



In2p3

Université de Strasbourg

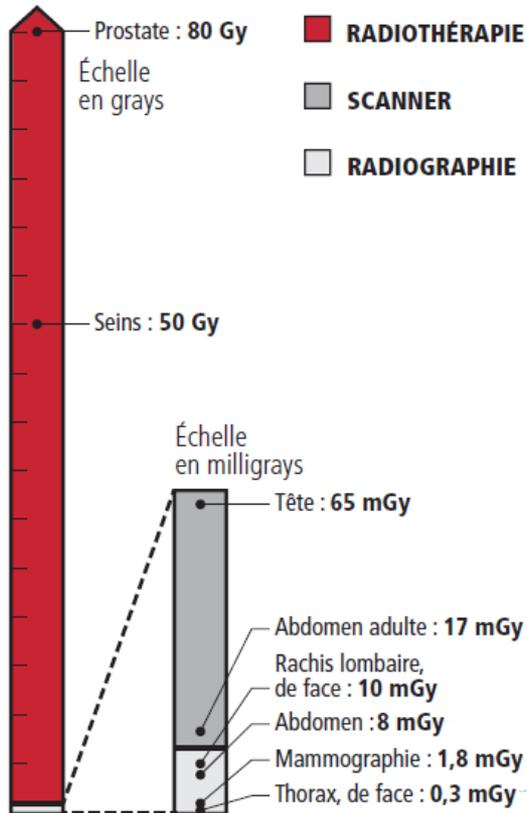
Dosimétrie Neutron en Radiothérapie : Etude Expérimentale et Développement d'un Outil Personnalisé de Calcul de Dose Monte Carlo

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

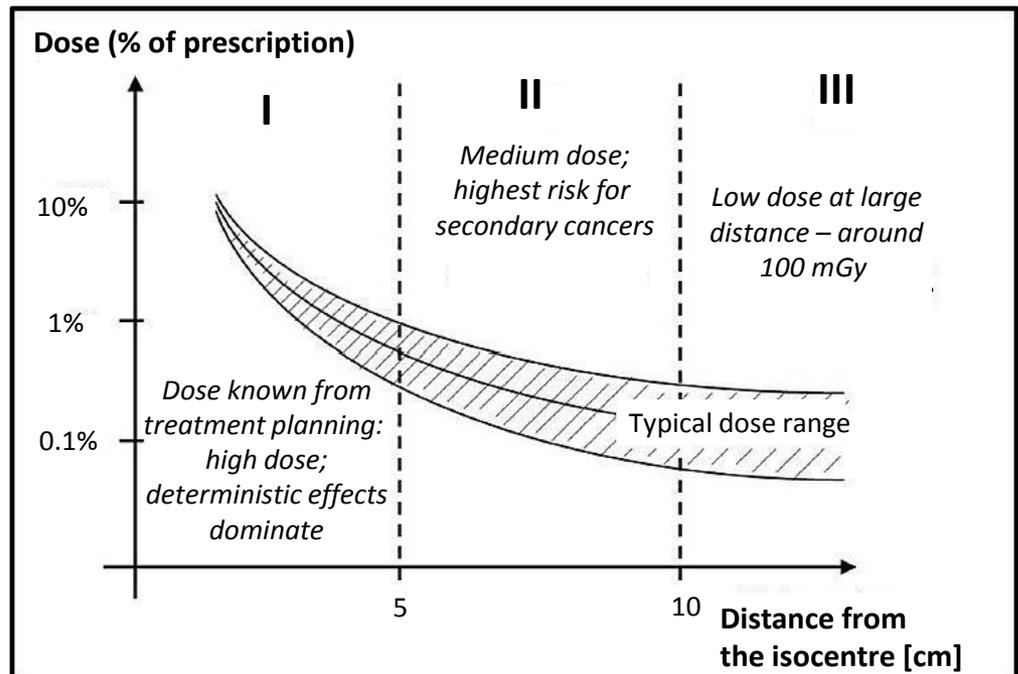


Dose en Radiothérapie

- Radiothérapie RX = fortes doses RX délivrées localement pour destruction tumorale
- Délivrance d'une dose secondaire inévitable au reste du corps



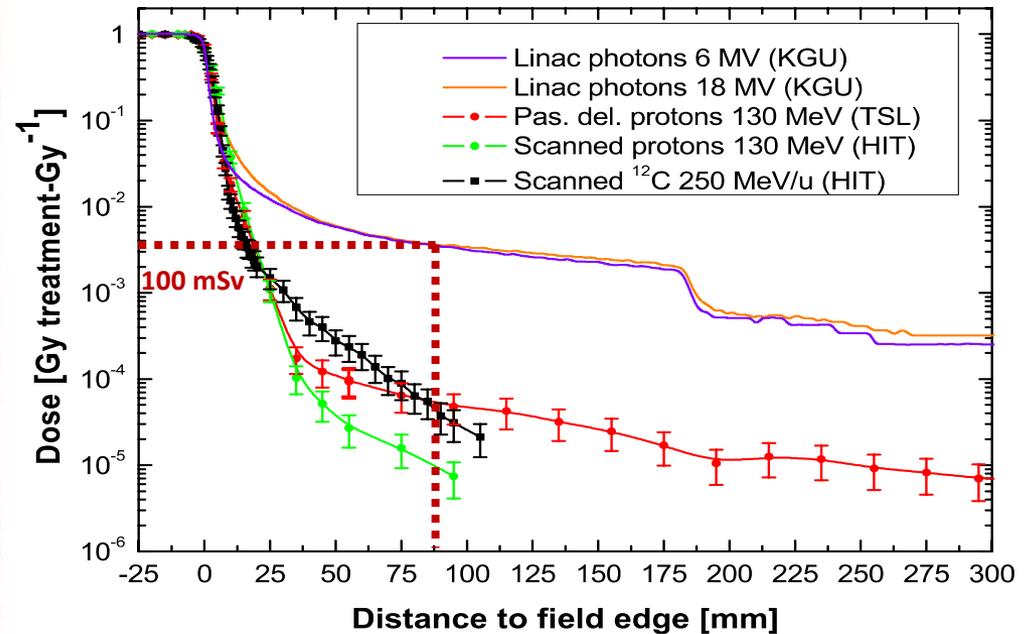
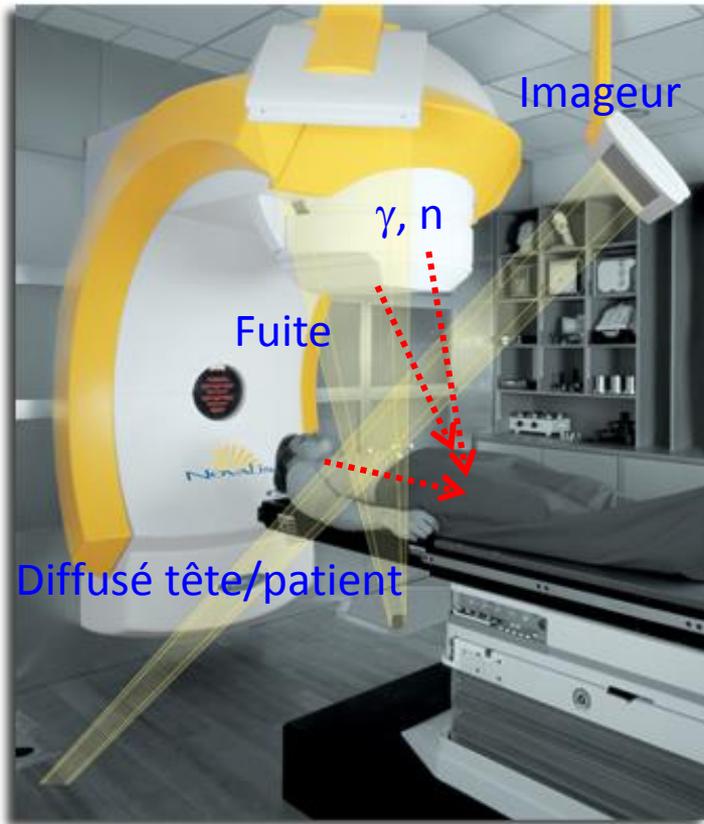
(IRSN, 2012)



(ML Taylor et al, 2011)

Dose périphérique : origine

- 3 origines :
 - Photons : fuite et diffusé tête
 - Imagerie de contrôle
 - Neutrons



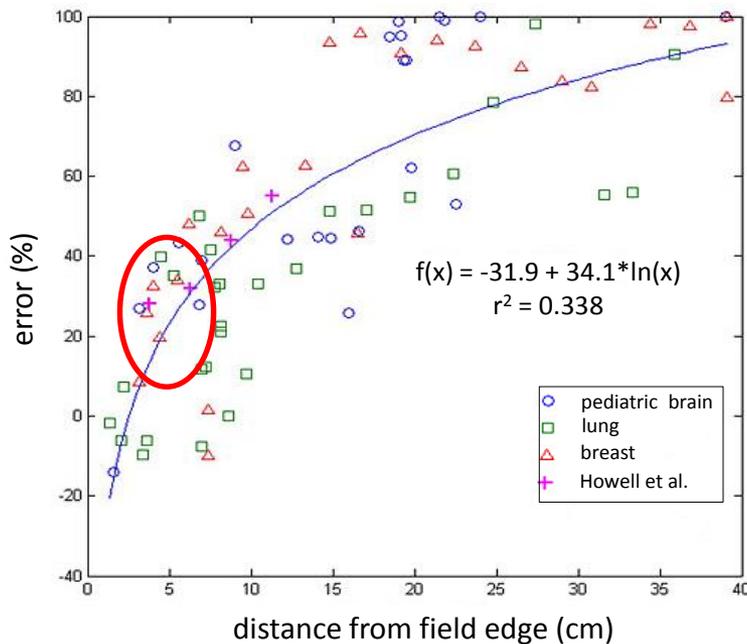
(R. Kaderka, 2012)

Dose périphérique : estimation

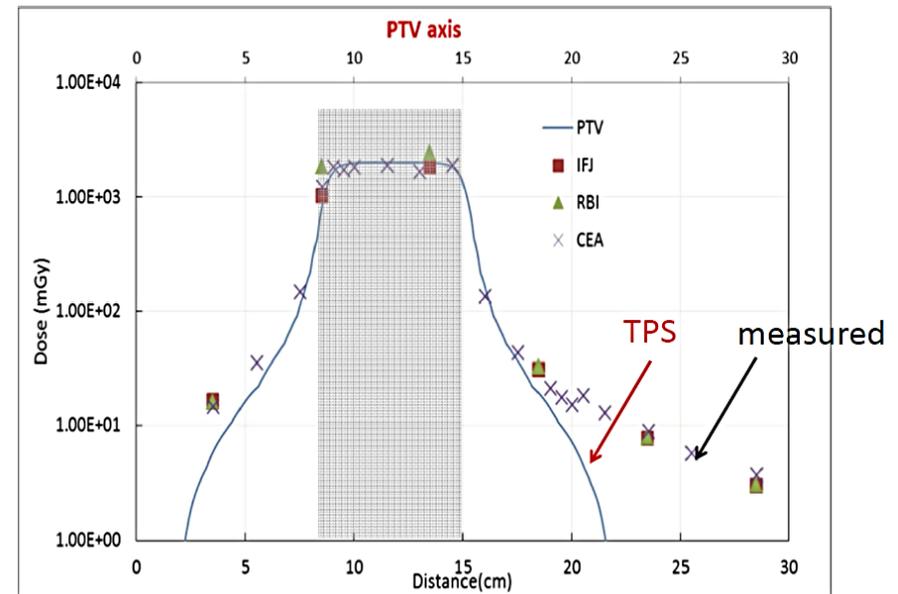
- Dose périphérique mal estimée en radiothérapie :
 - photons : erreur de l'ordre de 30% à 5 cm des bords du champ
 - neutrons : pas pris en compte



PTV (Volume cible prévisionnel)



(Huang JY et al, 2013)



(Harrison, 2018)

Objectif de la thèse

- Nécessité d'améliorer l'estimation de la dose périphérique en radiothérapie :
 - calcul de la dose photon
 - prise en compte de la dose d'imagerie
 - **prise en compte de la dose neutron**

Etude expérimentale et développement d'un outil personnalisé de calcul de dose neutron Monte Carlo

1. Caractérisation d'un détecteur à neutrons de référence : DSTN type PADC
2. Etude de la production des neutrons en salle de traitement (mesure + simulation)
3. Développement d'un code de calcul MC pour la dose neutron

Paramètres d'influence sur la production des neutrons secondaires

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 :

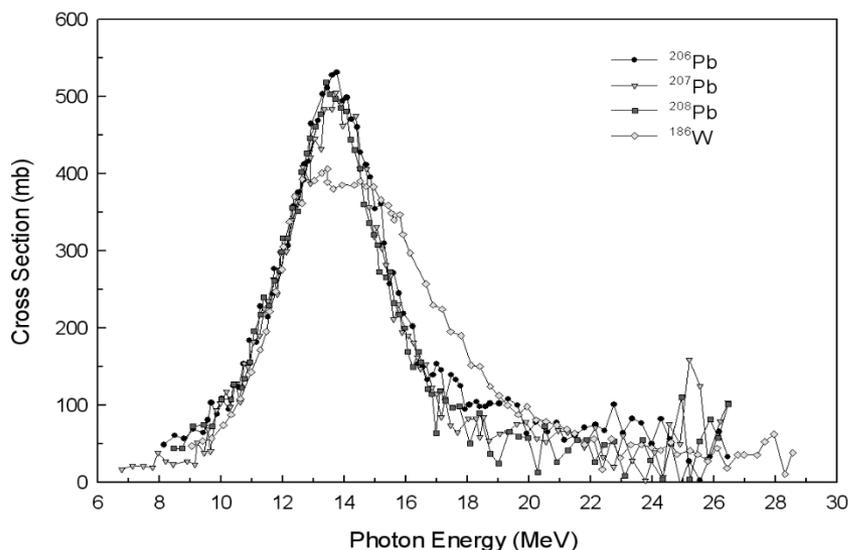
Al : ~13 MeV

Fe : ~11 MeV

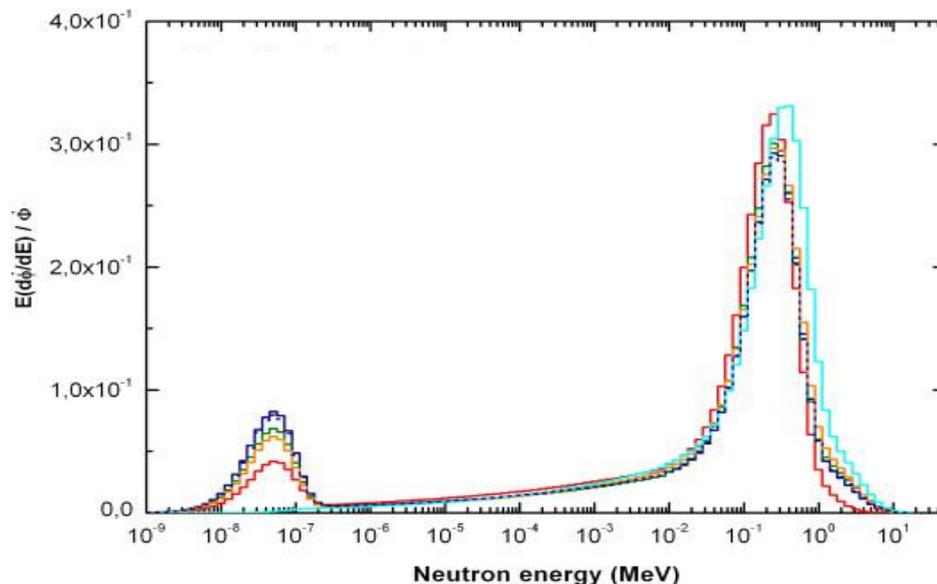
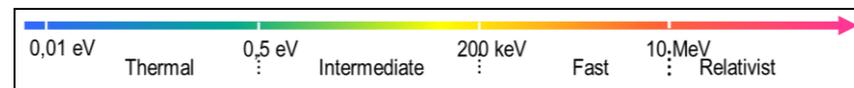
Cu : ~10 MeV

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*)

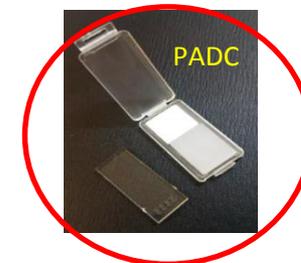
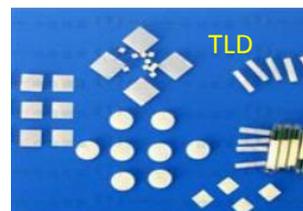
Détection et dosimétrie neutrons

- Caractéristiques du détecteur requises :
 - mesures en champ mixte γ, n
 - utilisable sur une large plage d'énergie pour la détection de la composante rapide et thermique

Actifs



Passifs

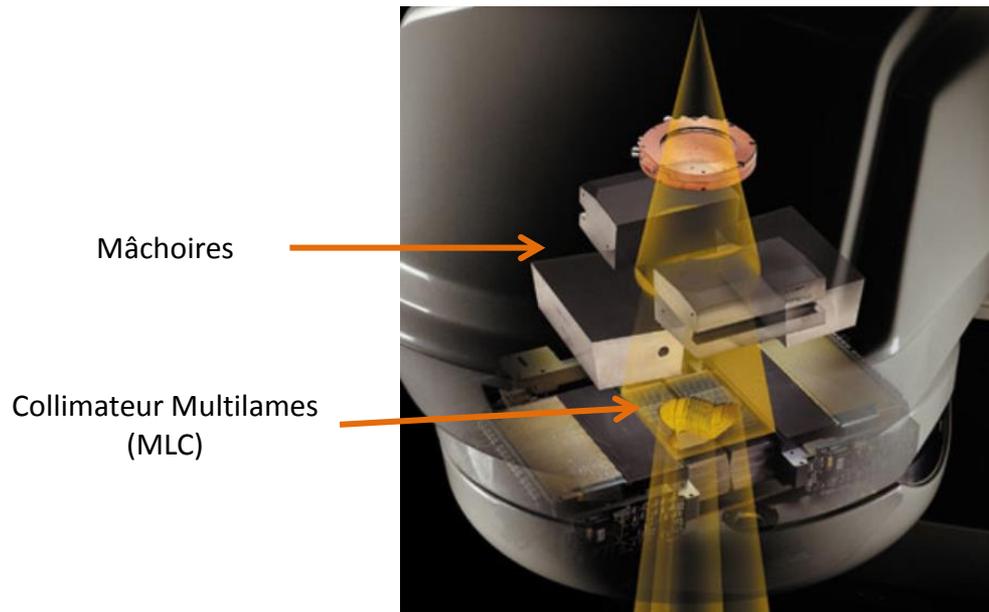


- ⊕ large plage d'énergie
- ⊖ transparence aux photons

- ⊕ large plage d'énergie
- ⊕ transparence aux photons

Production des neutrons secondaires en RT

- Nouvelles techniques de traitement = Variation taille de champ + Rotation du bras pendant l'irradiation



Impact des différents paramètres de traitement sur la production des neutrons

Centre Paul Strauss

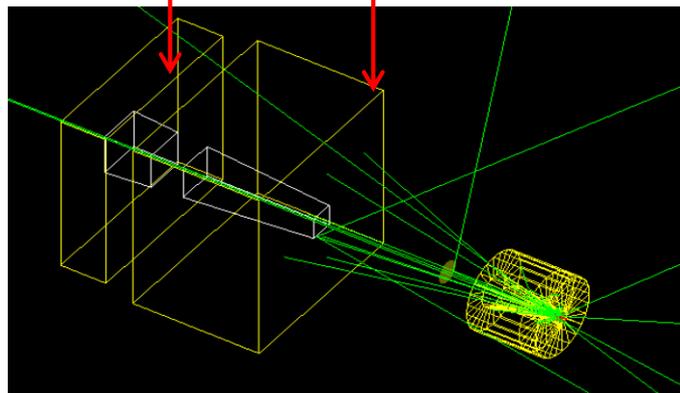
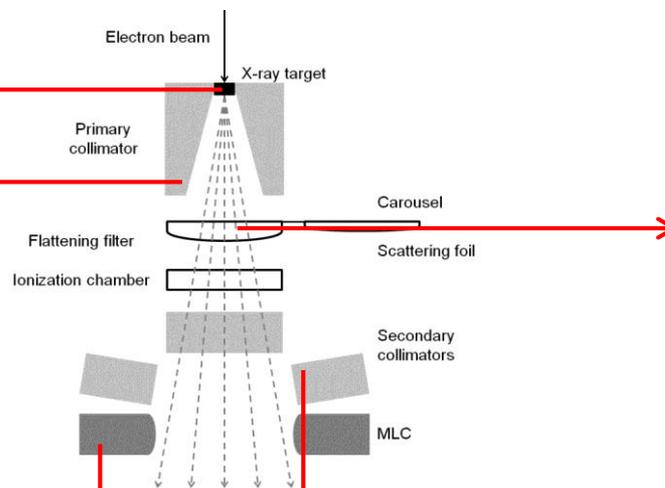
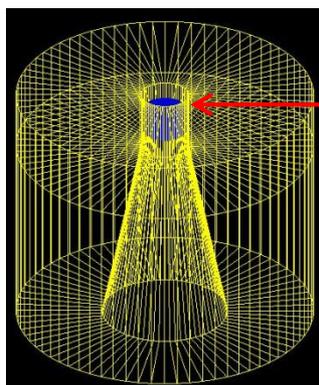
- Collaboration avec le Centre Paul Strauss
 - Accélérateur : Novalis Tx
 - Energie : 15 MV



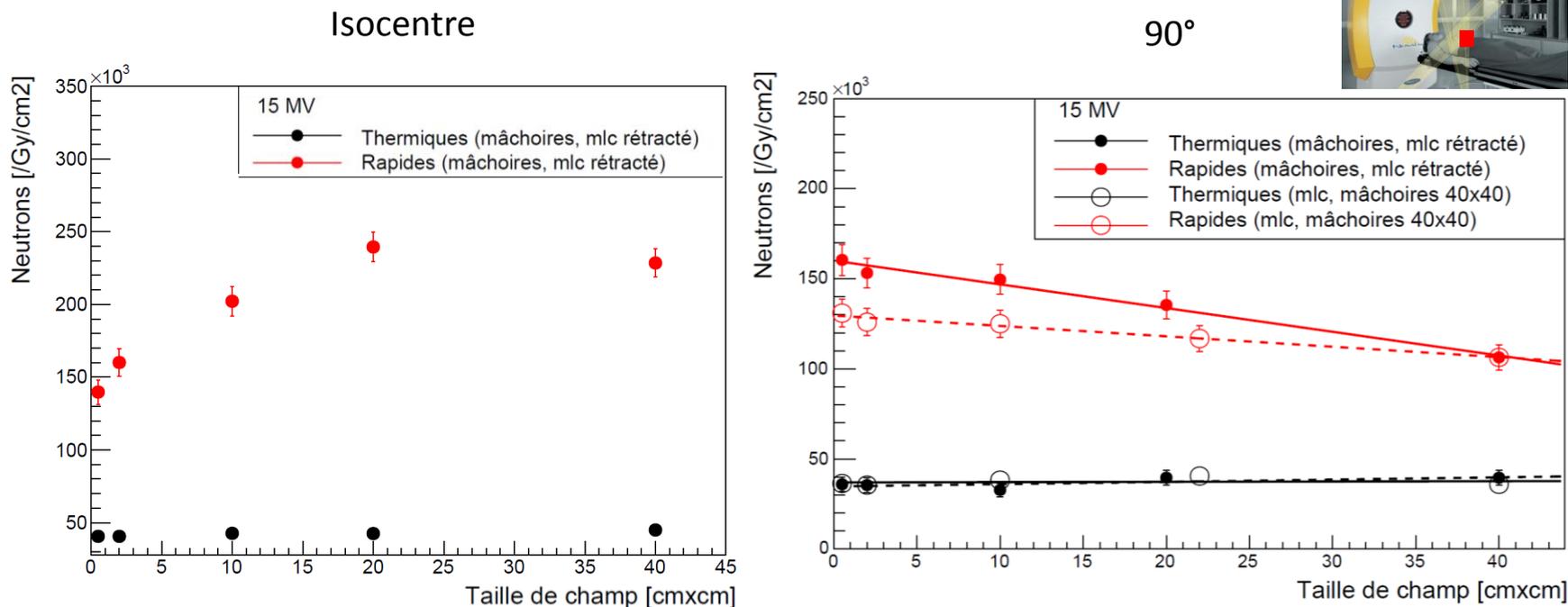
➡ Développement d'une simulation MC et mesures expérimentales

Simulation Varian Novalis Tx : Gate 7.1

- Geant4 Application for Tomography Emission
- Modélisation des éléments principaux de la tête de l'accélérateur

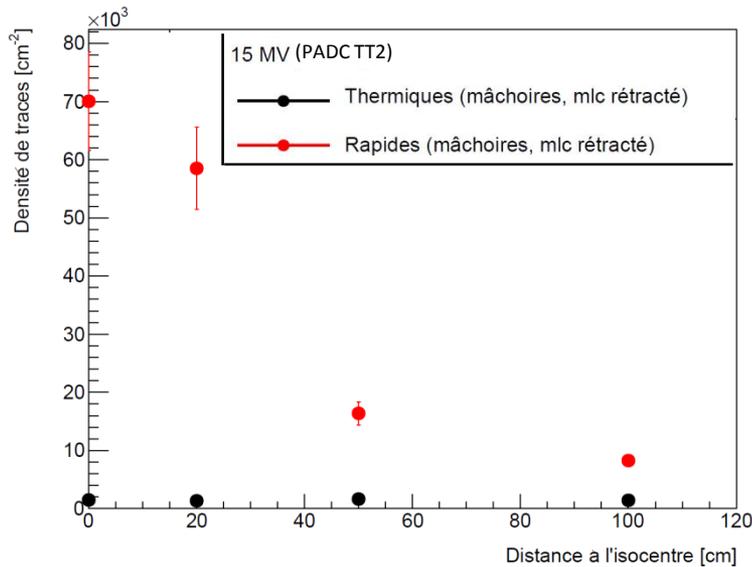
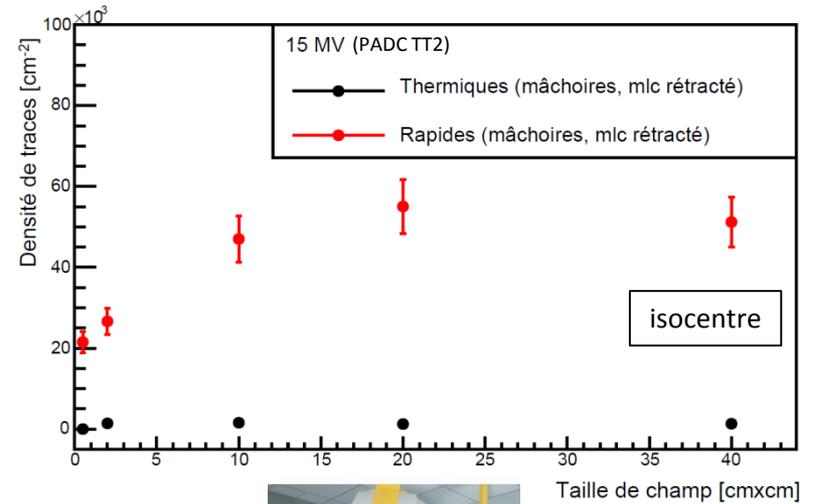
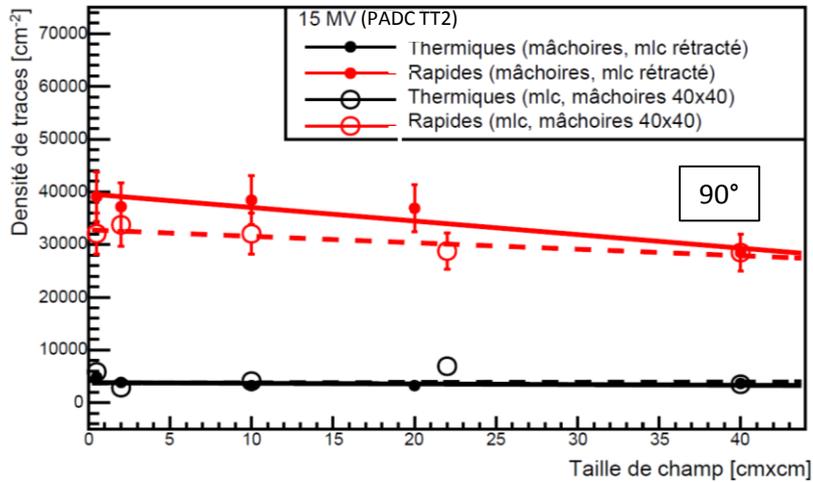


Résultats : Simulation



- ✓ 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

Résultats : PADC TT2



✓ Bon accord entre tendances mesurées et simulées

Conclusion

- ❖ **Production des neutrons :**

- Dépendance multiple en fonction des paramètres (énergie, taille de champ, localisation)
- Dépendance différente selon la localisation spatiale dans la salle de traitement

- ❖ **Limites de la mise en place d'un système analytique de calcul de dose**

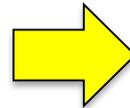
➡ Choix de mise en place d'un système MC de calcul de dose dans GATE

Algorithme MC pour le calcul de dose

Positionnement

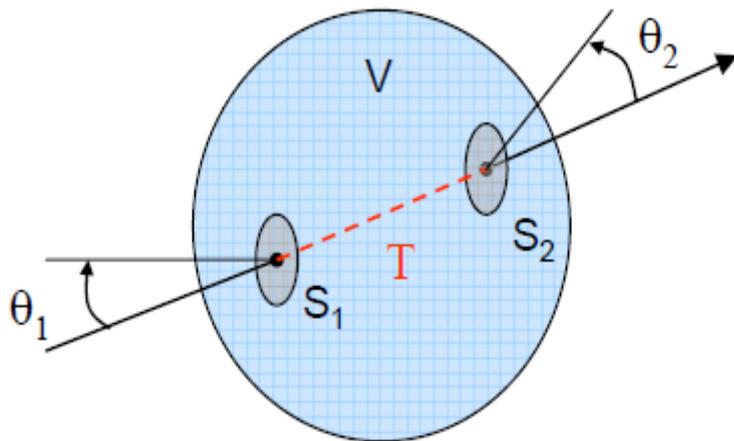
- Estimation de la dose périphérique :
 - Description complète de la dose aux organes pour les patients en RT : **estimation des risques**
 - Dosimétrie des **sous-structures** des organes à risque : **précision de la DP**

➔ Méthode MC : précision ++ mais **chronophage**



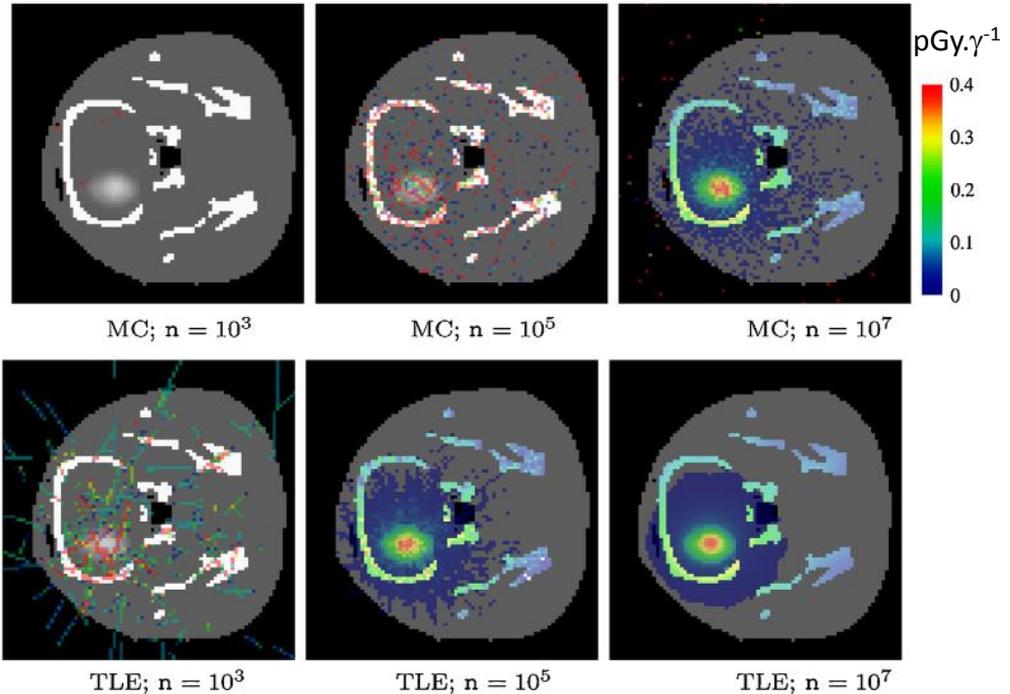
Méthode du TLE (GATE)

- TLE : Track Length Estimator
- Méthode de réduction de variance pour $E_\gamma < 1$ MeV
- 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



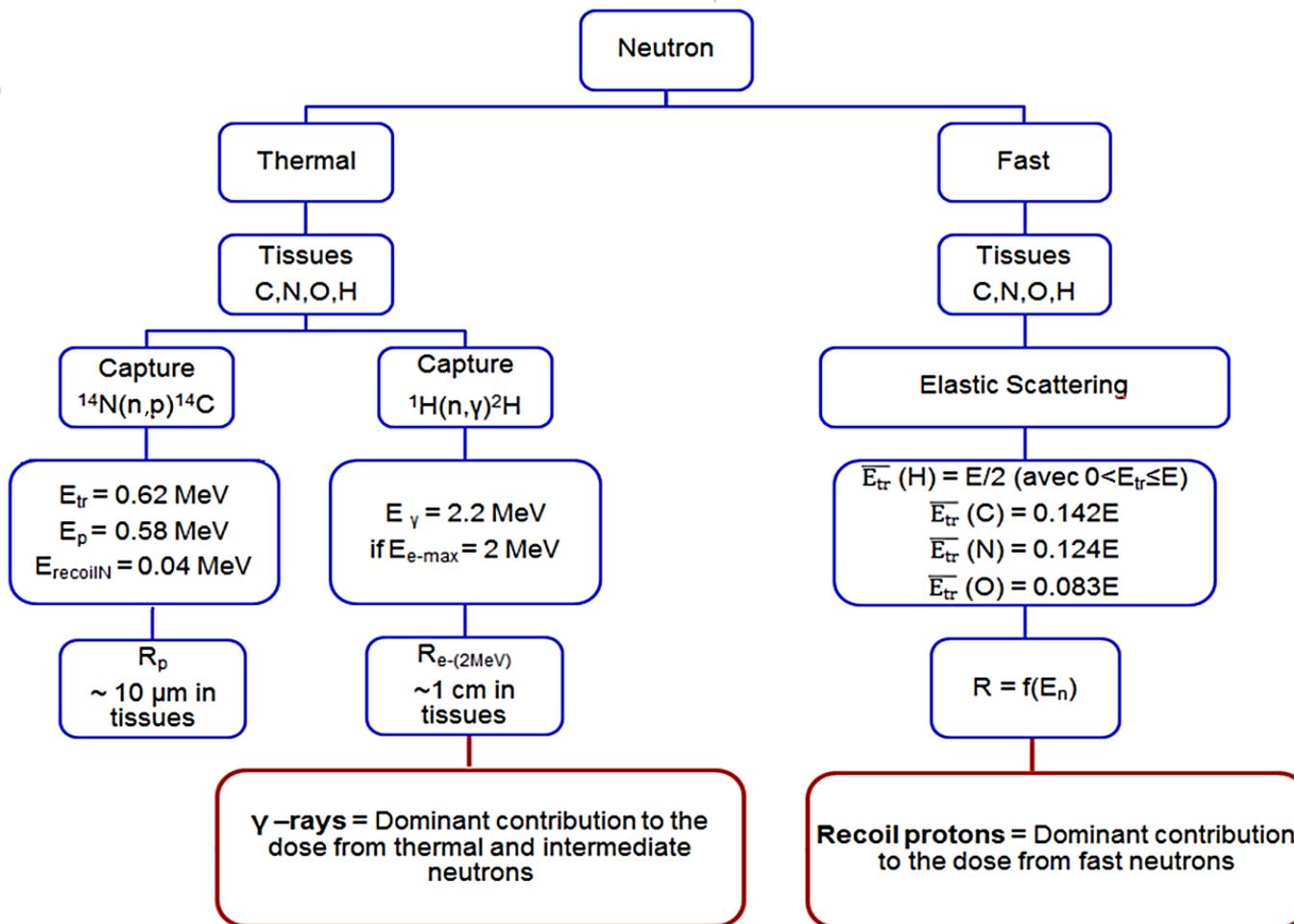
$$\Phi = \frac{T}{V}$$

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



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

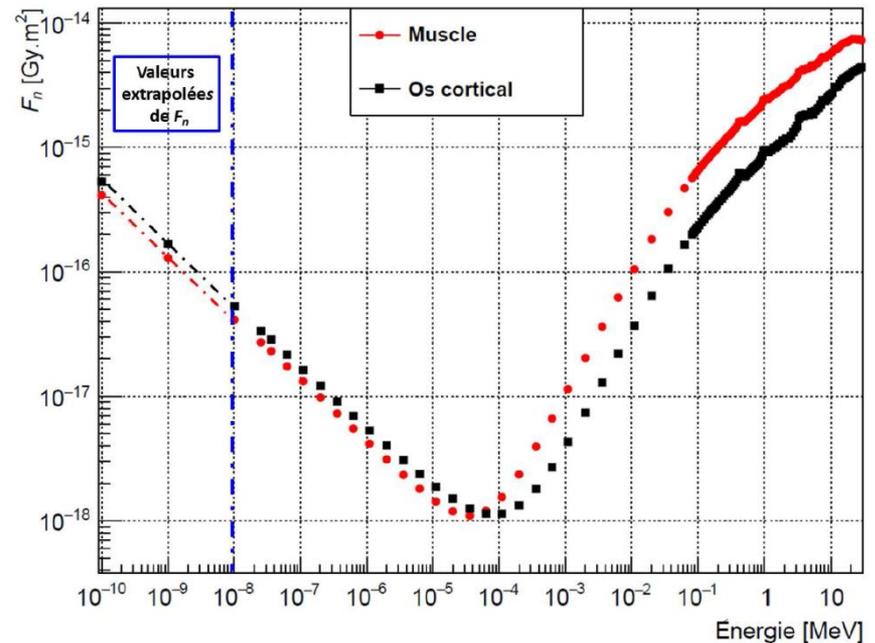
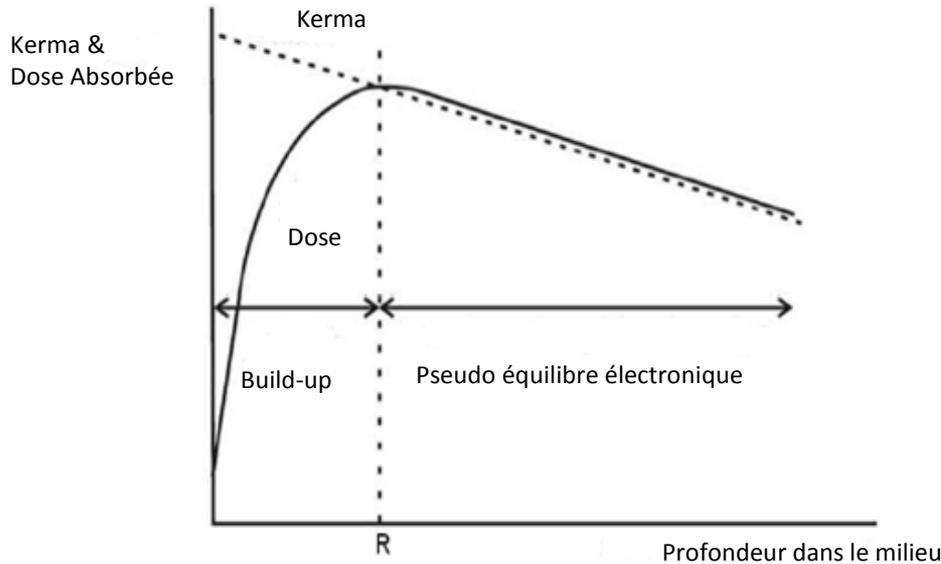
Dépôt de Dose : Particules secondaires produites



- ✓ Approximation de dépôt local : - erreur moyenne de 5 mm pour les électrons
- erreur moyenne < 1 mm pour les protons

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)



➡ Base de données pour le calcul de dose neutron

Neutrons thermiques : 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

Élément	γ_{prompt} [MeV]	$\sigma_{capture}$ [barn]	$\Sigma_{capture}$ [cm^{-1}]	Atomes par g de muscle [g^{-1}]
H	2.2	0.3326	2.13×10^{-2}	6.09×10^{22}
C	1.3	0.0012	7.77×10^{-6}	6.17×10^{21}
	4.9	0.00262	1.70×10^{-5}	
N	1.9	0.01458	2.31×10^{-5}	1.506×10^{21}
O	0.9	0.000175	5.13×10^{-6}	2.79×10^{22}

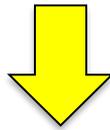
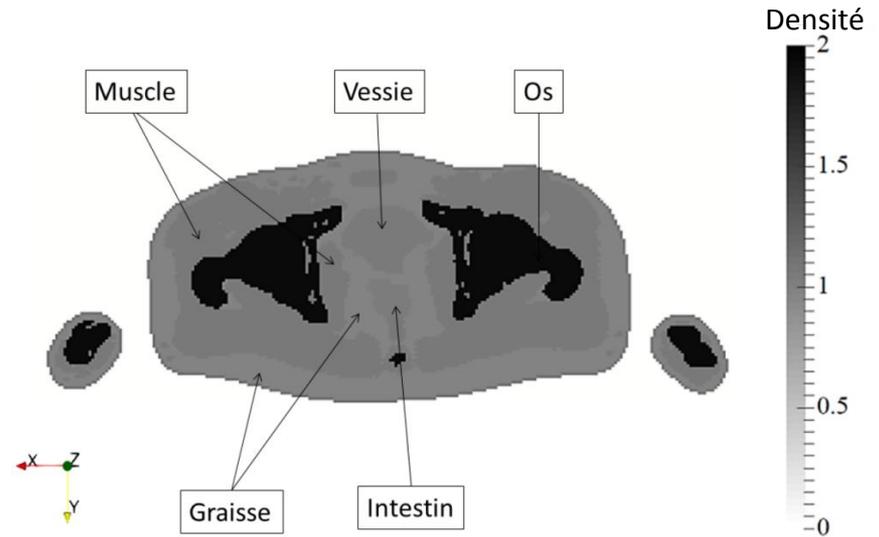
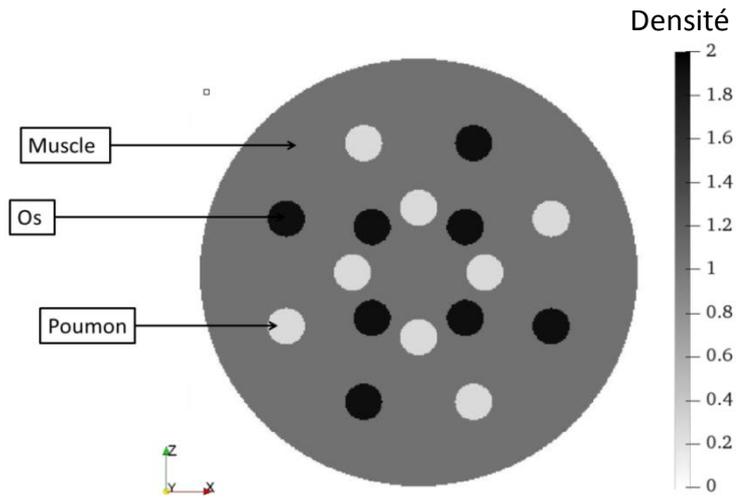
➡ Correction : extrapolation TLE à haute énergie

$$\frac{\mu_{en}}{\rho} \sim \frac{\mu_{tr}}{\rho} \quad \text{pour } E_\gamma < 10 \text{ MeV et } Z \leq 20$$

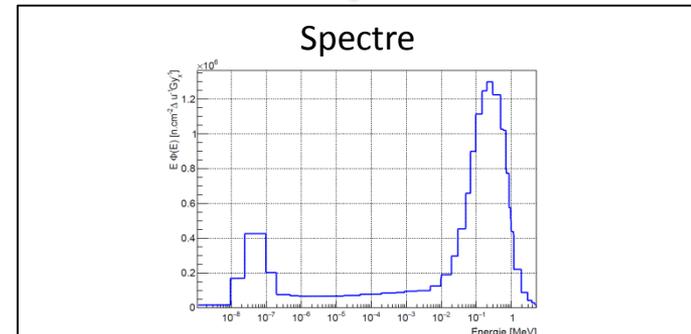
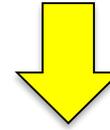
➡ Base de données pour le calcul de la composante photonique de dose

Cas voxélisés simulés

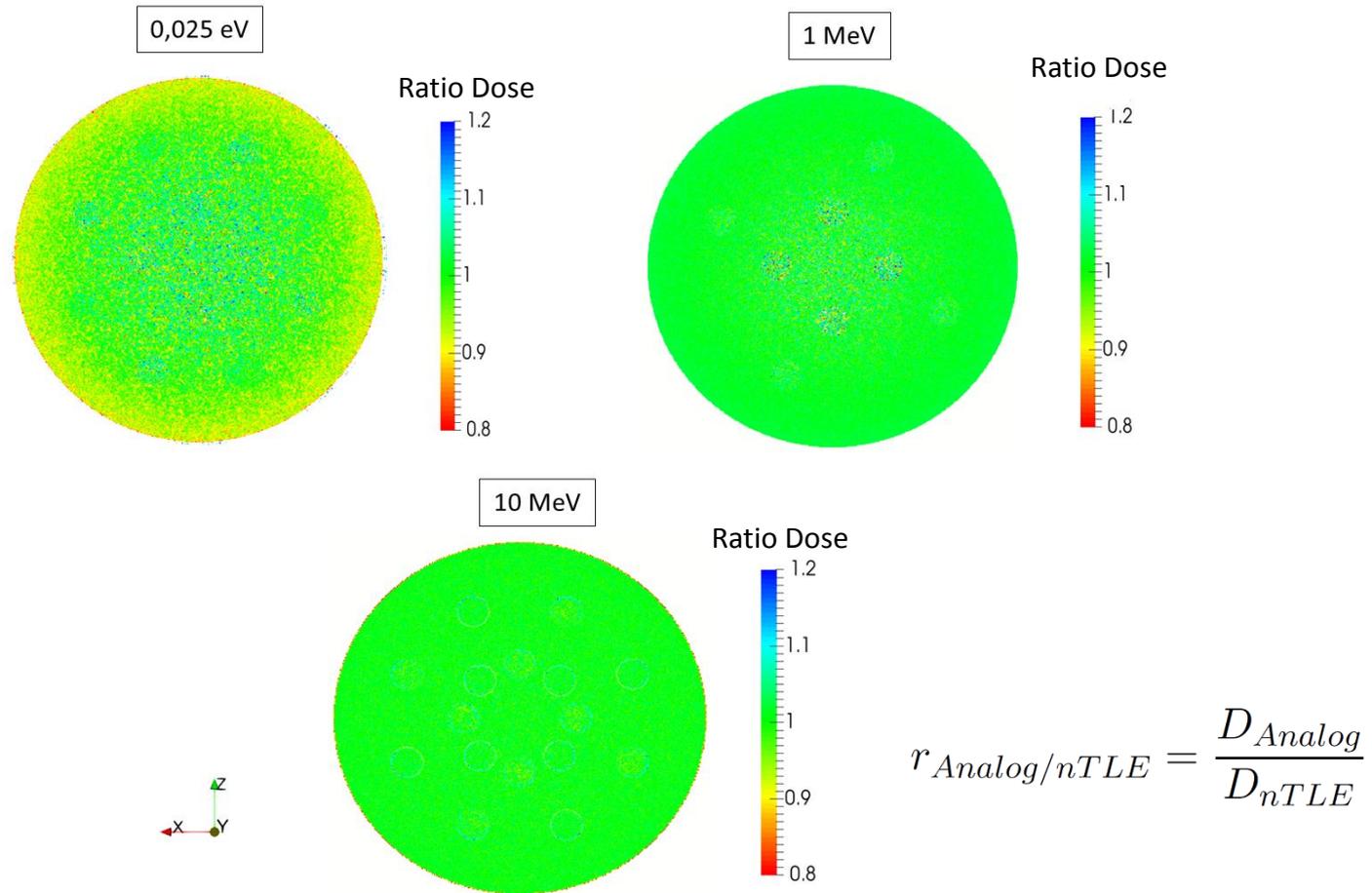
- Volume simple hétérogène : voxels de 1 mm^3
- Zone pelvienne du fantôme ICRP : voxels de 35 mm^3



Faisceaux monoénergétiques
0,025 eV
1 MeV
10 MeV

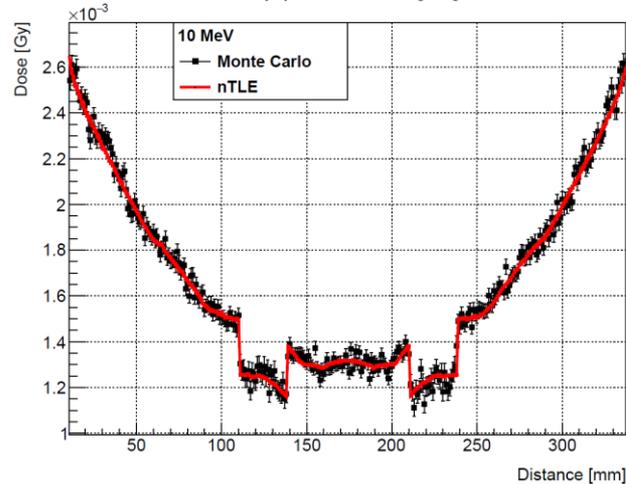
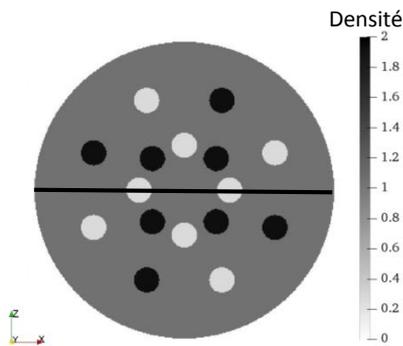
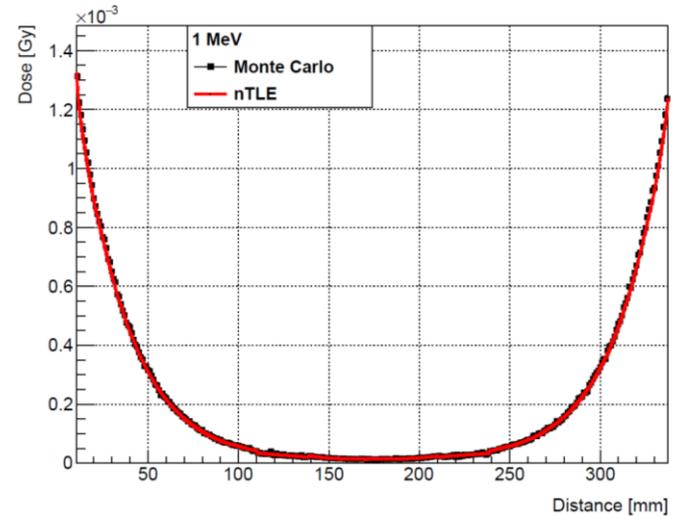
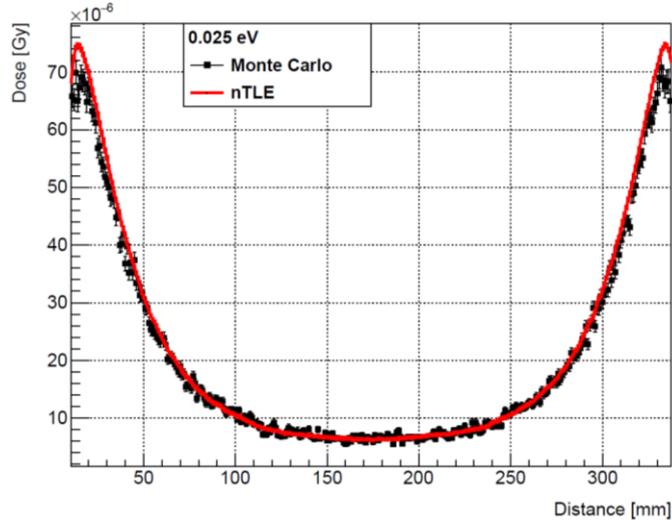


Voxelisation simple : dose



✓ Différence moyenne de 3% , 1% et < 1% pour les faisceaux de 0,025 eV, 1 MeV et 10 MeV

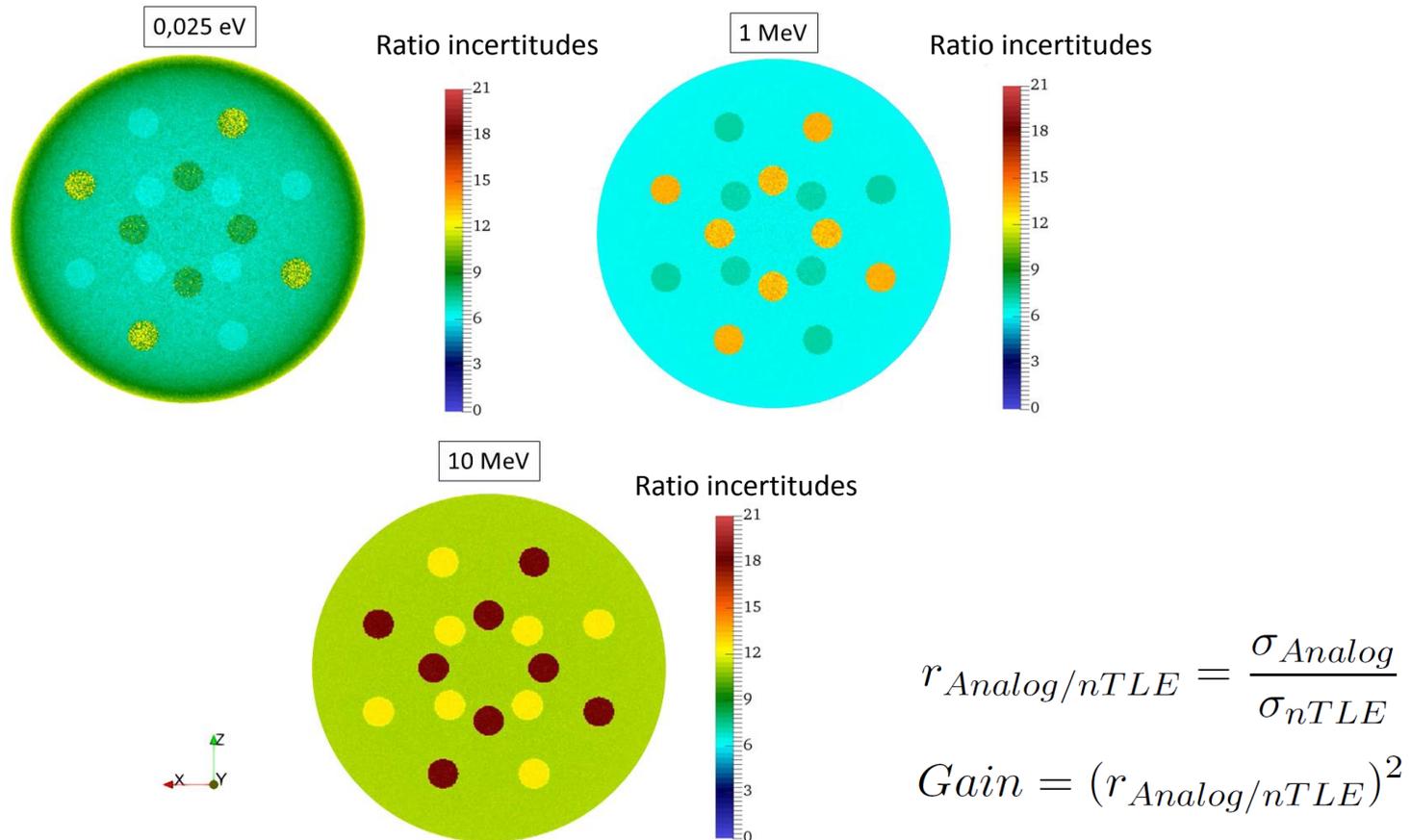
Voxelisation simple : dose



- ✓ Profils de dose en bon accord avec la méthode MC aux fluctuations statistiques près à 0,025 eV, 1 MeV et 10 MeV

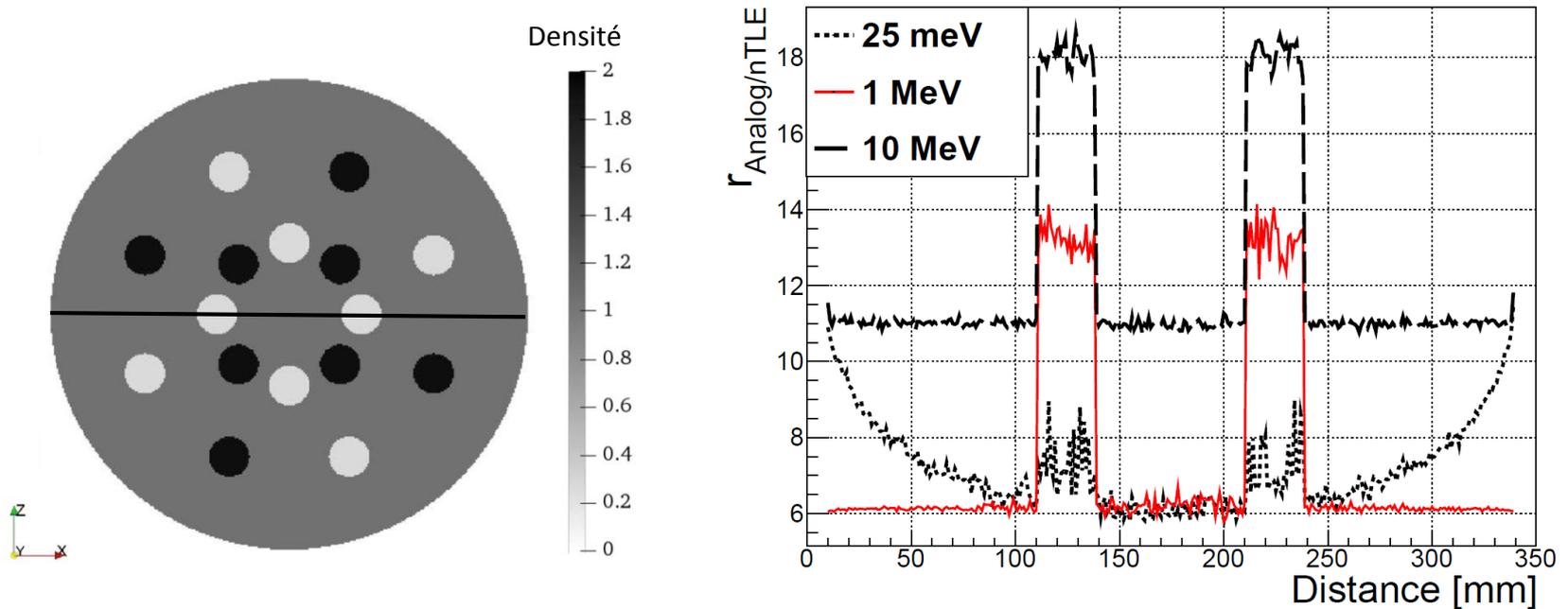
Voxelisation simple : gain en temps de calcul

- Estimation du nombre de particules nécessaires pour obtenir une erreur statistique donnée



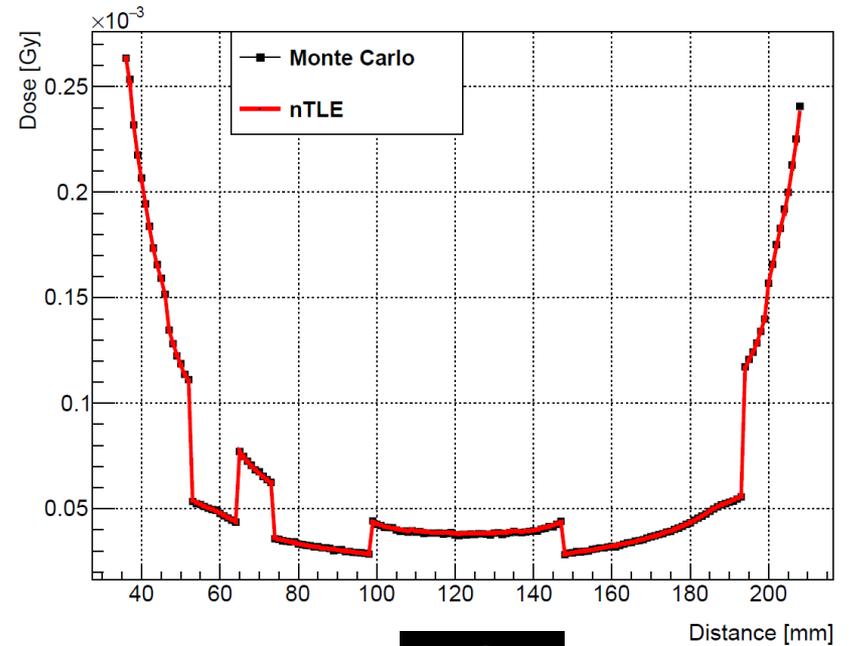
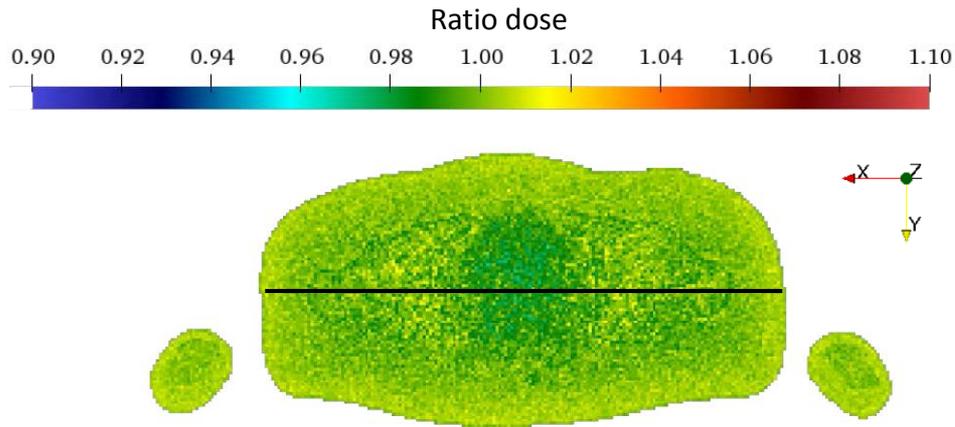
- ✓ Gain moyen en temps de calcul de 80, 70 et 120 pour les faisceaux de 0,025 eV, 1 MeV et 10 MeV

Voxelisation simple : gain en temps de calcul



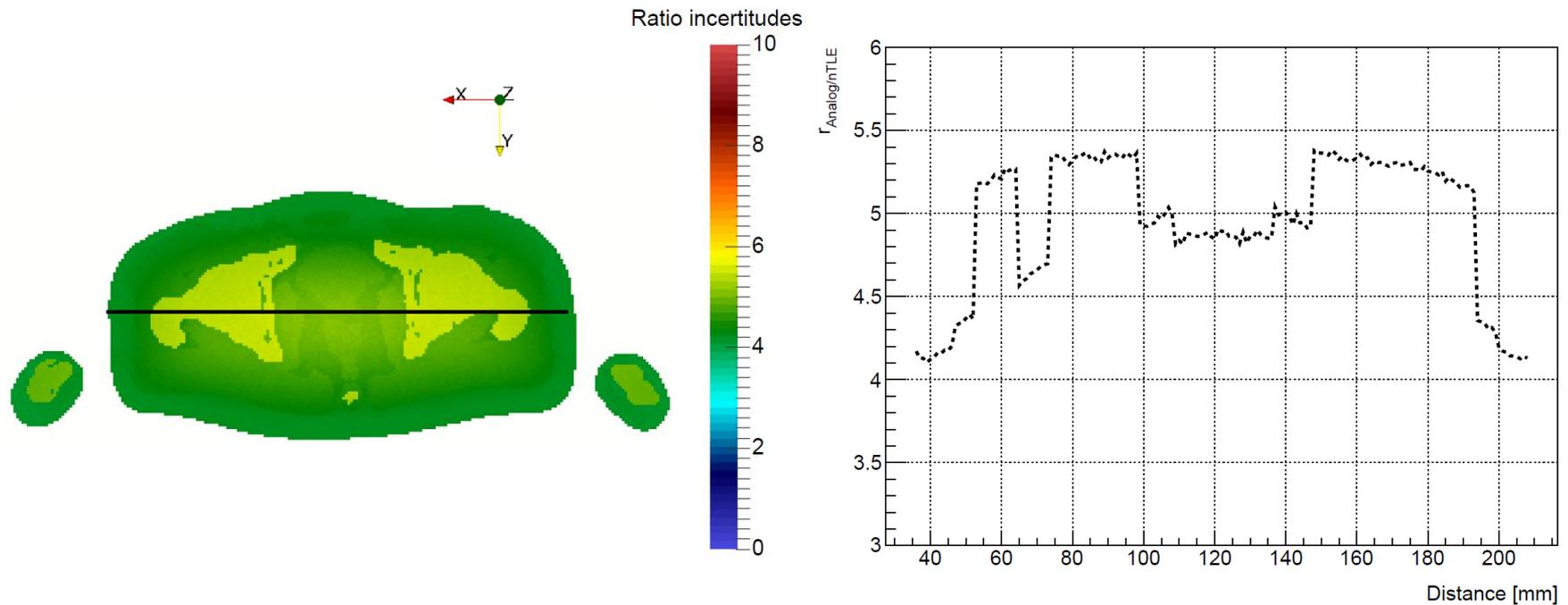
- ✓ Gain dépendant de l'énergie des neutrons incidents et de la composition du milieu

Fantôme ICRP : dose



- ✓ Différence moyenne en calcul inférieure à 1 %
- ✓ Profil de dose en bon accord avec la méthode MC

Fantôme ICRP : gain en temps de calcul



- ✓ Accélération moyenne du calcul d'un facteur 25
- ✓ Taille du voxel contribue à la diminution du gain

Fantôme	Voxel [mm ³]	Gain temps de calcul
Cylindrique	1	100
ICRP	35	25

Conclusion

- ❖ **Calcul de dose neutron accéléré avec erreur moyenne < 1% par rapport au MC « classique »**
- ❖ **Géométrie voxélisée (1 mm³) : gain en temps de calcul de l'ordre de 100 en fonction de l'énergie des neutrons**
- ❖ **Fantôme voxélisé (40 mm³) : gain en temps de calcul de l'ordre de 25 pour un spectre typique**

Conclusion générale

Caractérisation de la production des neutrons en salle de traitement :

→ caractérisation par méthode MC et expérimentale de la production des neutrons autour du Novalis Tx du Centre Paul Strauss

Développement d'un algorithme MC pour le calcul de dose :

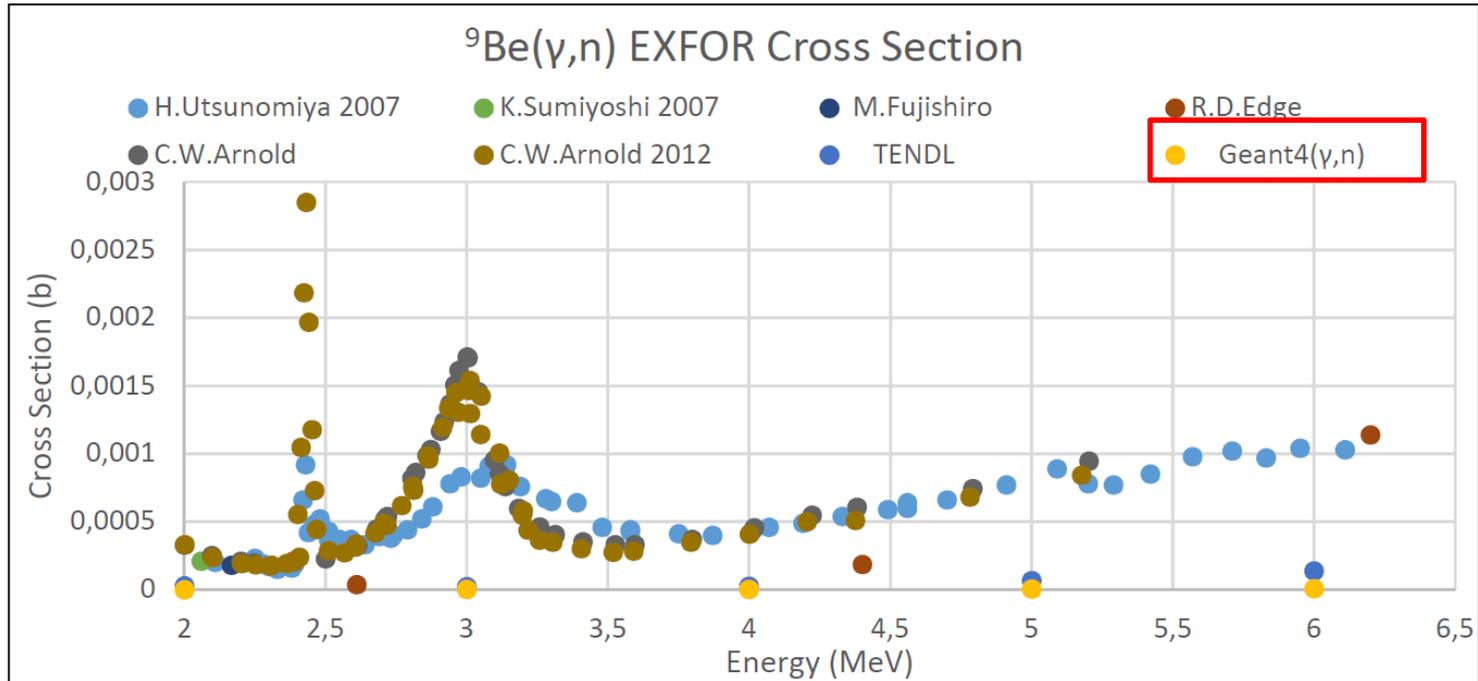
→ calcul de dose avec erreur < 1% par rapport à MC dans un fantôme voxélisé (40 mm³)

→ gain en temps de calcul entre 25 et 100 pour une voxélisation de 40 et 1 mm³

→ disponible pour la collaboration dans la prochaine version de GATE

Perspectives : Validation

- Sections efficaces photo-nucléaire
 - paramétrées pour certains noyaux
 - paramétrisation exprimée en fonction de A et énergie du photon

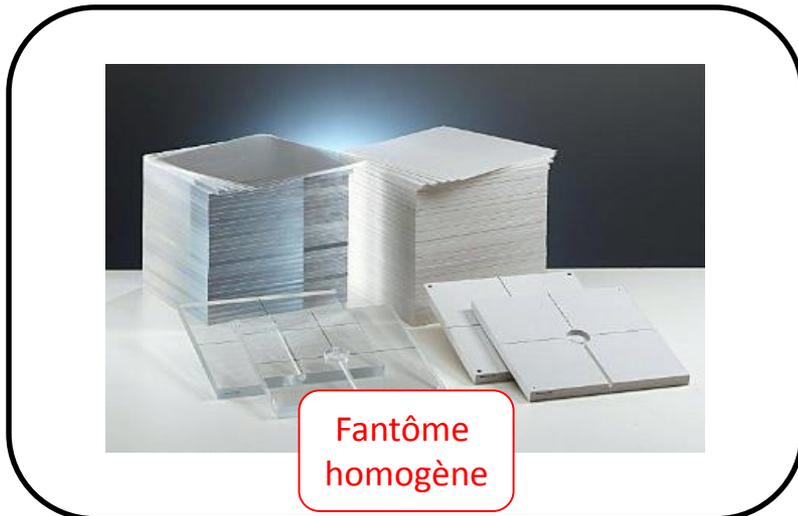
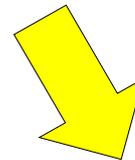
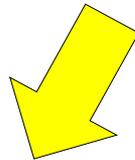


(S. Keshmiri)

➡ Erreurs importantes dans le calcul des sections efficaces pour $E < 100$ MeV

Perspectives : Validation

- Dose neutron calculée dans GATE



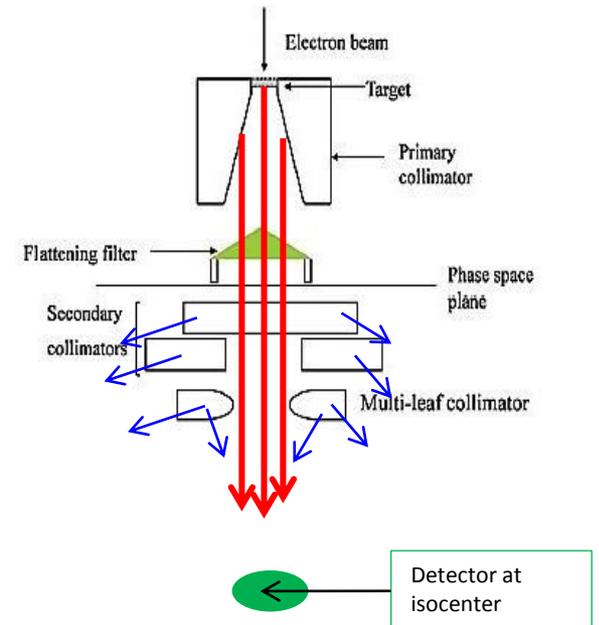
Merci pour votre attention

Back up

Volumes de production

Neutrons directs

Composé	Isocentre
Cible (W,Cu)	9,3%
Collimateur primaire (W)	46,5%
Cône égalisateur (W)	5%
Mâchoires (W)	35,1%
Blindage (Pb)	1,4%



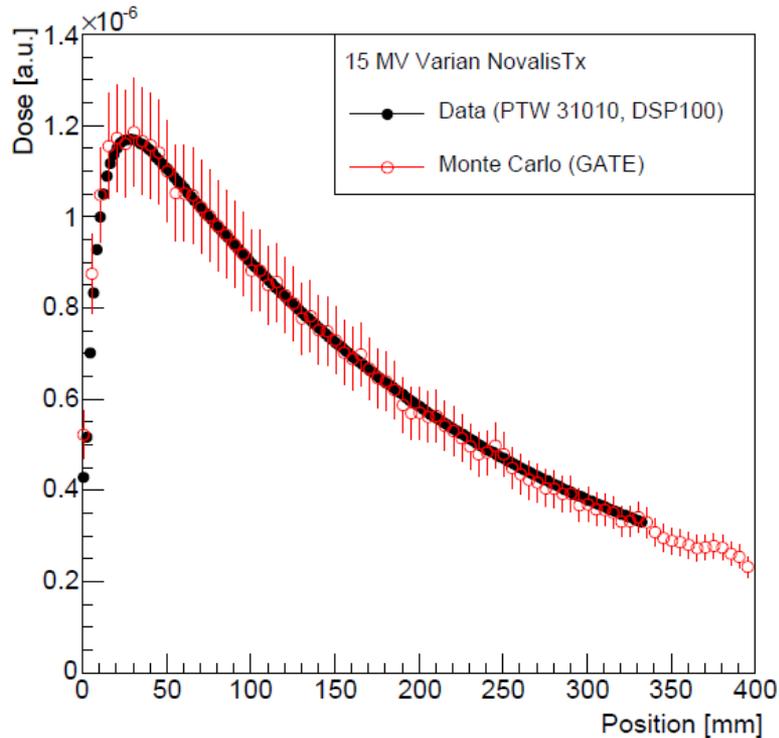
Neutrons diffusés

Composé	90 ° de la tête
Cible (W,Cu)	0,3%
Collimateur primaire (W)	35,3%
Cône égalisateur (W)	0%
Mâchoires (W)	53,6%
Blindage (Pb)	10,1%

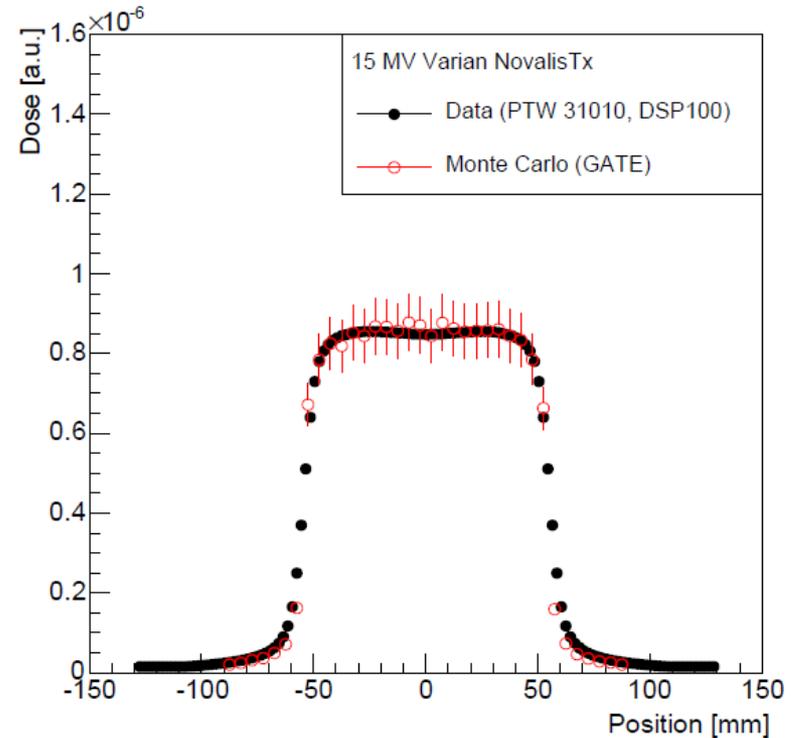
➡ Vérification expérimentale de cette dépendance spatiale et par rapport à la collimation

Simulation : validation

Rendement en profondeur



Profil latéral de dose

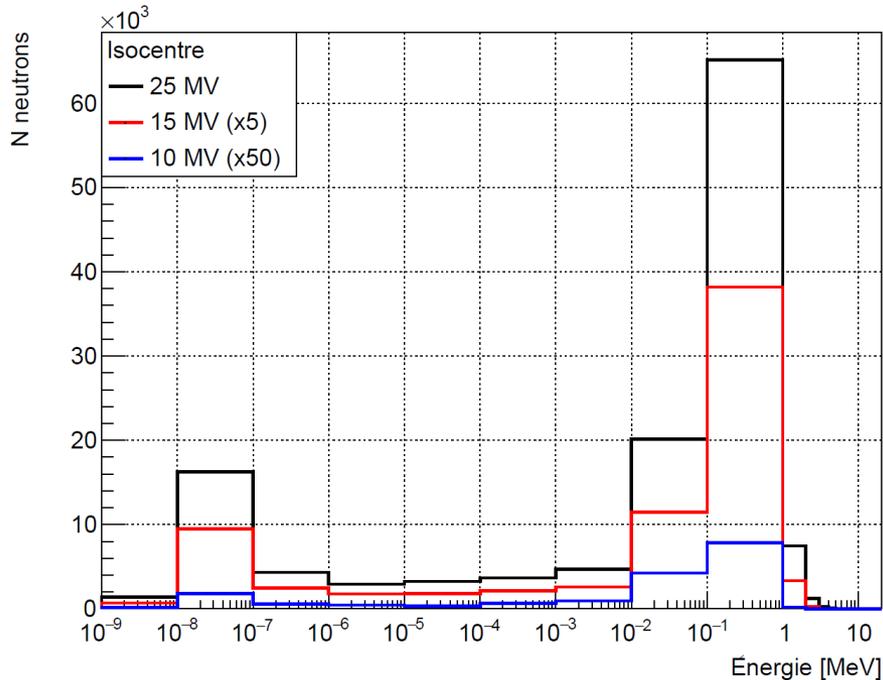


✓ Bonne reproduction du faisceau de photons primaires : étude neutrons secondaires

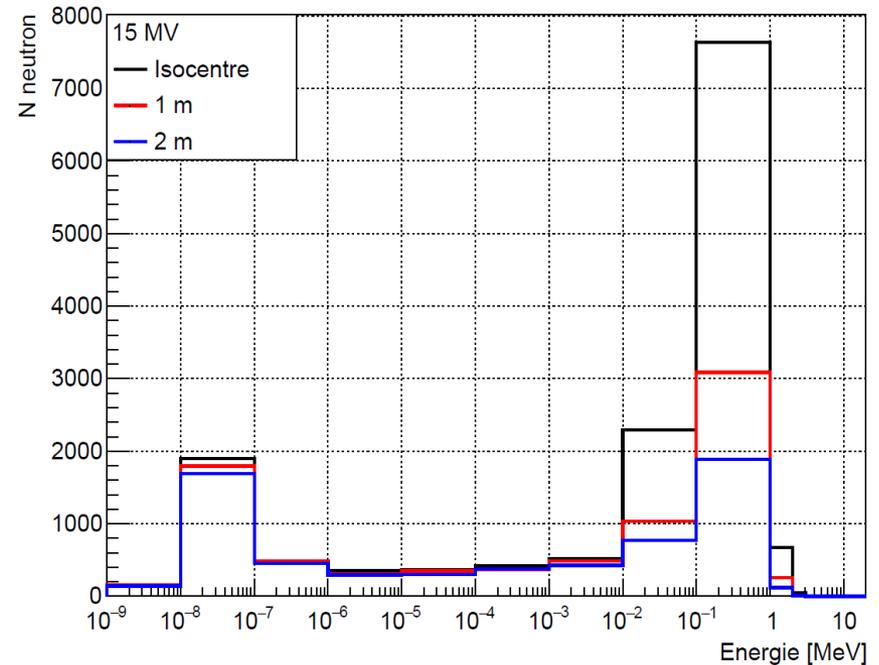
Influence de la qualité du faisceau et distance



Qualité du faisceau



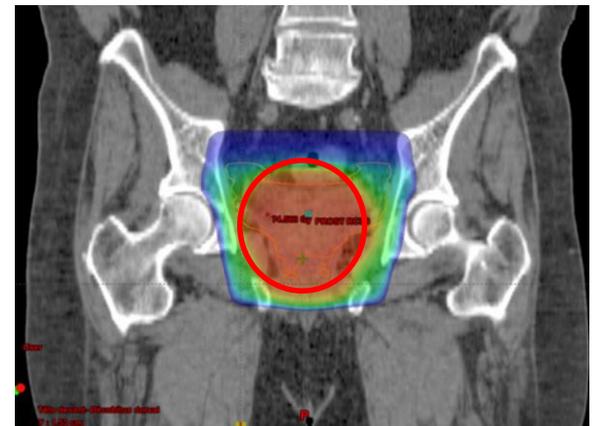
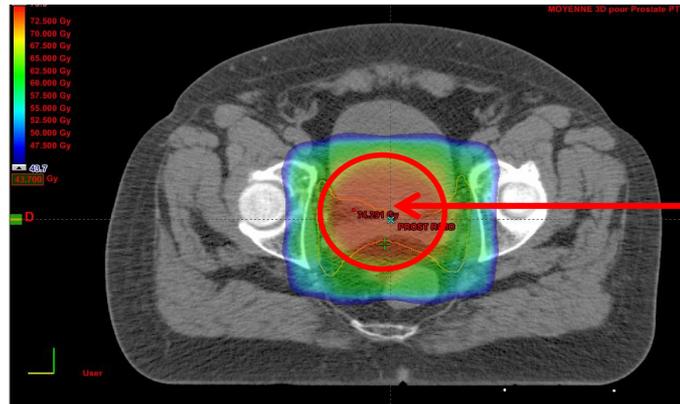
Distance à l'isocentre



- ✓ Augmentation de la fluence et de l'énergie moyenne avec la qualité du faisceau
- ✓ Diminution de la composante rapide avec la distance (25 et 45% à 1 et 2m)
- ✓ Pas de dépendance de la composante thermique par rapport à la distance

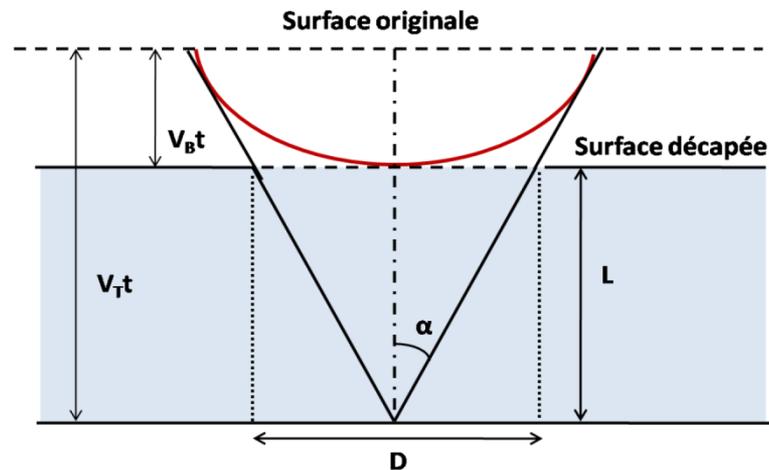
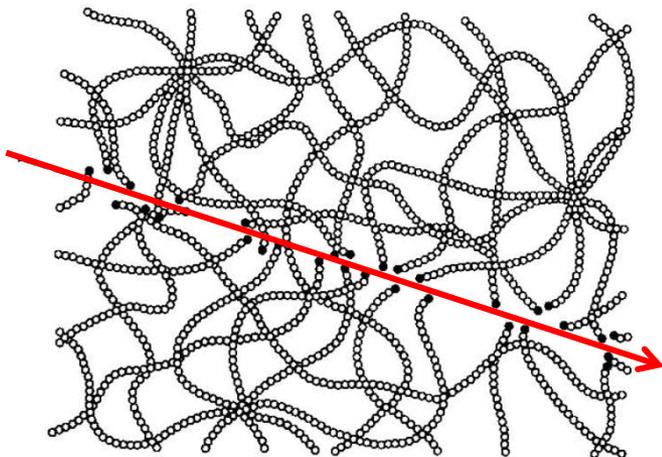
Dose périphérique : définition

- Dose déposée dans les organes et tissus non visés par le traitement
 - tissus adjacents à la tumeur : dose périphérique proche
 - tissus distants de la tumeur : dose périphérique lointaine

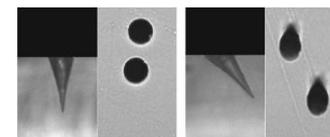


Détecteurs Solides de Traces Nucléaires

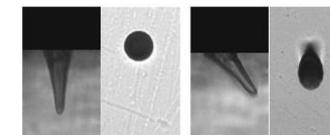
- Polycarbonate de diéthylène glycol
- Transfert d'énergie de la particule ionisante aux e- du milieu :
 - formation de traces dues aux dégâts moléculaires le long du trajet de la particule
 - révélation des traces après développement chimique



Détection des neutrons

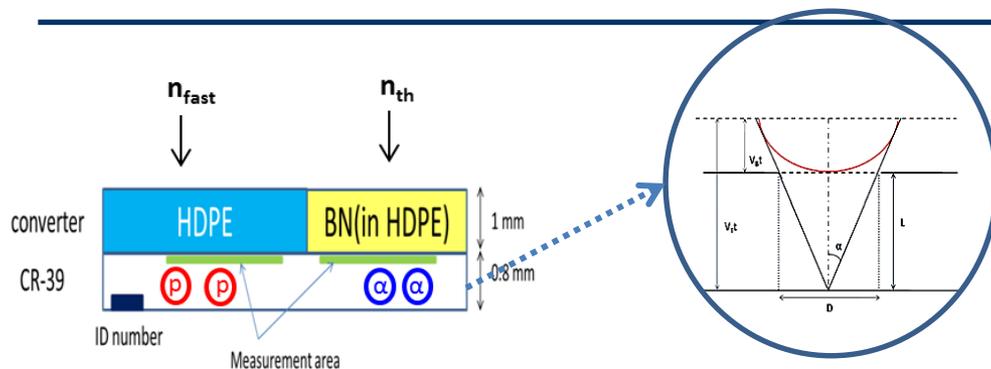


$t = 3h50$



$t = 4h30$

(B. Dorschel et al., 2003)



➔ Système à caractériser

✓ 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

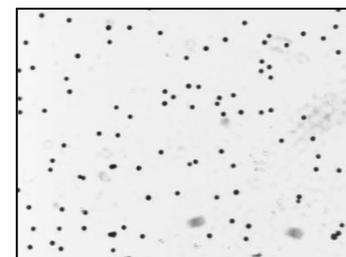
✓ Traitement



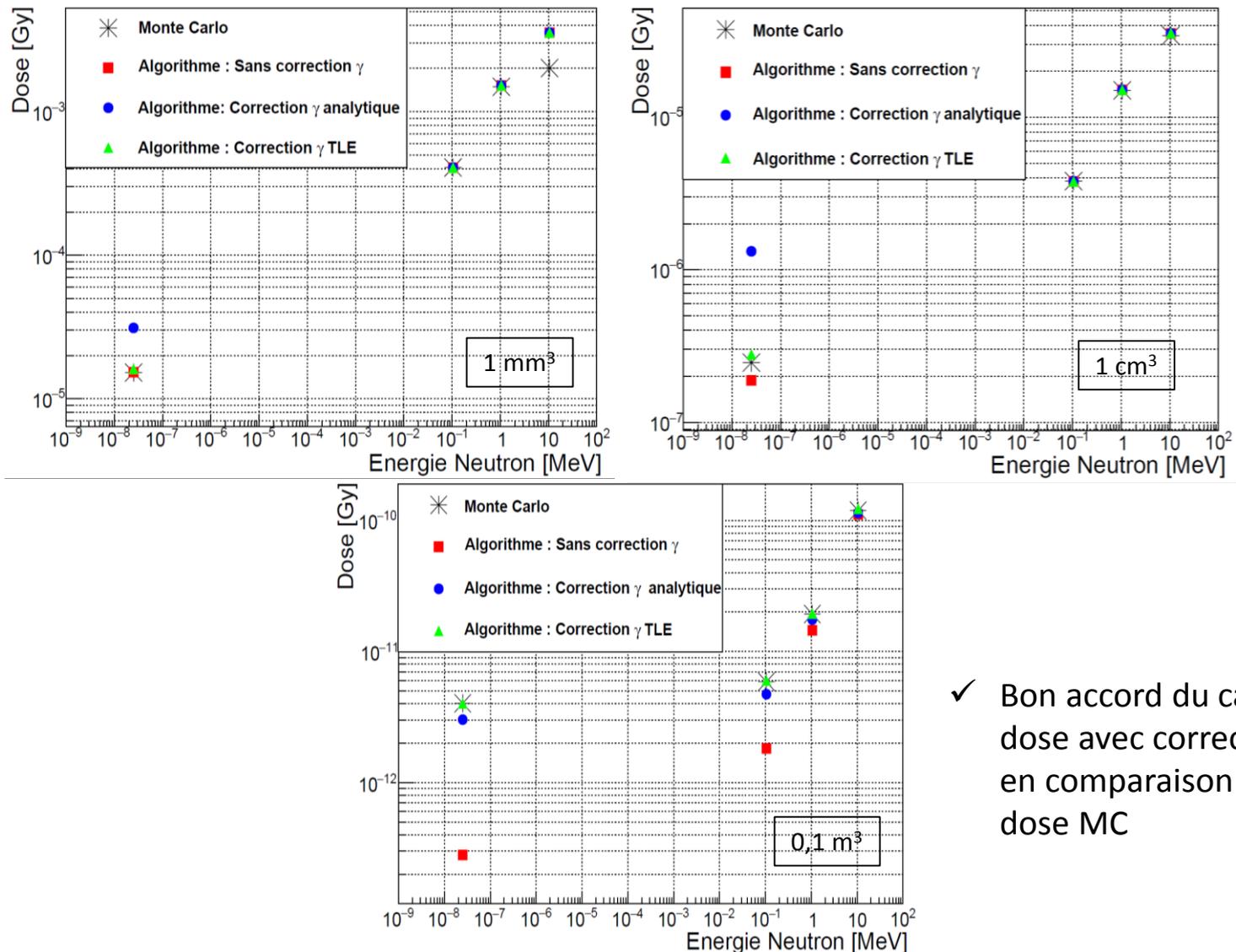
Développement chimique
KOH (90°, 2,5h,
30%)



Lecture
Microscope
optique



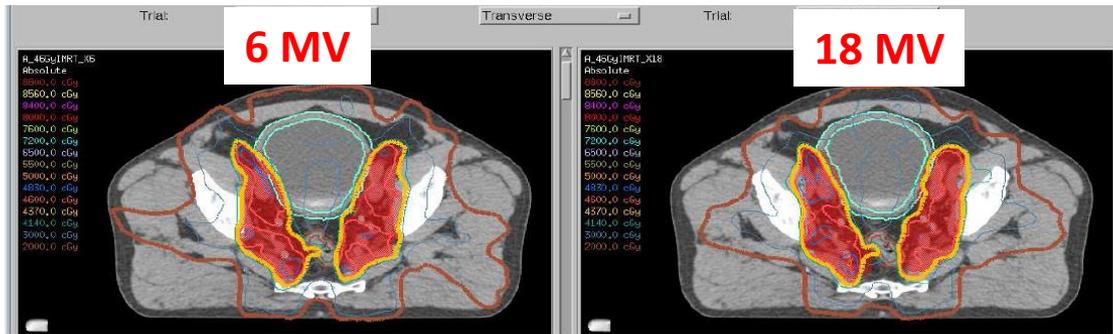
Correction de la dose Photon



✓ Bon accord du calcul de dose avec correction TLE en comparaison avec la dose MC

Comparaison de traitements

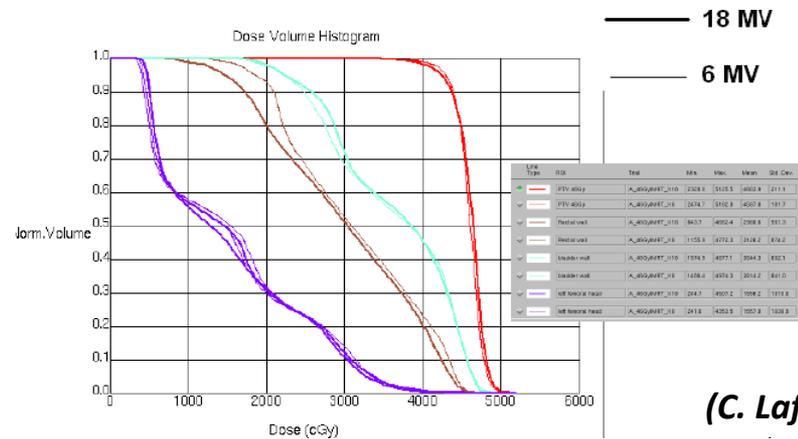
- RCMi pelvis en S&S : 6 MV vs 18 MV
- 6 MV : augmentation du temps de faisceau (DP photon)
- 18 MV : production de photoneutrons (DP neutron)



1013 UM



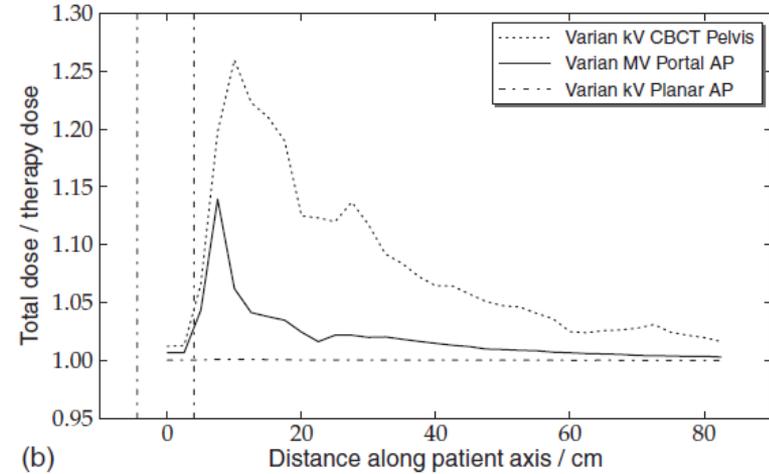
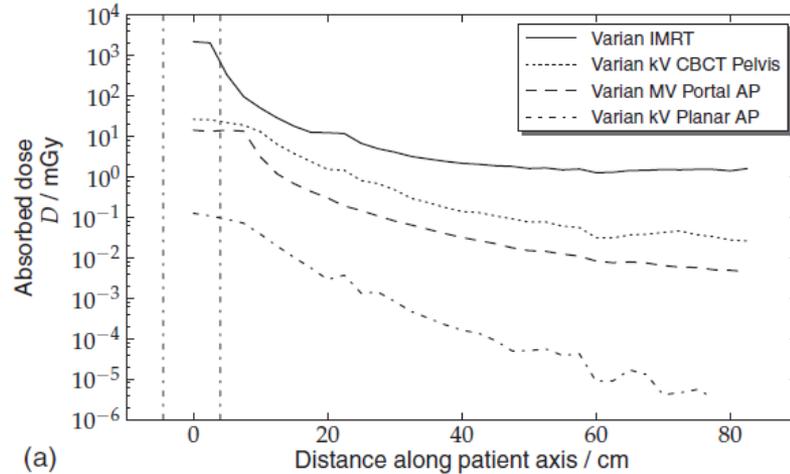
809 UM



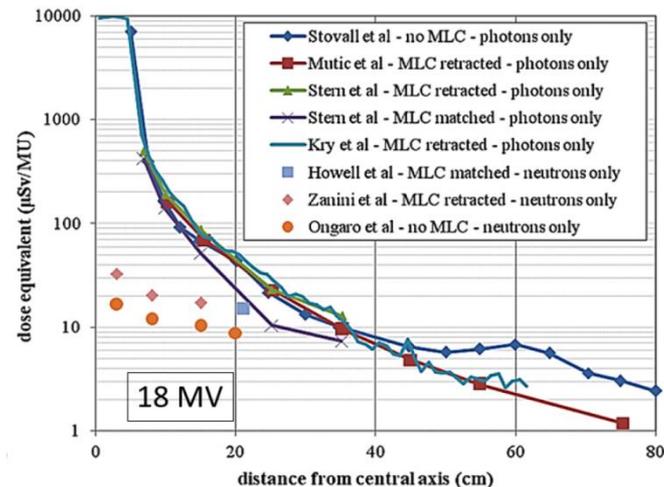
(C. Lafond, 2016)

Dose d'imagerie

- Au moins un ordre de magnitude de moins que la DP photon

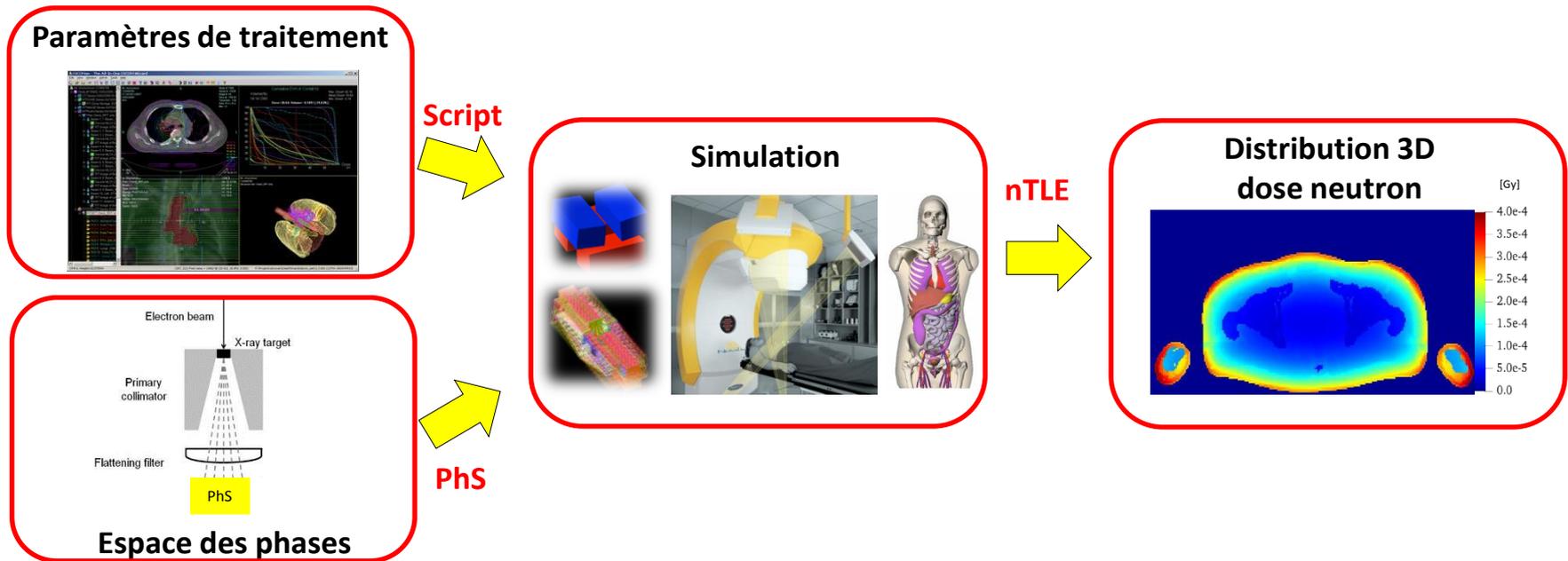


(R. Hälg et al, 2012)



Application

- Script pour la lecture des données du plan de traitement (DICOM)
- Simulation salle de traitement/fantôme
- Calcul nTLE de la distribution 3D de la dose neutronique

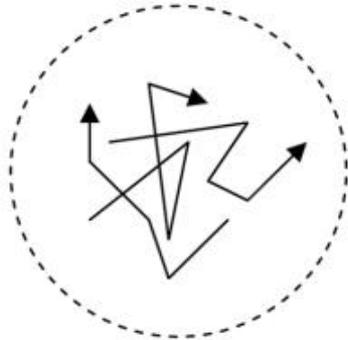


➡ Estimation de la carte de dose 3D neutron à partir d'un plan de traitement

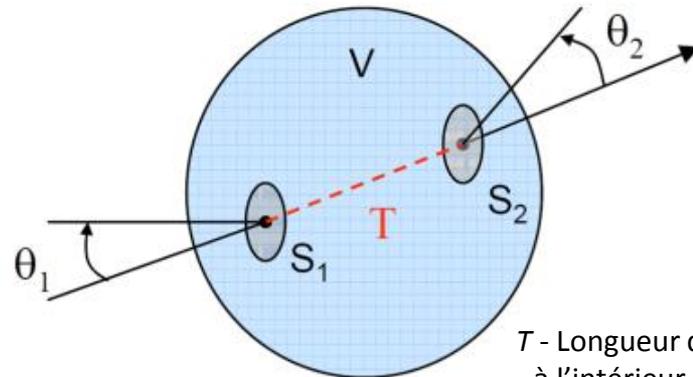
Méthode du TLE (GATE)

- TLE : Track Length Estimator
- Méthode de réduction de variance pour $E_\gamma < 1$ MeV
- 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

N - Nombre total de parcours enregistrés dans le volume V



M - Nombre de parcours ayant traversé le volume V

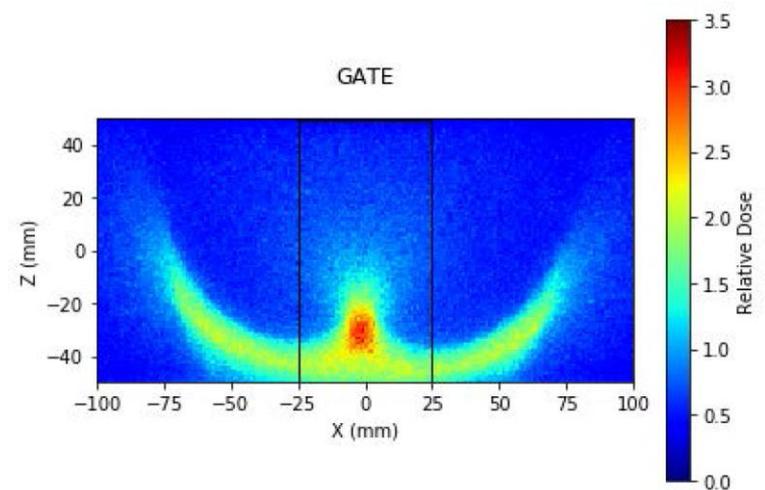
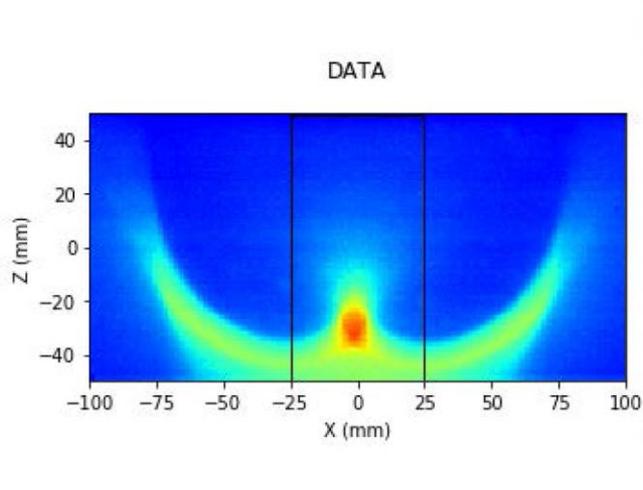
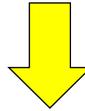


T - Longueur du parcours à l'intérieur du volume

$$\Phi = \frac{\sum_{i=1}^M T_i}{NV}$$

Application

- Amélioration de la modélisation de la simulation
→ Validation expérimentale pour un traitement VMAT



(J. Gasteuil – N. Arbor)