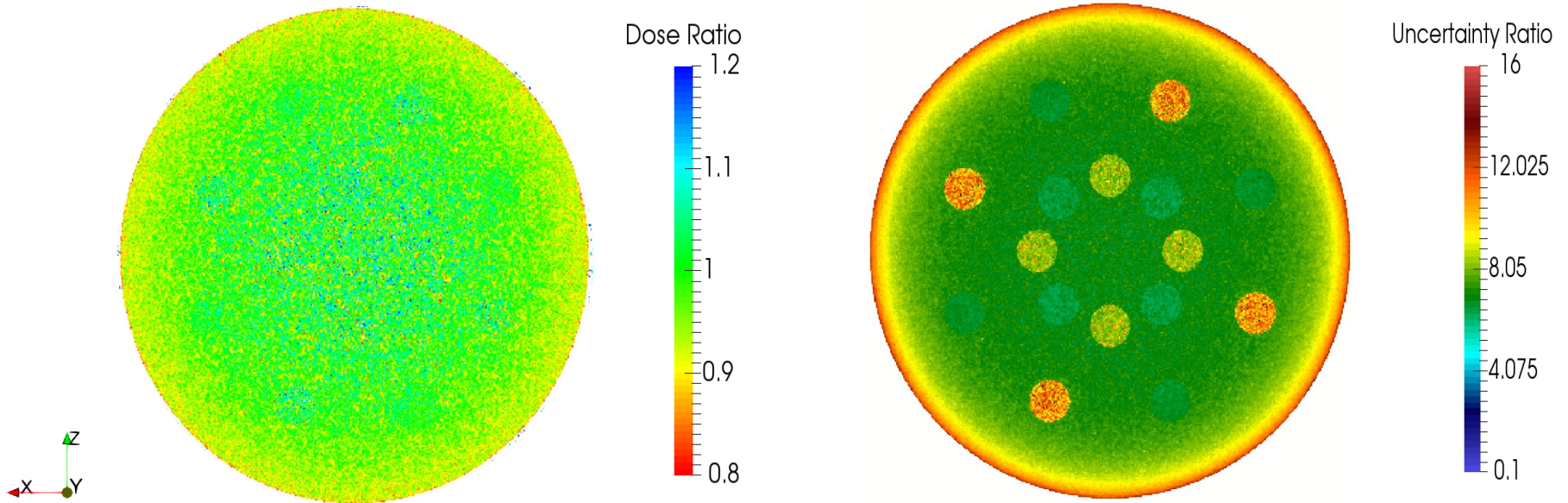
Simulation : Fantôme avec hétérogénéités



- ✓ Cylindre de 33 cm diamètre de tissus musculaire ($1,05 \text{ g.cm}^{-3}$) avec inserts :
 - os cortical ($1,920 \text{ g.cm}^{-3}$)
 - tissus pulmonaire (Griffith $0,26 \text{ g.cm}^{-3}$).
- ✓ Faisceaux de neutrons monoénergétiques : 0,025 eV ; 1 MeV et 10 MeV
- ✓ Voxels de 1 mm^3

Résultats : Fantôme avec hétérogénéités

Fantôme cylindrique : thermiques

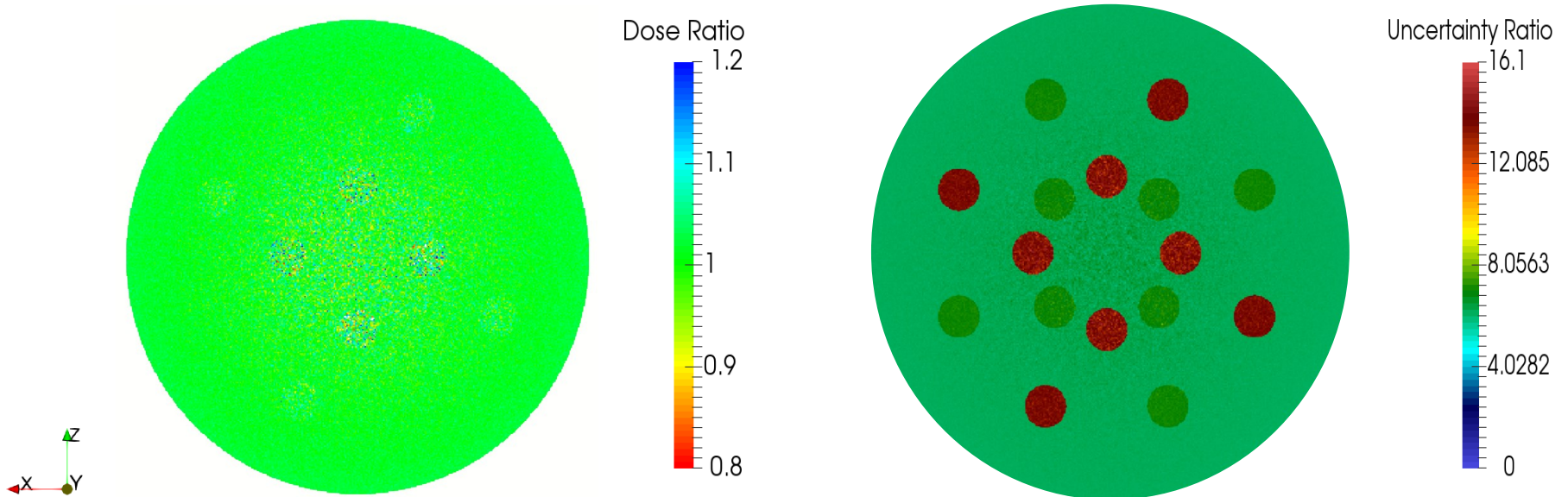


- ✓ Ecart de dose moyen de 4%
- ✓ Gain moyen en temps de calcul de l'ordre de 70

$$\text{Ratio} = \frac{\text{MC Analogue}}{\text{Algorithme nTLE}}$$

Résultats : Fantôme avec hétérogénéités

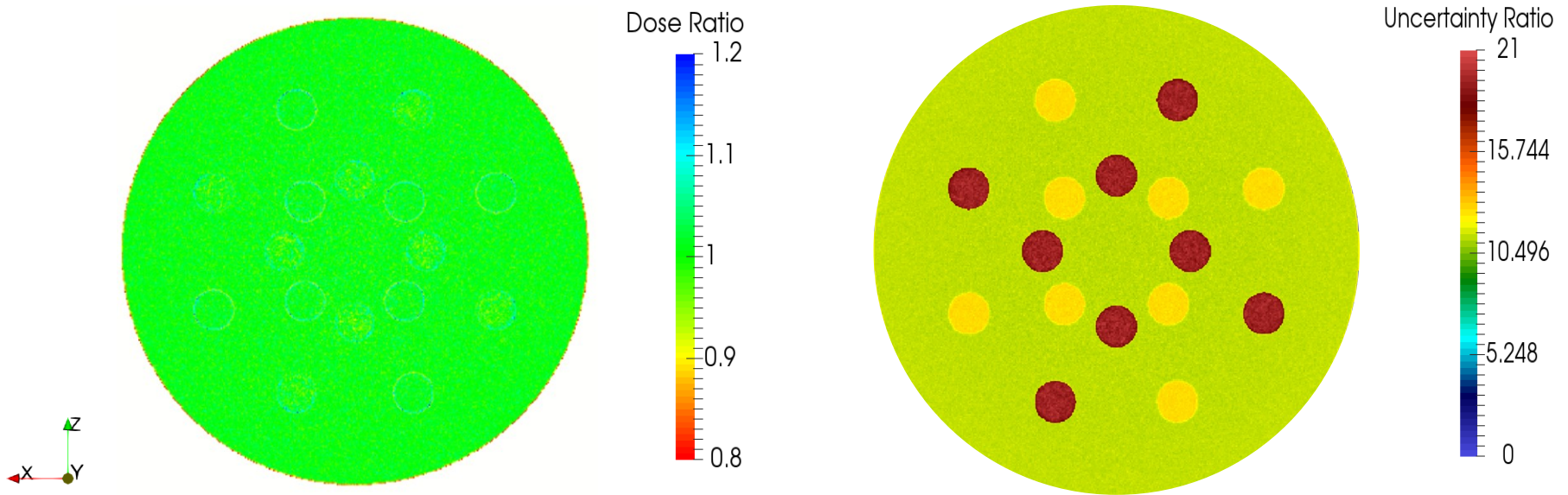
Fantôme cylindrique : 1 MeV



- ✓ Ecart de dose moyen de 1% sauf dans poumon central
- ✓ Gain moyen en temps de calcul de l'ordre de 70

Résultats : Fantôme avec hétérogénéités

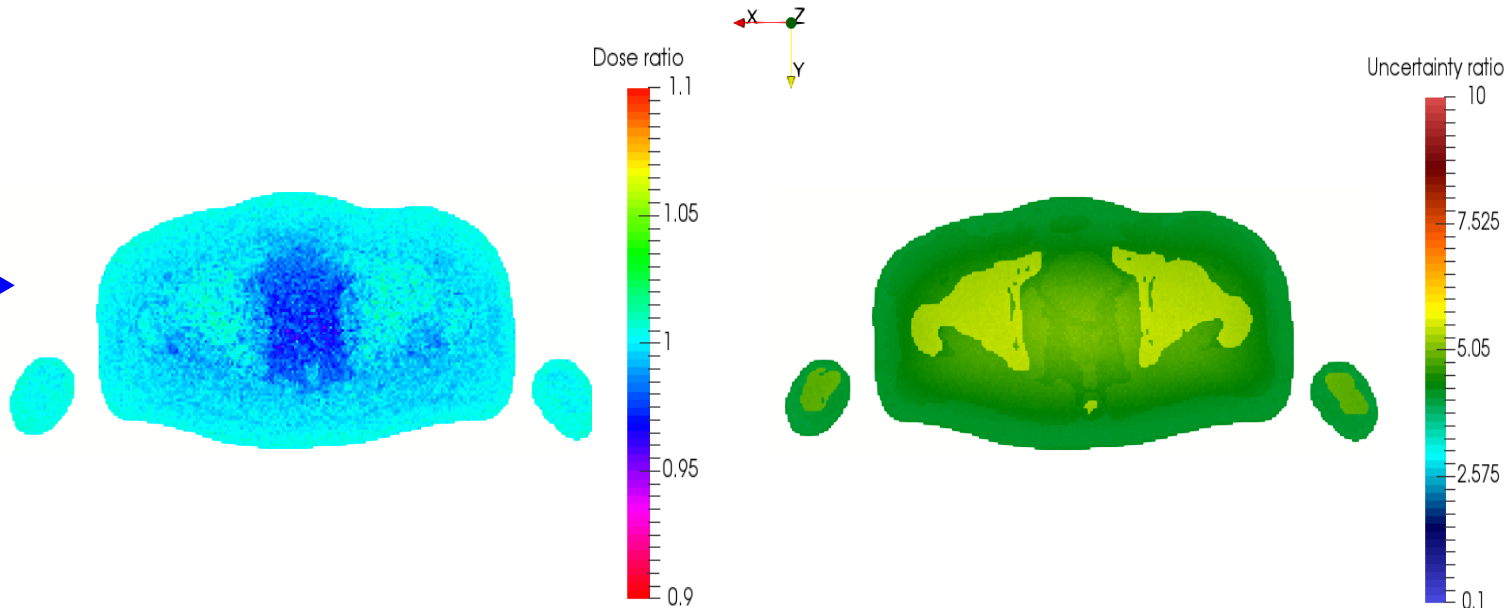
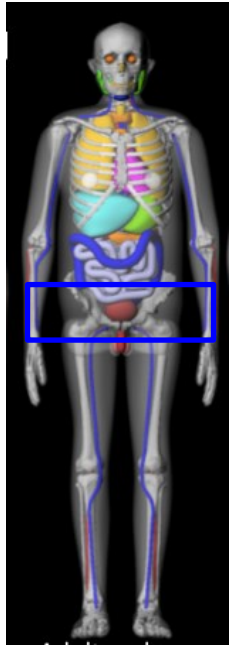
Fantôme cylindrique : 10 MeV



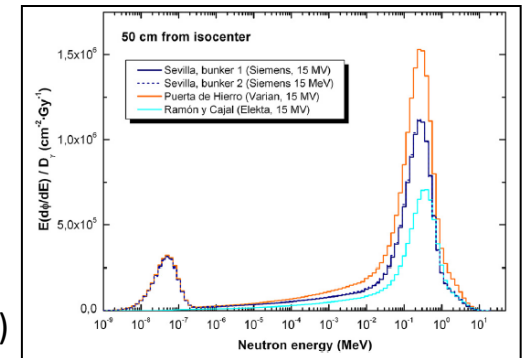
- ✓ Ecart de dose moyen de 0.5% sauf interfaces des inserts
- ✓ Gain moyen en temps de calcul de l'ordre de 120

Résultats : Fantôme ICRP

Pelvis : Spectre typique de neutrons secondaires en RT (15 MV)



- ✓ Voxels de 40 mm^3
- ✓ Ecart de dose moyen de 1%
- ✓ Gain moyen en temps de calcul de l'ordre de 25
→ 20 h de calcul au lieu de 500 h pour 5% d'erreur statistique (1 CPU)



Conclusion

- ❖ Calcul de dose neutron accéléré avec erreur < 5 % par rapport au MC « classique »
- ❖ Géométrie voxélisée (1 mm³) : gain de 60 à 120 en fonction de l'énergie des neutrons
- ❖ Fantôme voxélisé (40 mm³) : 25 fois plus rapide pour un spectre typique en RT
→ 20 h de calcul au lieu de 500 h pour 5% d'erreur statistique (1 CPU)
- ❖ **Prochaine étape** : Validation du code de calcul de dose par mesures expérimentales

Merci pour votre attention