



In2p3

Université de Strasbourg

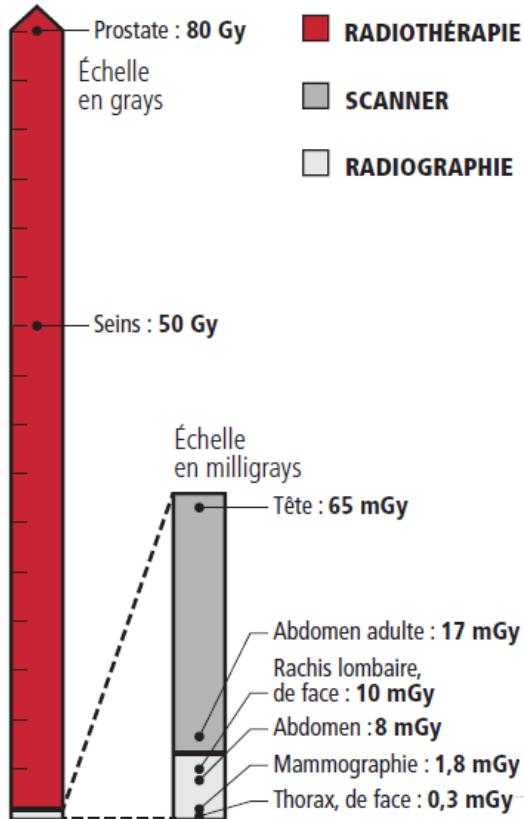
# Dosimétrie Neutron en Radiothérapie : Etude Expérimentale et Développement d'un Outil Personnalisé de Calcul de Dose Monte Carlo

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

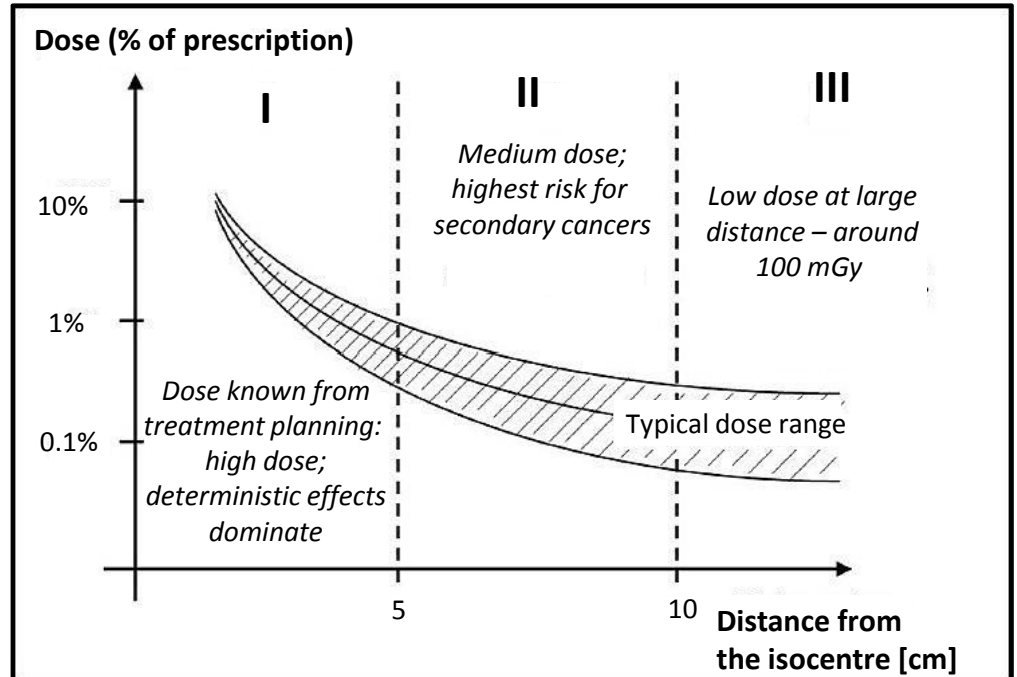


# Dose en Radiothérapie

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



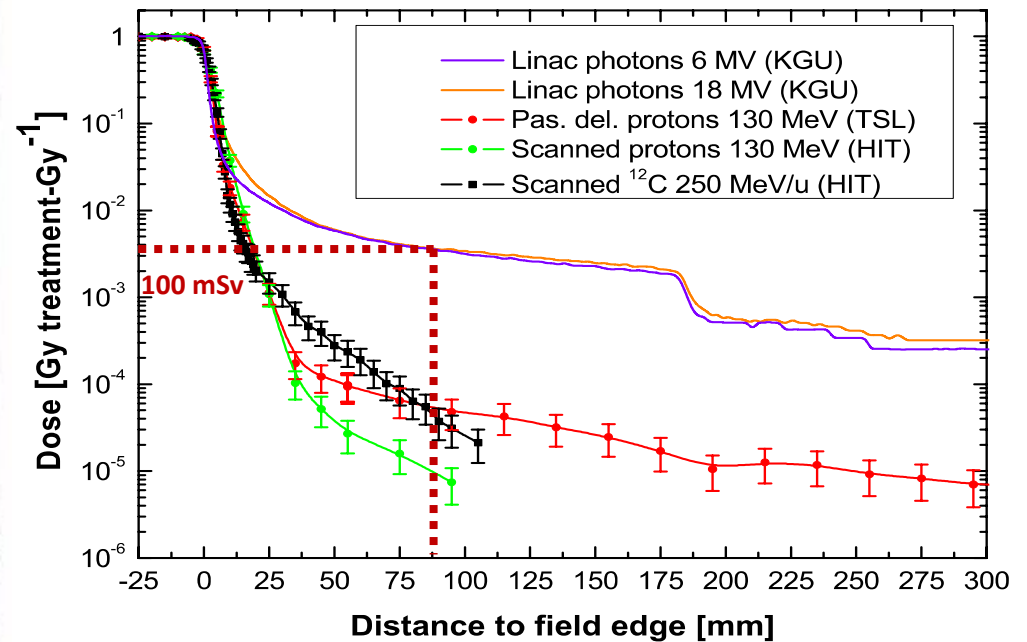
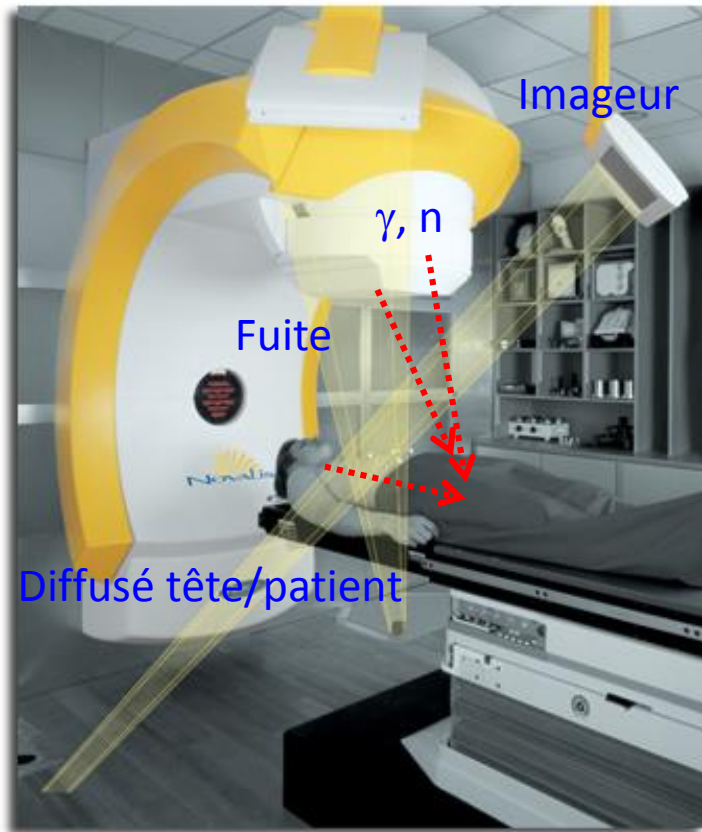
(IRSN, 2012)



(ML Taylor et al, 2011)

# Dose périphérique : origine

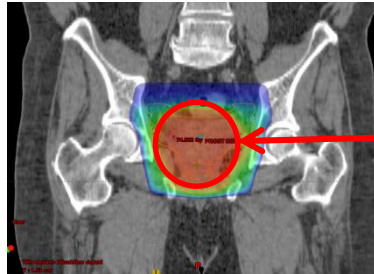
- 3 origines :
  - Photons : fuite et diffusé tête
  - Imagerie de contrôle
  - Neutrons



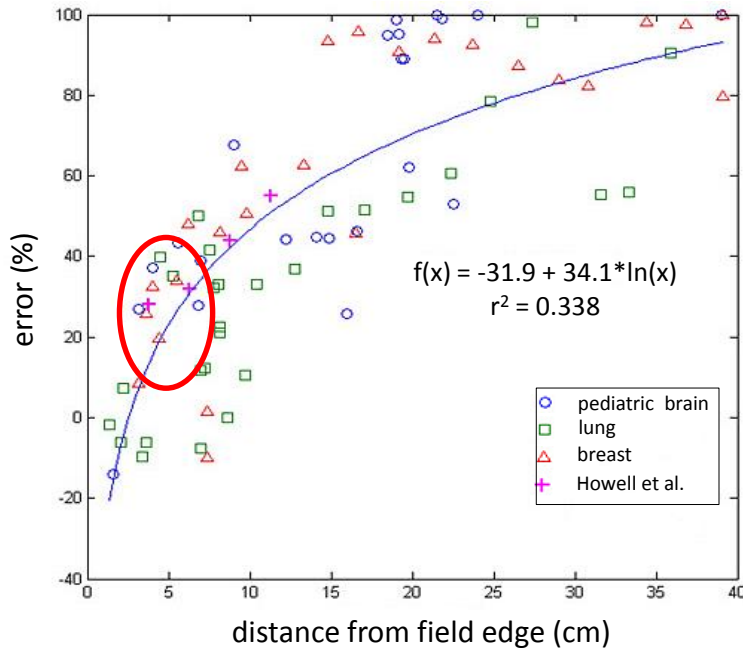
(R. Kaderka, 2012)

# Dose périphérique : estimation

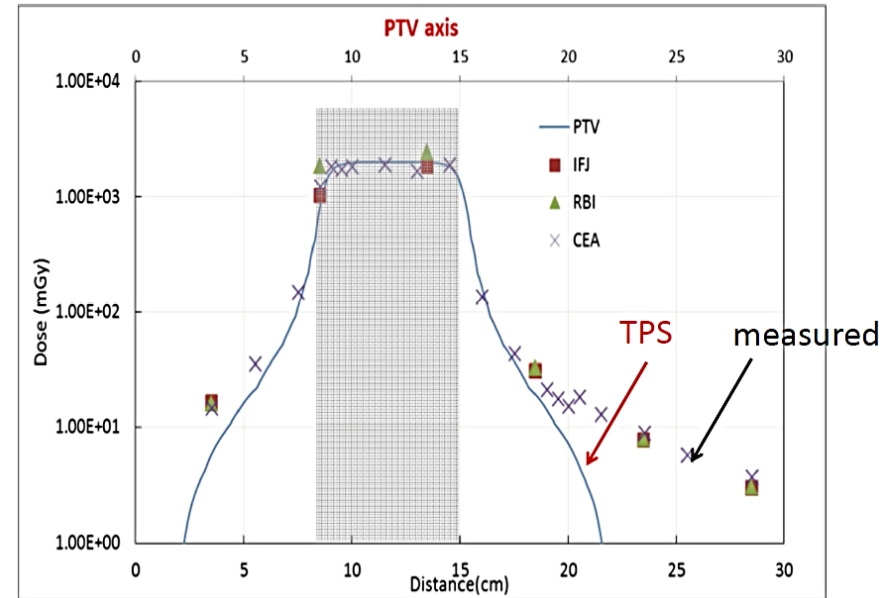
- Dose périphérique mal estimée en radiothérapie :
  - photons : erreur de l'ordre de 30% à 5 cm des bords du champ
  - neutrons : pas pris en compte



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 :

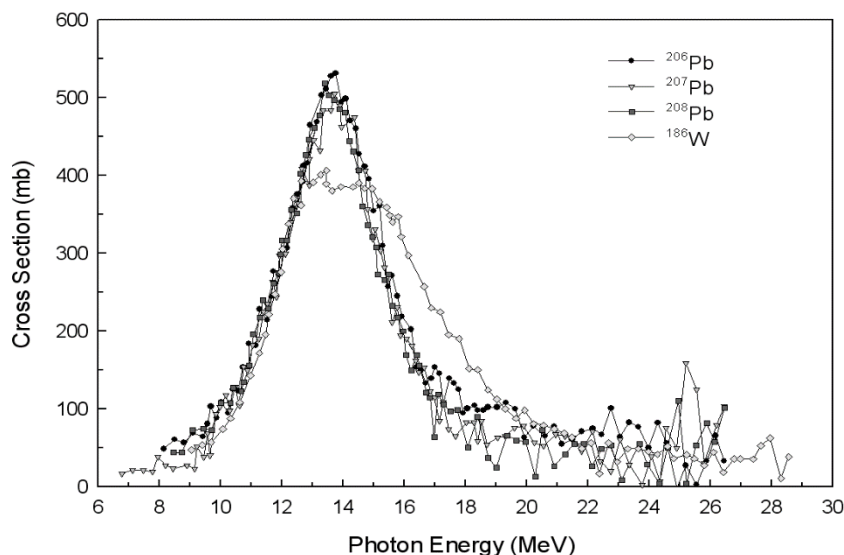
Al : ~13 MeV

Fe : ~11 MeV

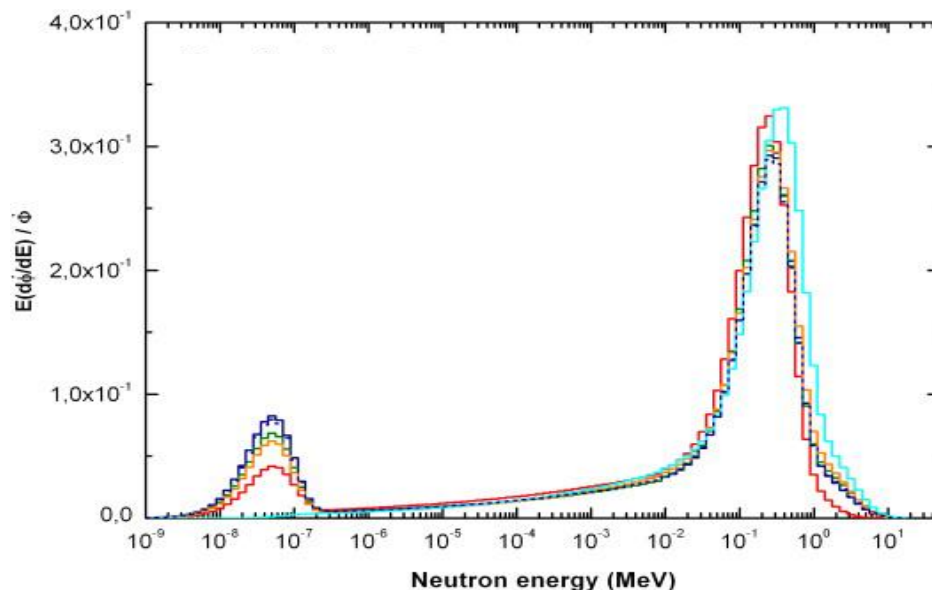
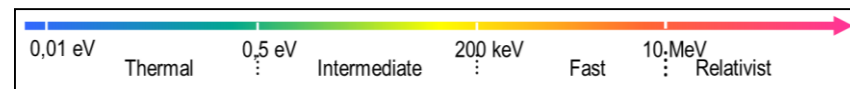
Cu : ~10 MeV

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

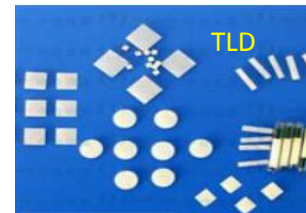
- Caractéristiques du détecteur requises :
  - mesures en champ mixte  $\gamma, n$
  - utilisable sur une large plage d'énergie pour la détection de la composante rapide et thermique

## Actifs



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

## Passifs

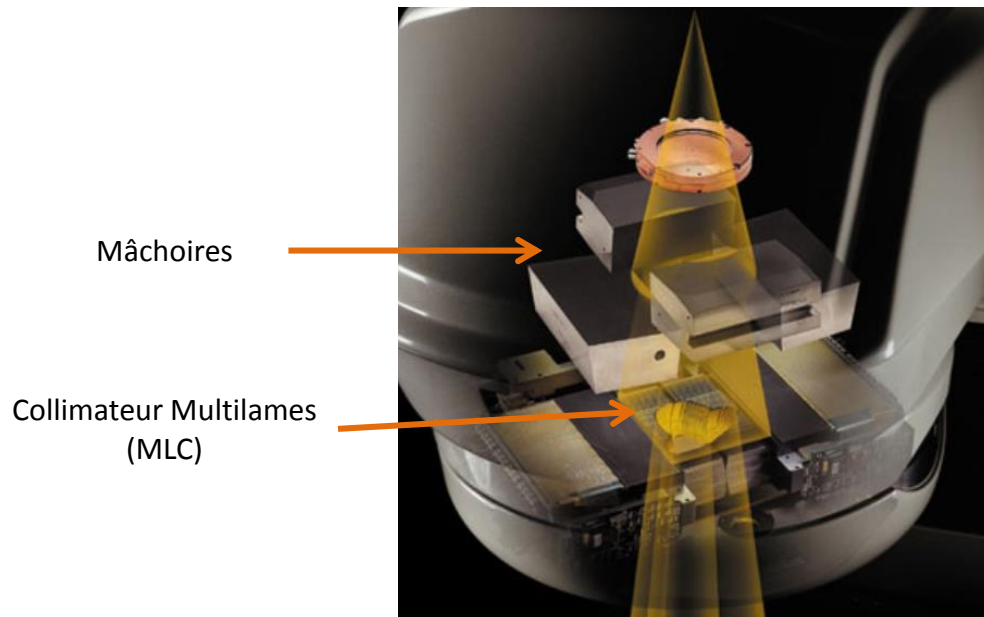


- ⊕ large plage d'énergie
- ⊕ transparence aux photons



# 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

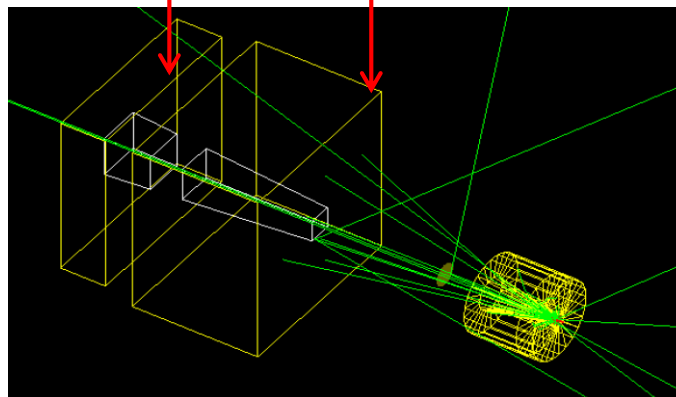
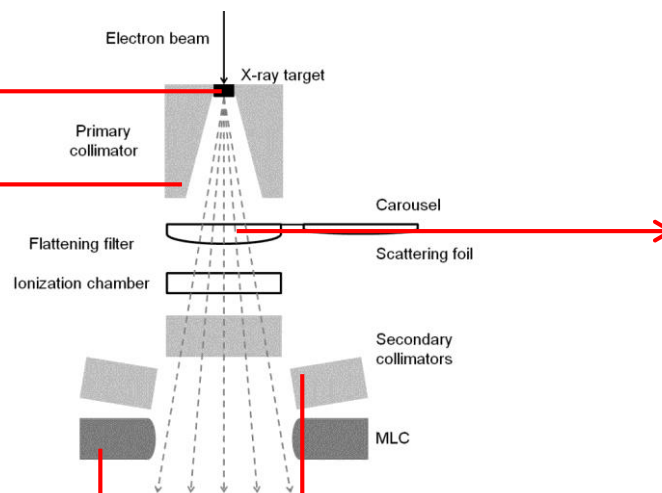
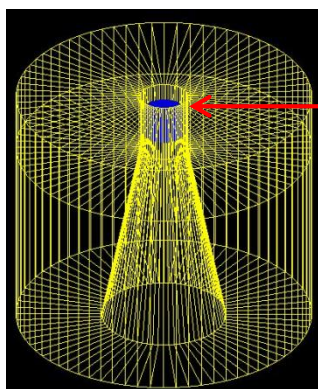
- Collaboration avec le Centre Paul Strauss
  - Accélérateur : Novalis Tx
  - Energie : 15 MV



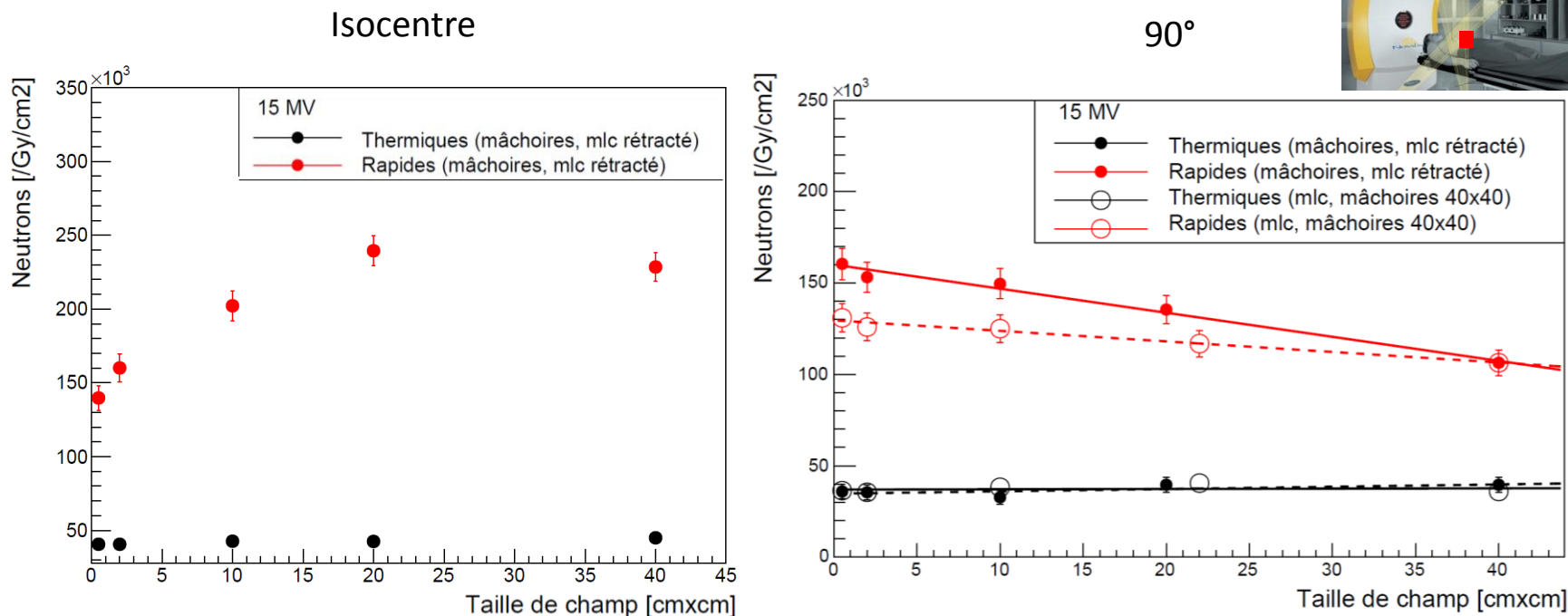
Développement d'une simulation MC et mesures expérimentales

# Simulation Varian Novalis Tx : Gate 7.1

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

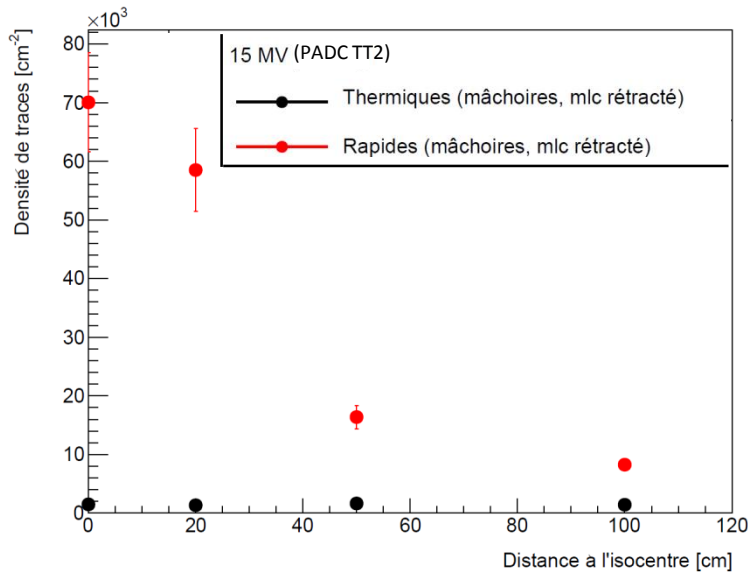
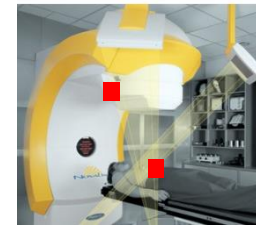
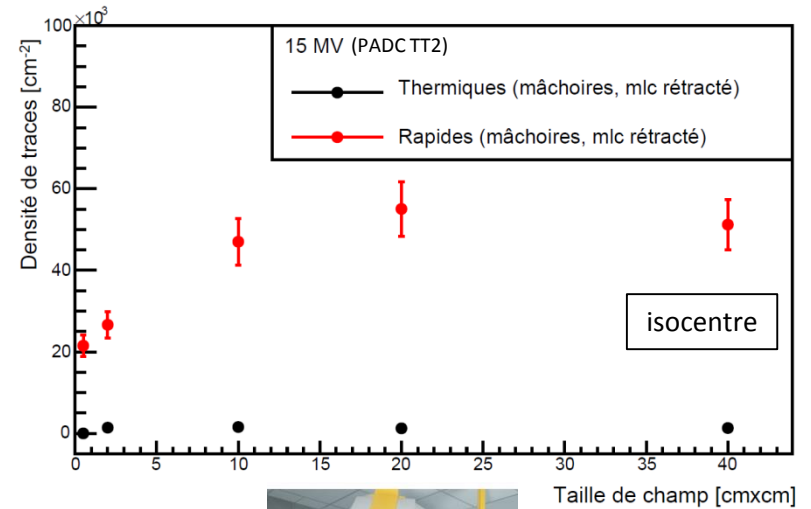
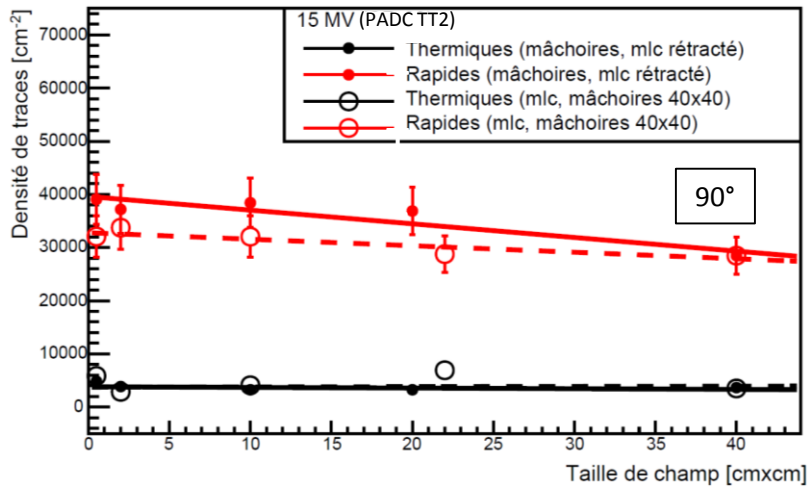


# Résultats : Simulation



- ✓ 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**

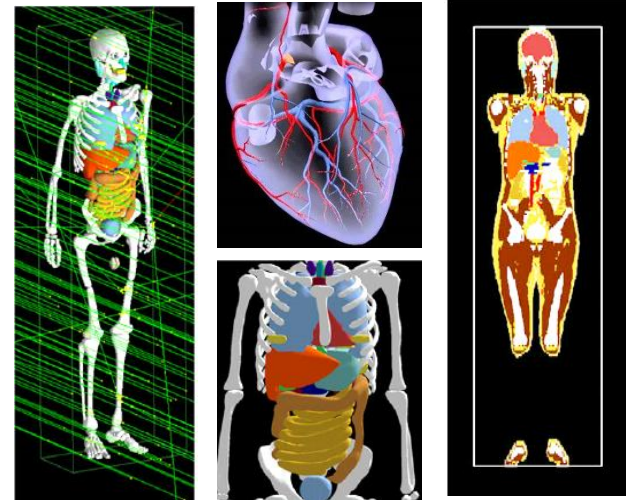
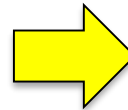
**➡ Choix de mise en place d'un système MC de calcul de dose dans GATE**

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**

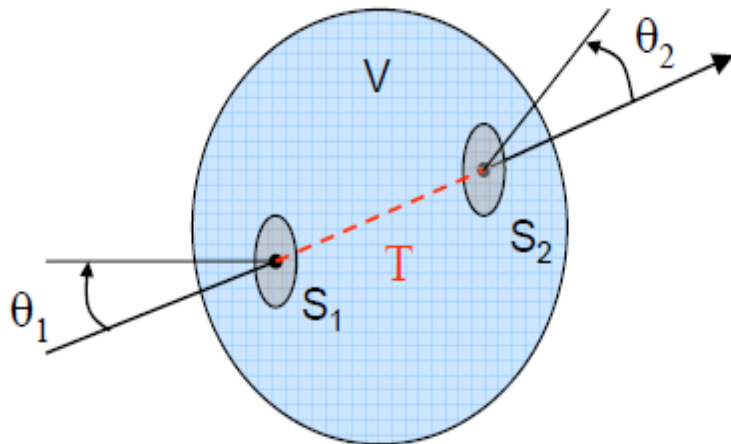
➔ Méthode MC : précision ++ mais **chronophage**





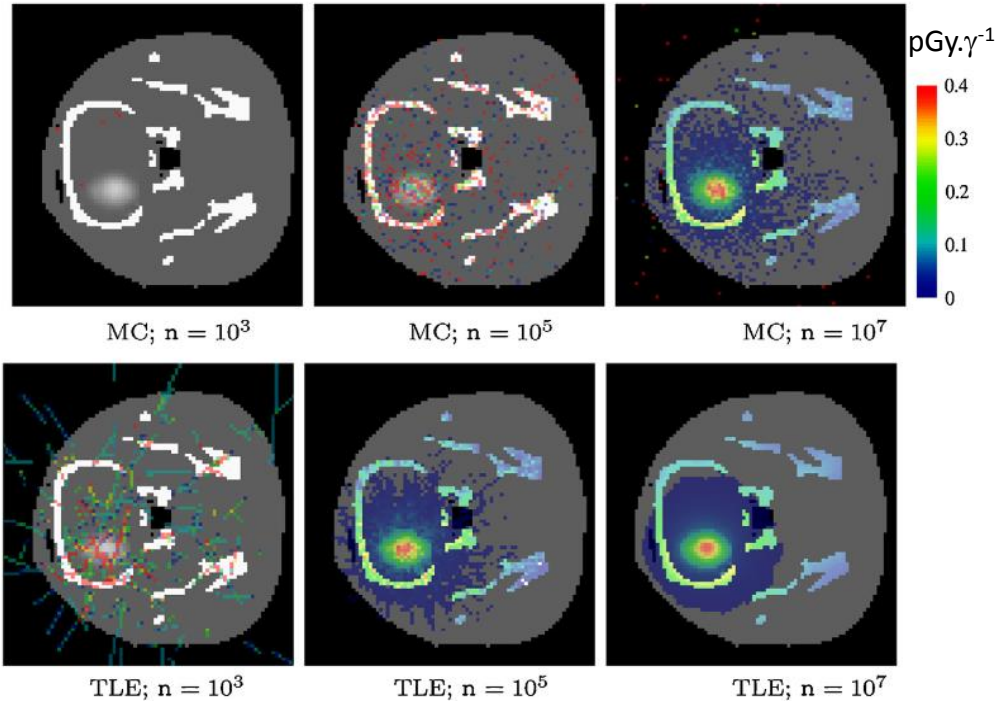
# Méthode du TLE (GATE)

- 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



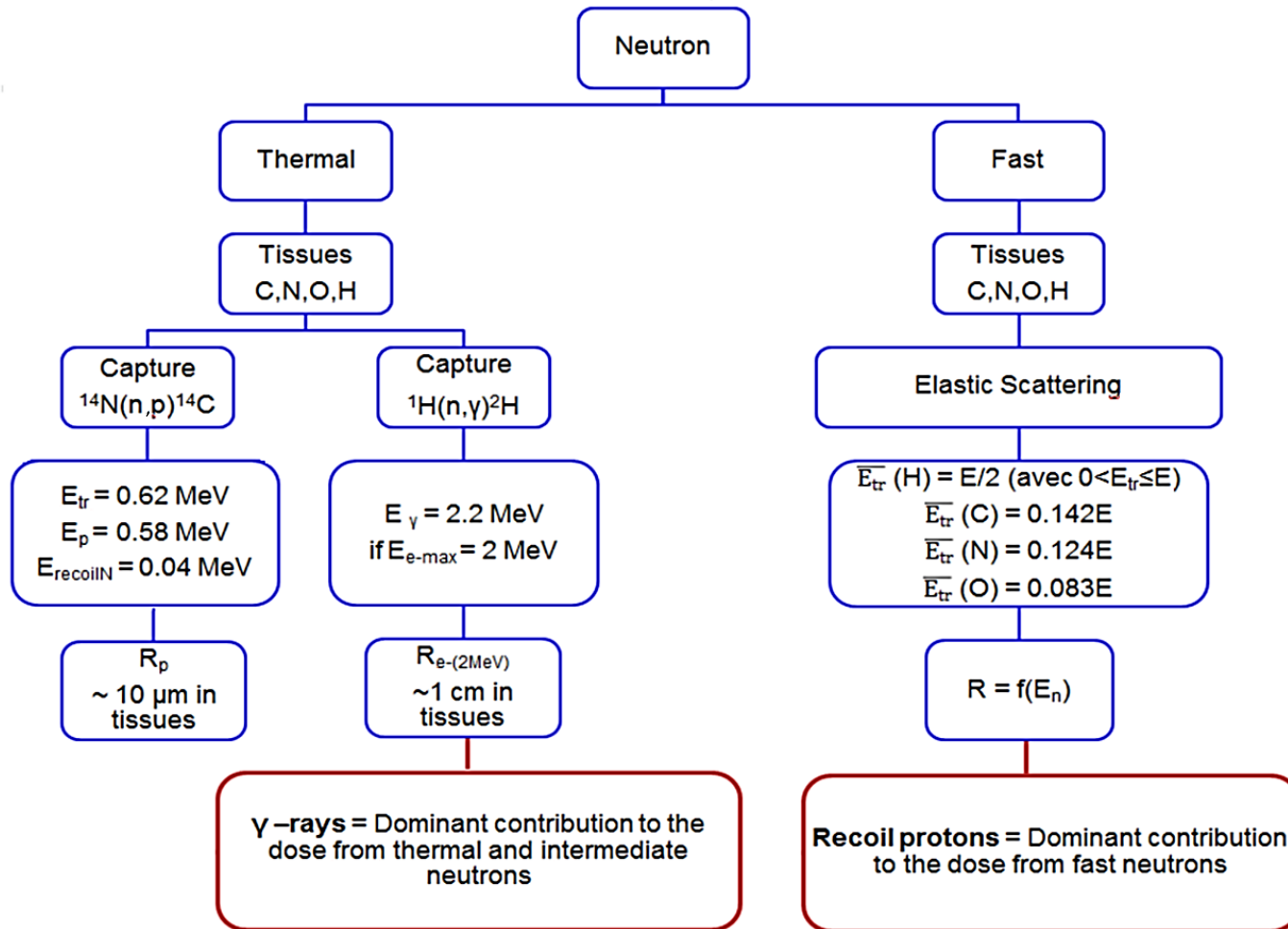
$$\Phi = \frac{T}{V}$$

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



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

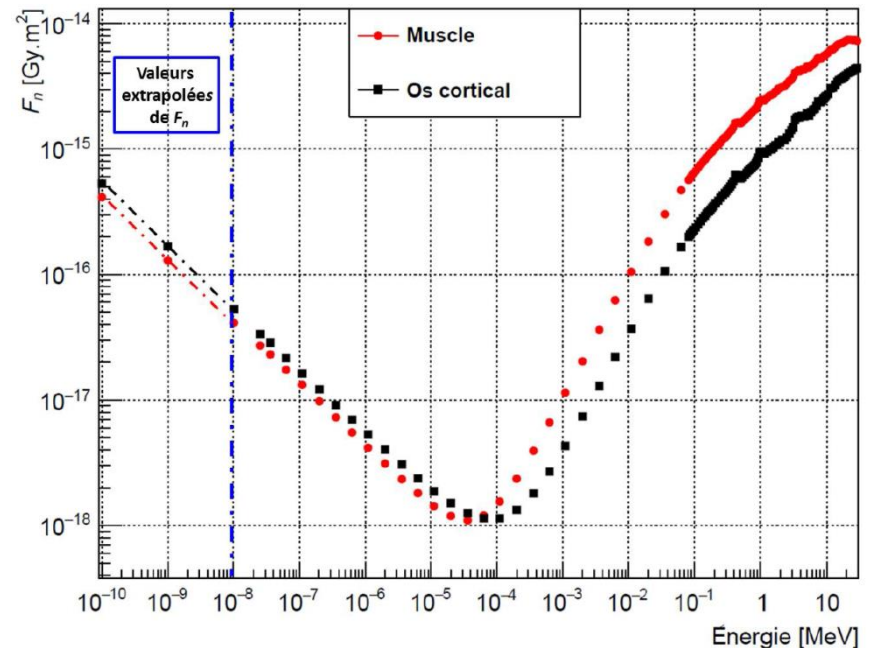
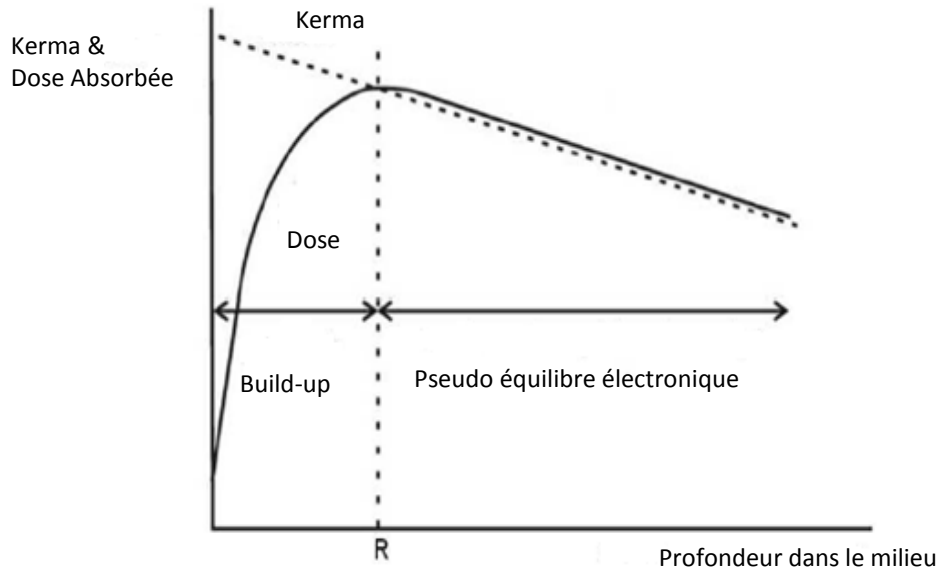
# Dépôt de Dose : Particules secondaires produites



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

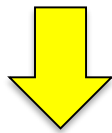
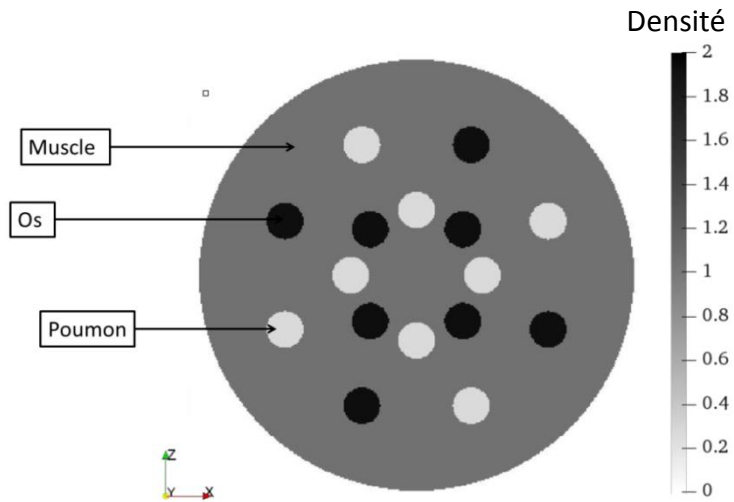
➡ Correction : extrapolation TLE à haute énergie

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

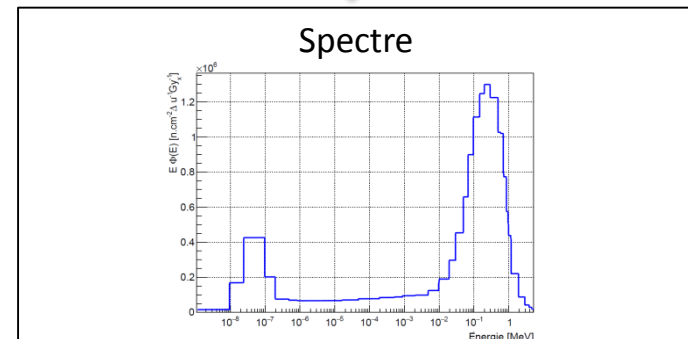
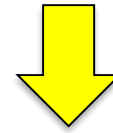
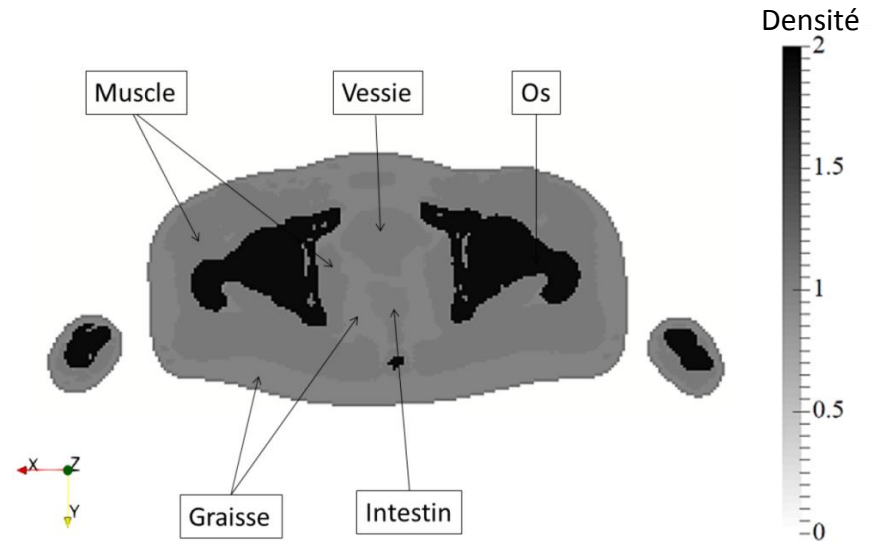
➡ Base de données pour le calcul de la composante photonique de dose

# Cas voxélisés simulés

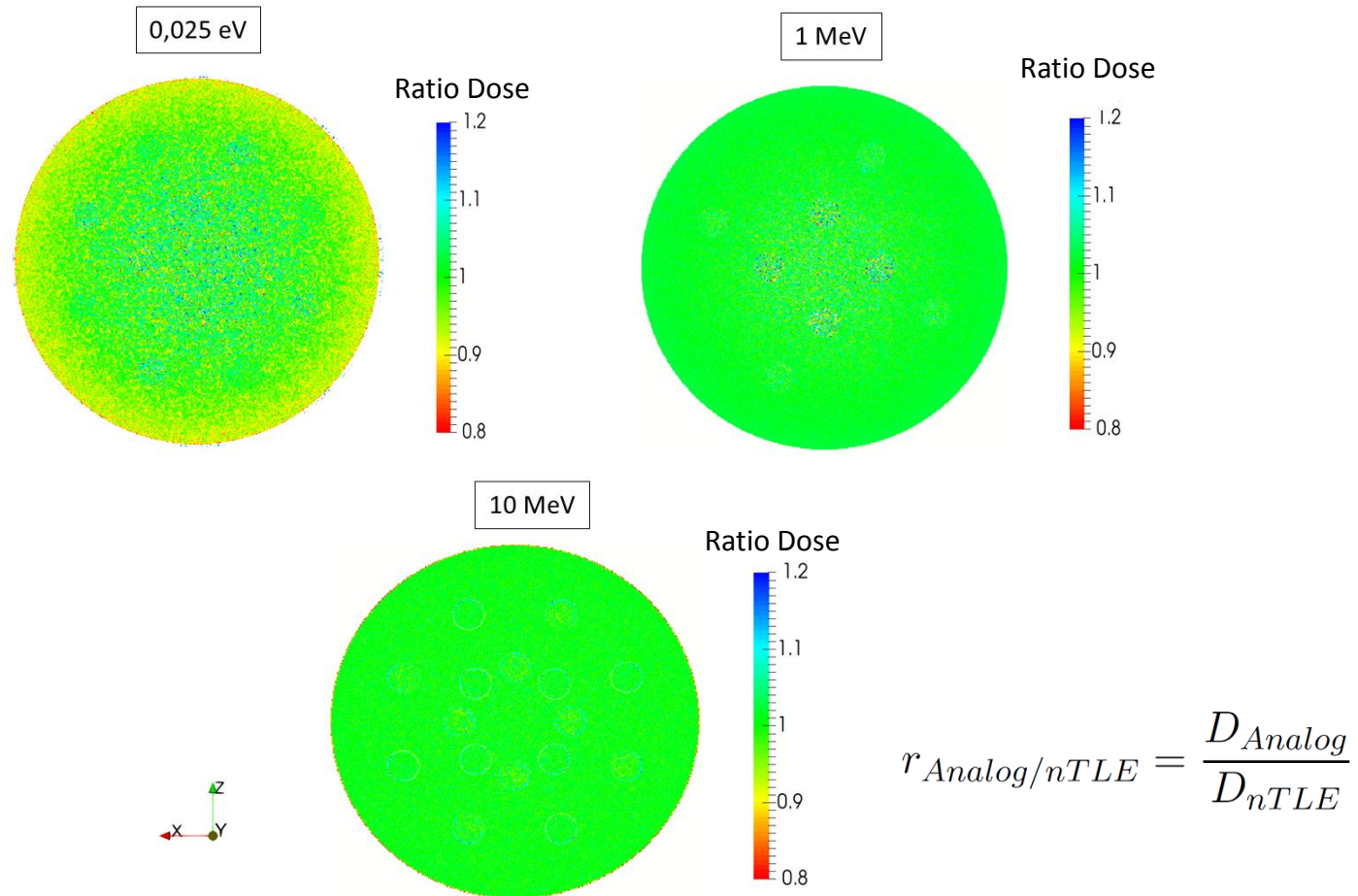
- Volume simple hétérogène : voxels de  $1 \text{ mm}^3$
- Zone pelvienne du fantôme ICRP : voxels de  $35 \text{ mm}^3$



Faisceaux monoénergétiques  
0,025 eV  
1 MeV  
10 MeV

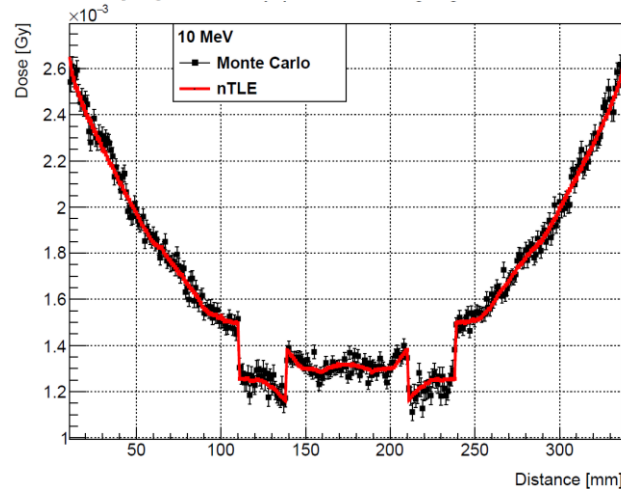
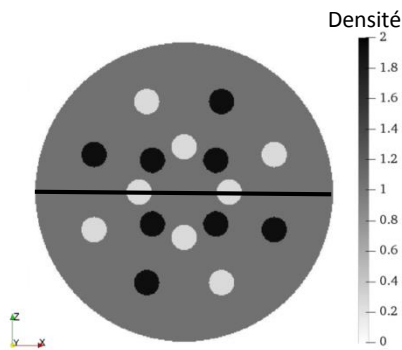
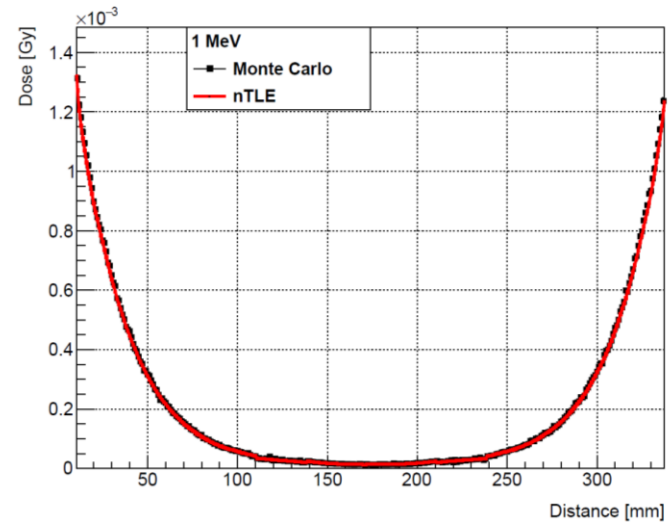
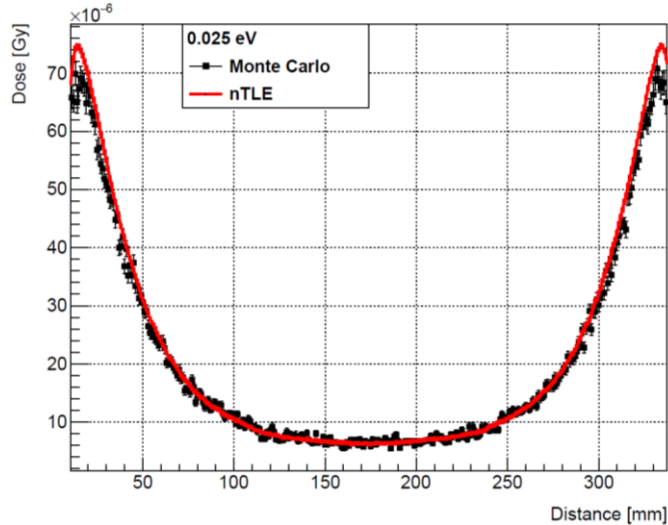


# Voxelisation simple : dose



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

# Voxelisation simple : dose

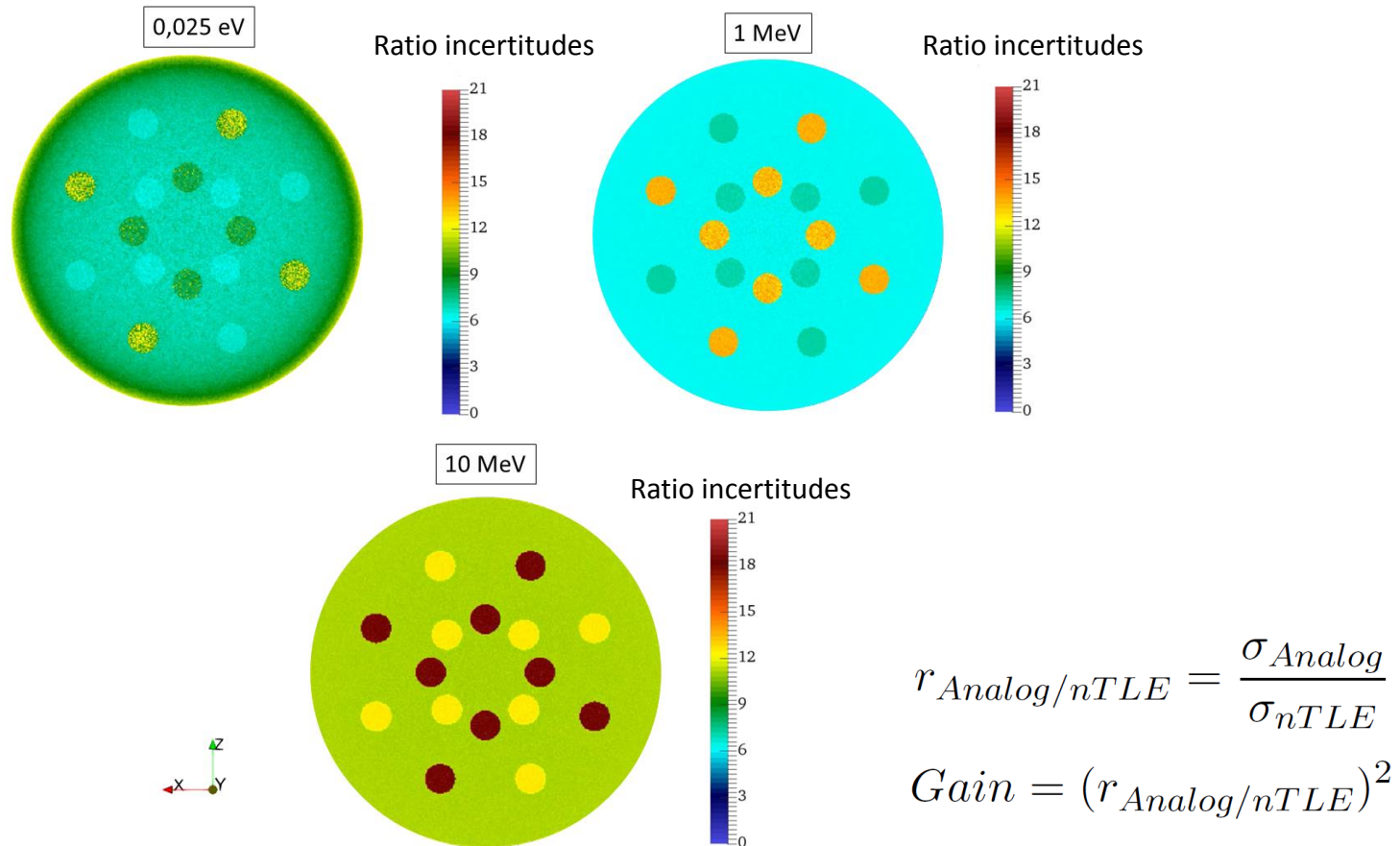


- ✓ Profils de dose en bon accord avec la méthode MC aux fluctuations statistiques près à 0,025 eV, 1 MeV et 10 MeV



# Voxelisation simple : gain en temps de calcul

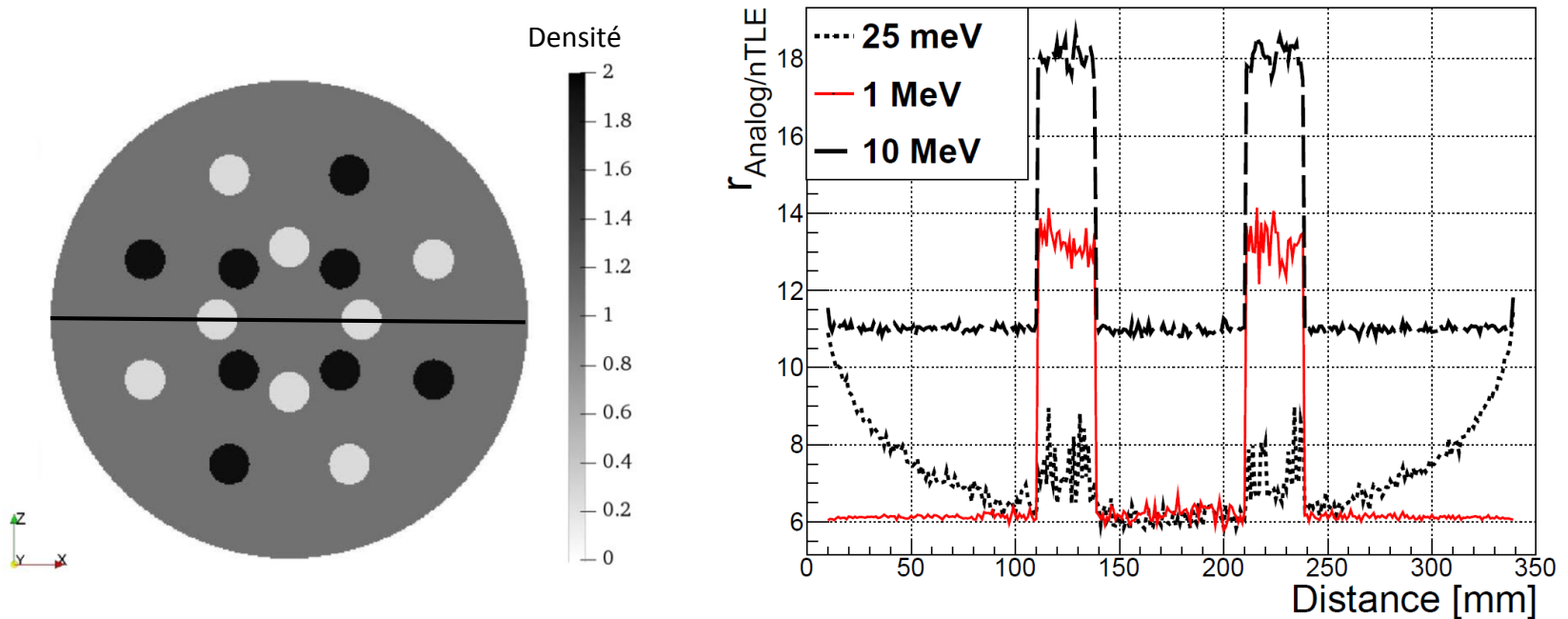
- Estimation du nombre de particules nécessaires pour obtenir une erreur statistique donnée



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

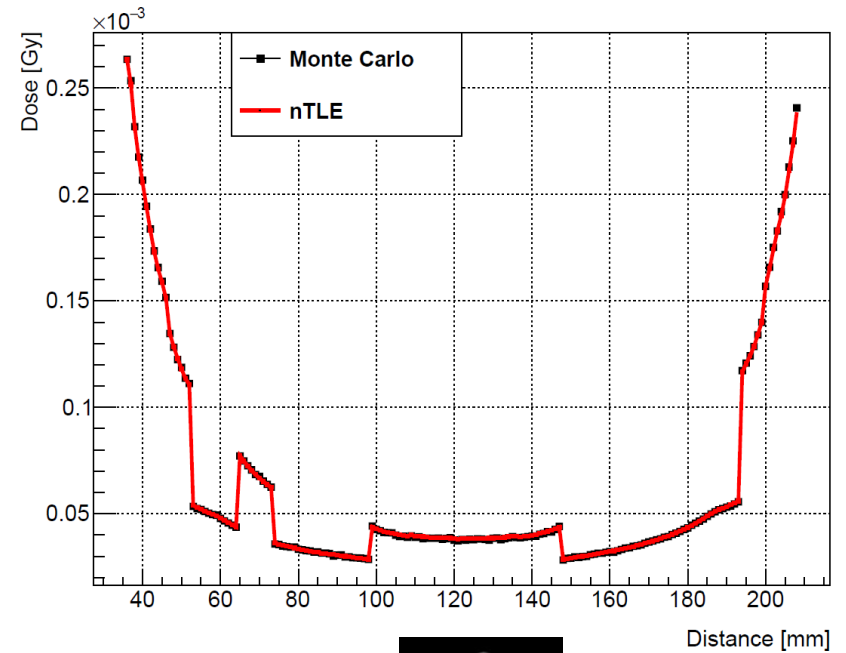
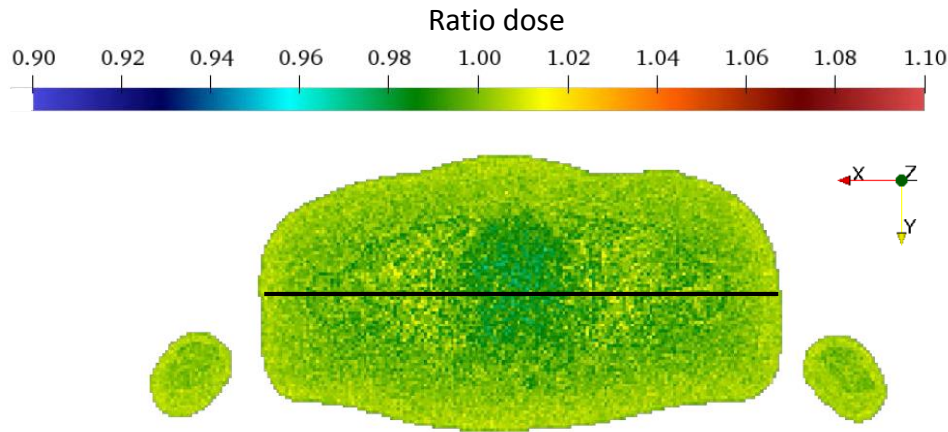


# Voxelisation simple : gain en temps de calcul



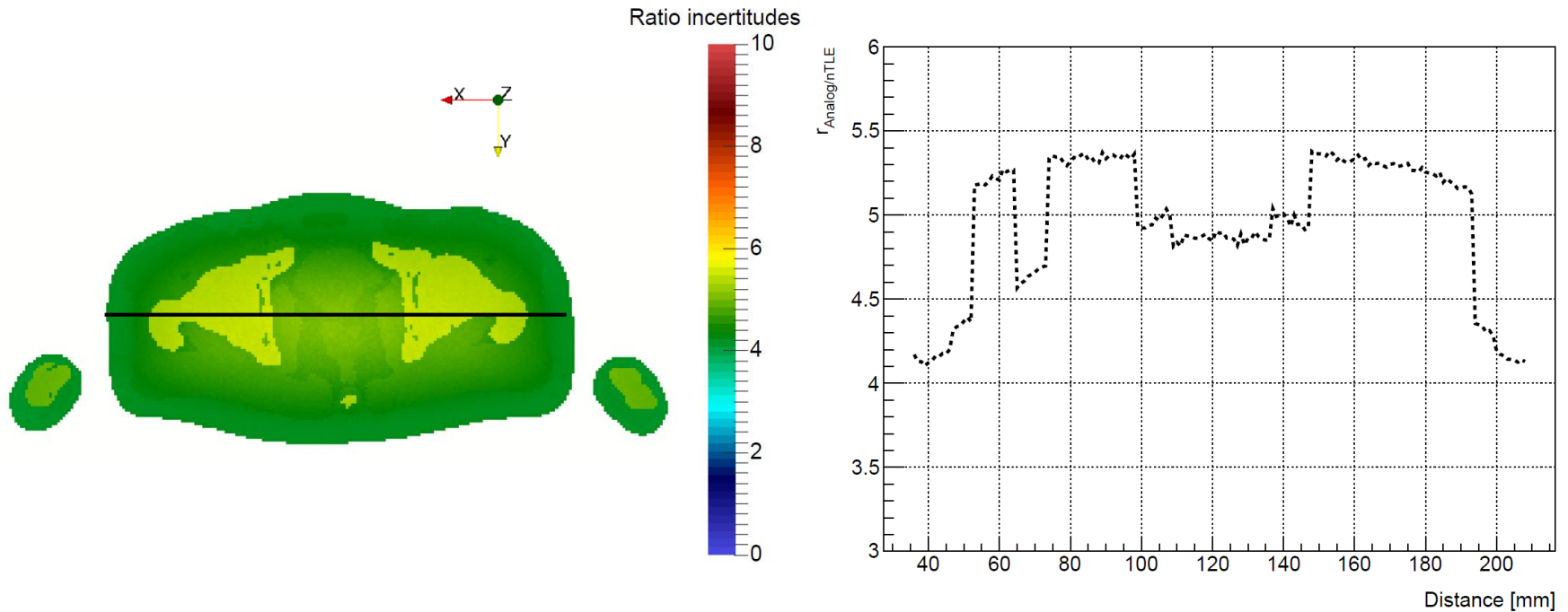
- ✓ Gain dépendant de l'énergie des neutrons incidents et de la composition du milieu

# 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 <sup>3</sup> ]	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 mm<sup>3</sup>) : gain en temps de calcul de l'ordre de 100 en fonction de l'énergie des neutrons**
- ❖ **Fantôme voxélisé (40 mm<sup>3</sup>) : 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 :**

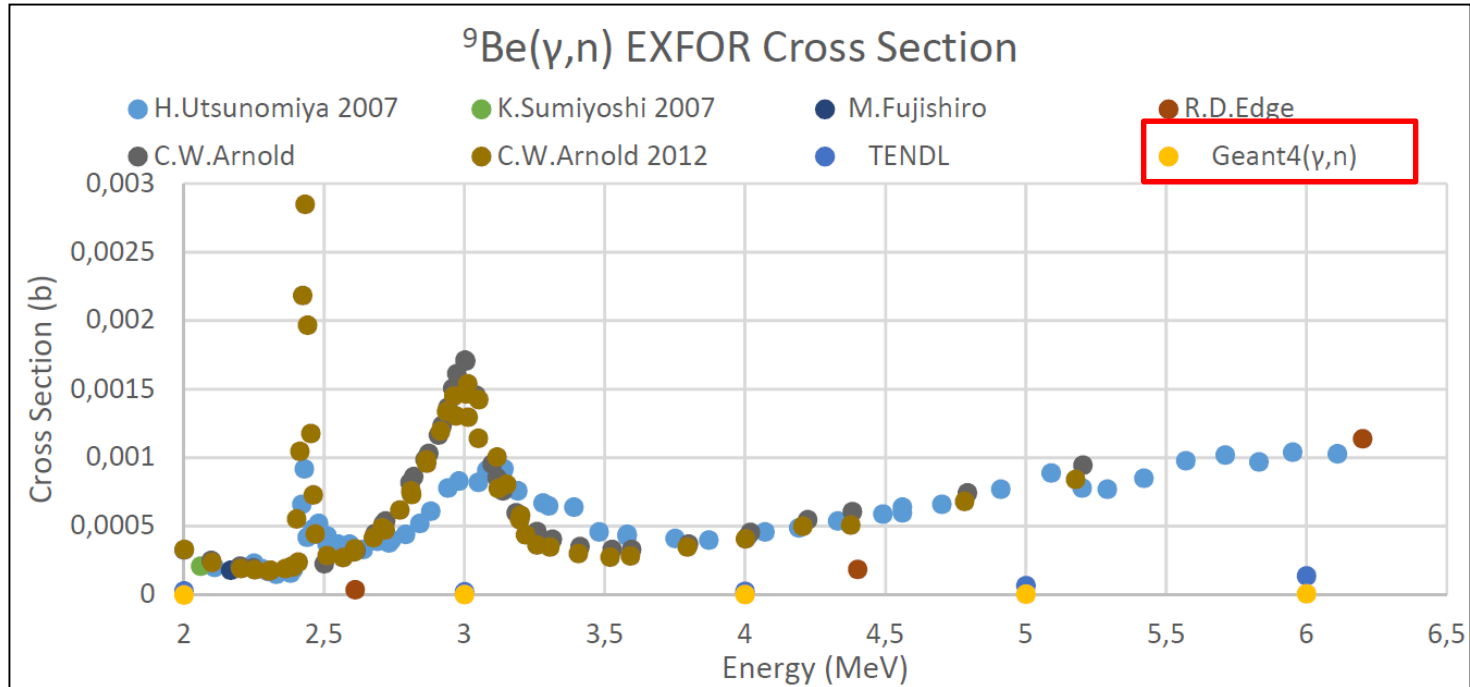
→ calcul de dose avec erreur < 1% par rapport à MC dans un fantôme voxélisé (40 mm<sup>3</sup>)

→ gain en temps de calcul entre 25 et 100 pour une voxélisation de 40 et 1 mm<sup>3</sup>

→ 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

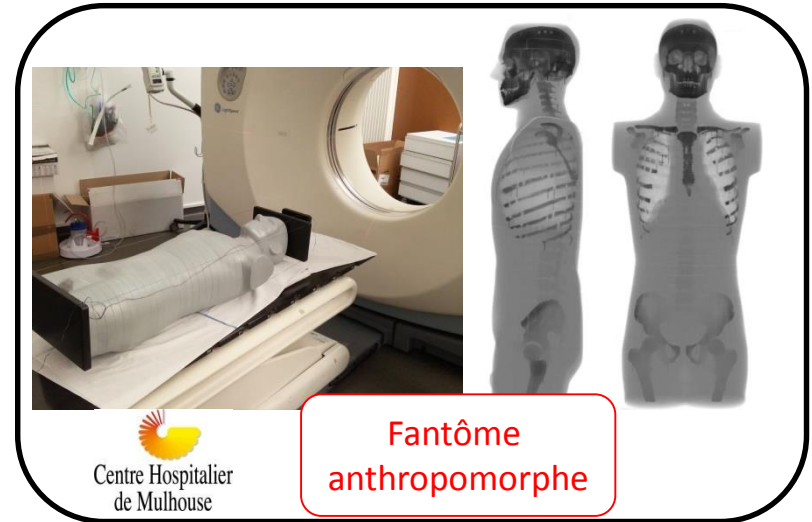
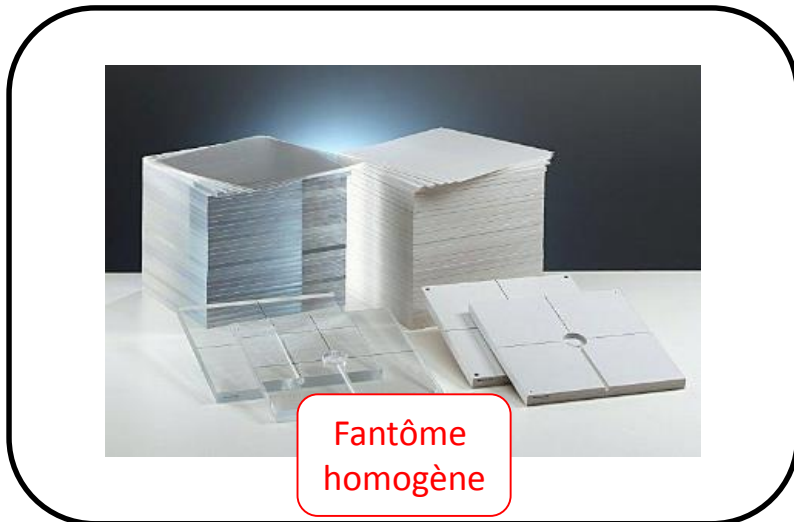
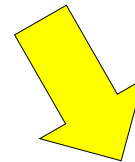
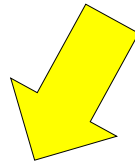
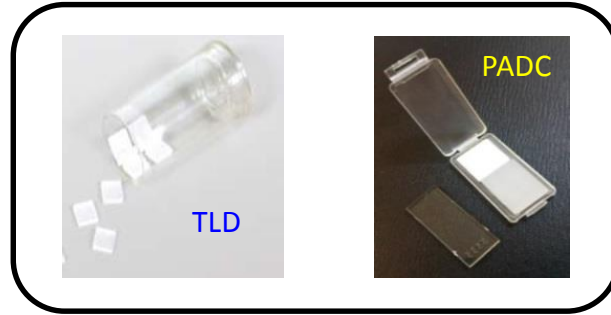


*(S. Keshmiri)*

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

# Perspectives : Validation

- Dose neutron calculée dans GATE



Merci pour votre attention



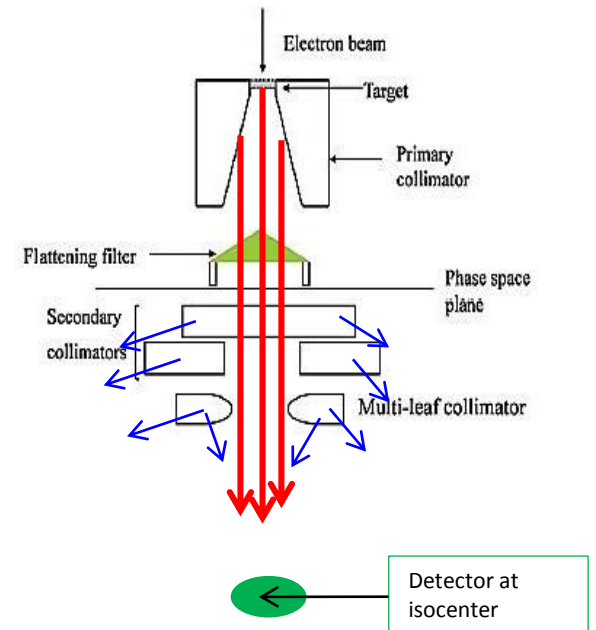


Back up

# 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%



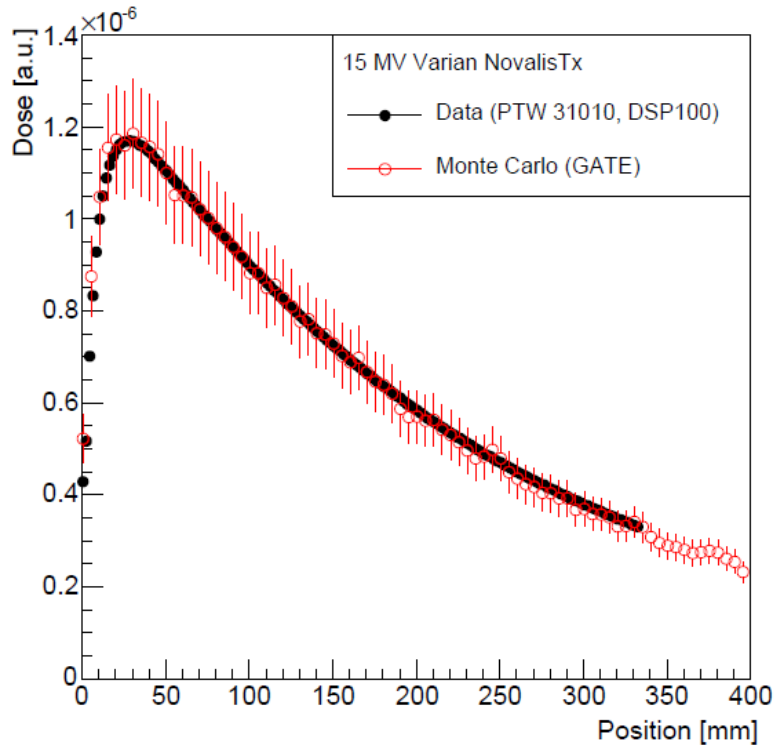
## Neutrons diffusés

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%

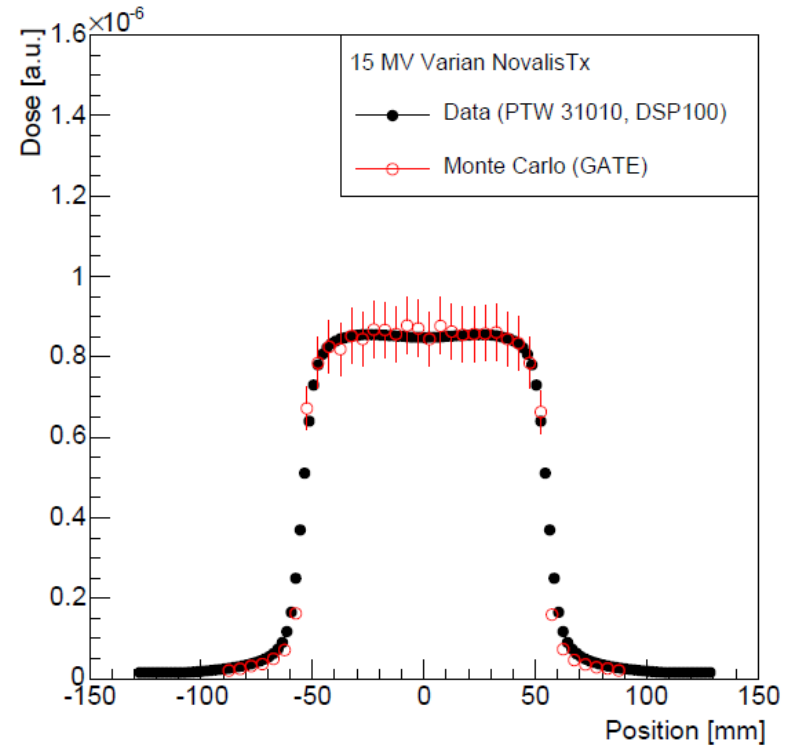
➔ Vérification expérimentale de cette dépendance spatiale et par rapport à la collimation

# Simulation : validation

Rendement en profondeur



Profil latéral de dose

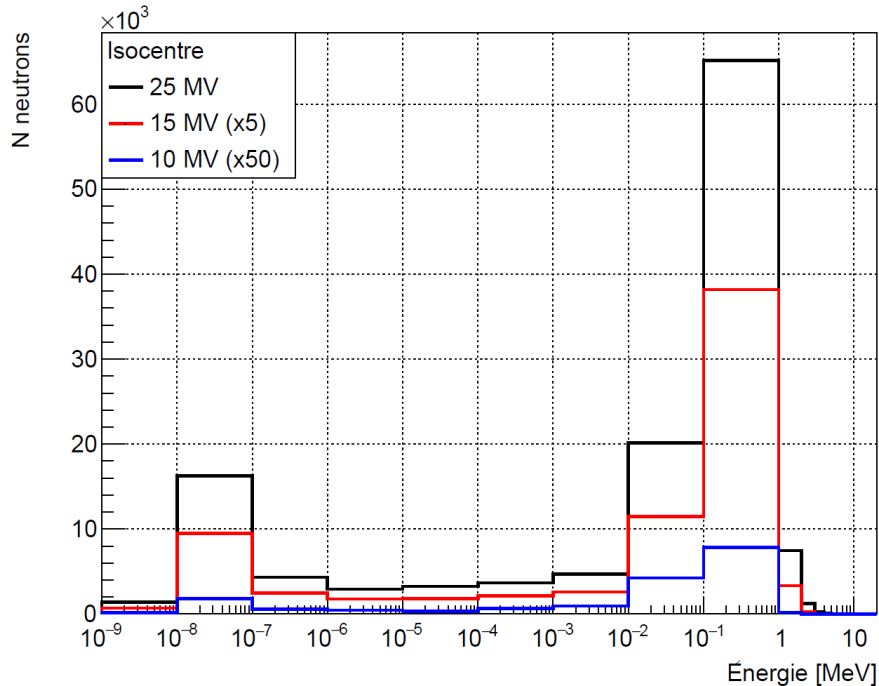


✓ Bonne reproduction du faisceau de photons primaires : étude neutrons secondaires

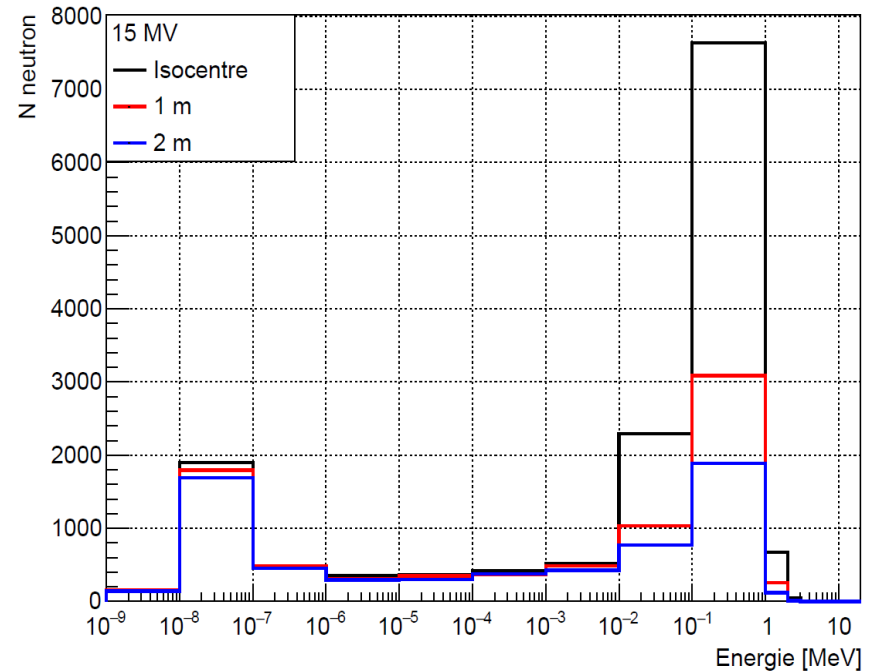
# Influence de la qualité du faisceau et distance



Qualité du faisceau



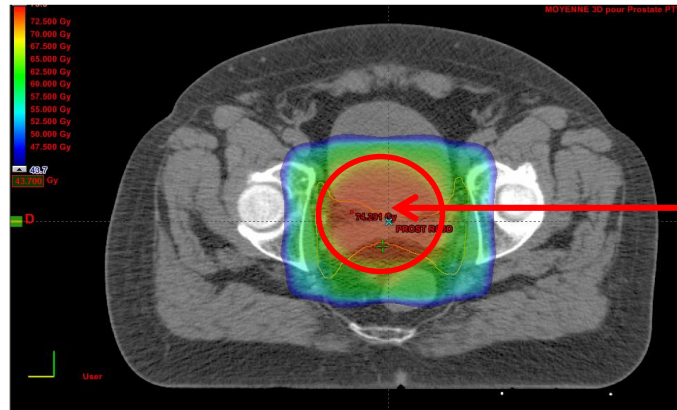
Distance à l'isocentre



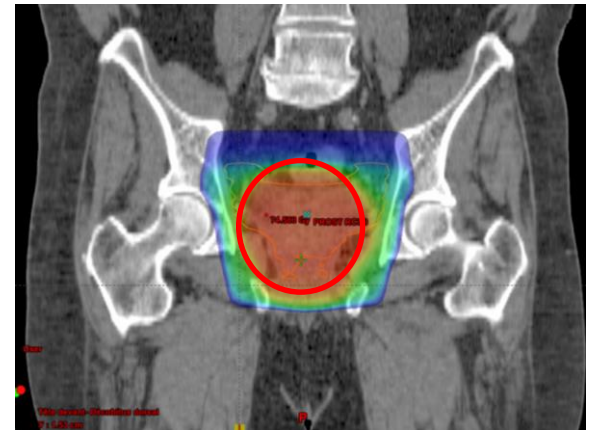
- ✓ Augmentation de la fluence et de l'énergie moyenne avec la qualité du faisceau
- ✓ Diminution de la composante rapide avec la distance (25 et 45% à 1 et 2m)
- ✓ Pas de dépendance de la composante thermique par rapport à la distance

# 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

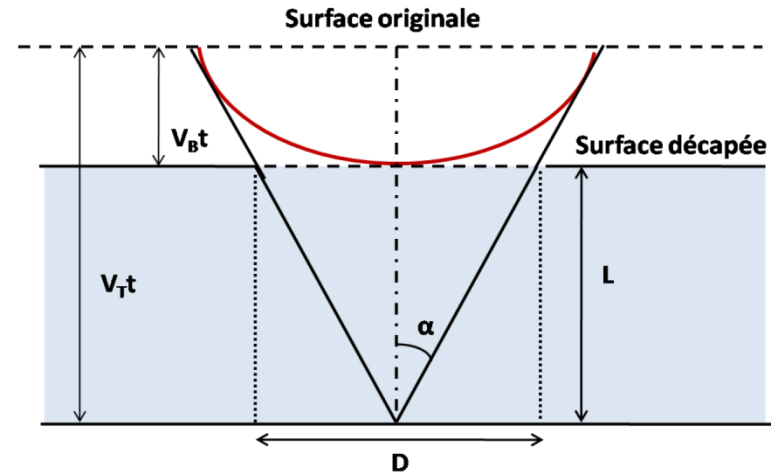
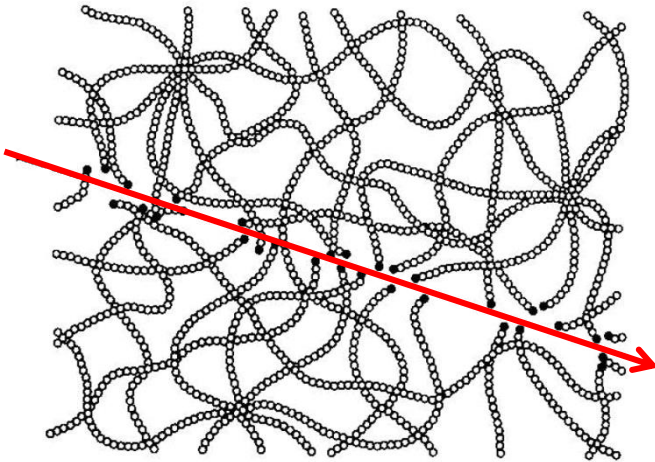


PTV (Volume cible prévisionnel)

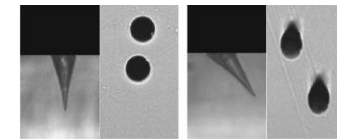


# Détecteurs Solides de Traces Nucléaires

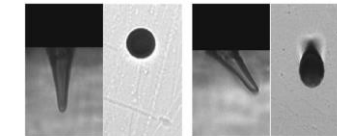
- Polycarbonate de diéthylène glycol
- Transfert d'énergie de la particule ionisante aux e- du milieu :
  - formation de traces dues aux dégâts moléculaires le long du trajet de la particule
  - révélation des traces après développement chimique



Détection des neutrons

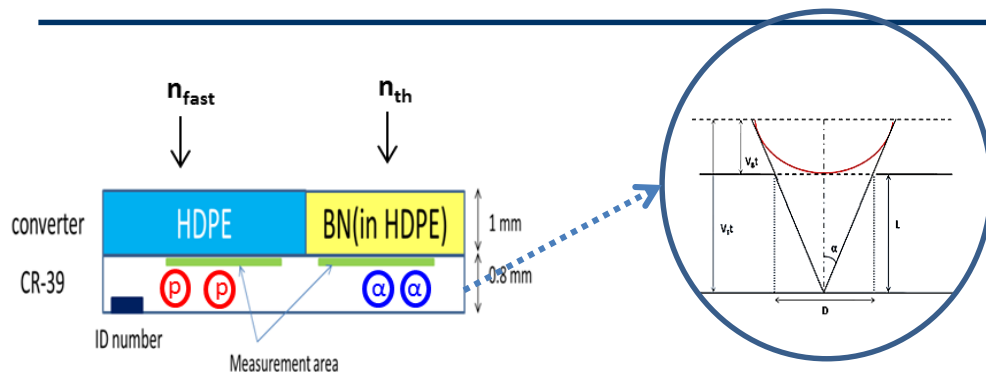


$t = 3h50$



$t = 4h30$

(B. Dorschel et al., 2003)



➔ Système à caractériser

## ✓ Conversion des neutrons en :

- Protons ( $n_{fast}$ , PE)
- $\alpha$  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

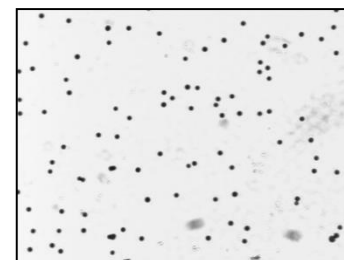
## ✓ Traitement



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

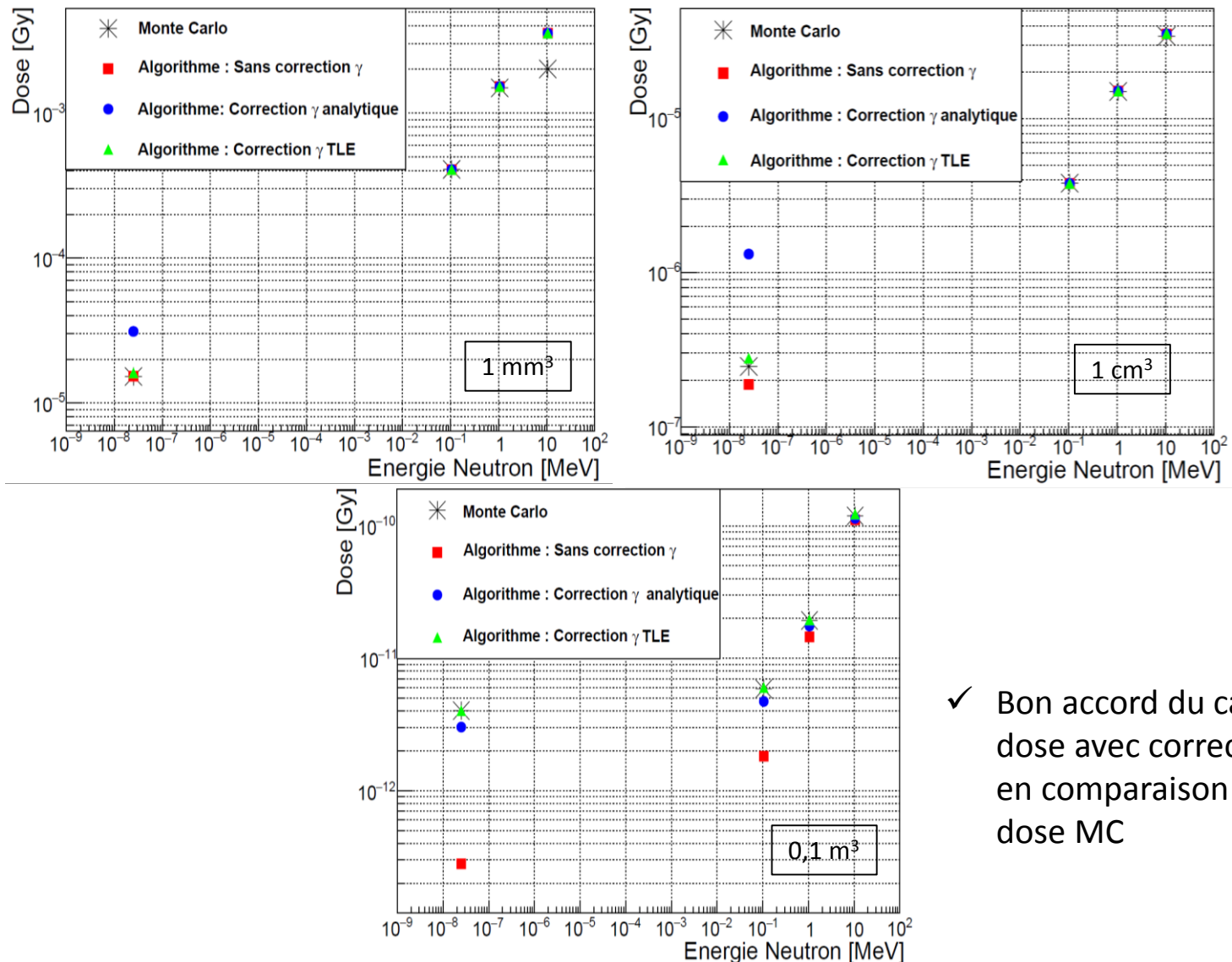


Lecture  
Microscope  
optique





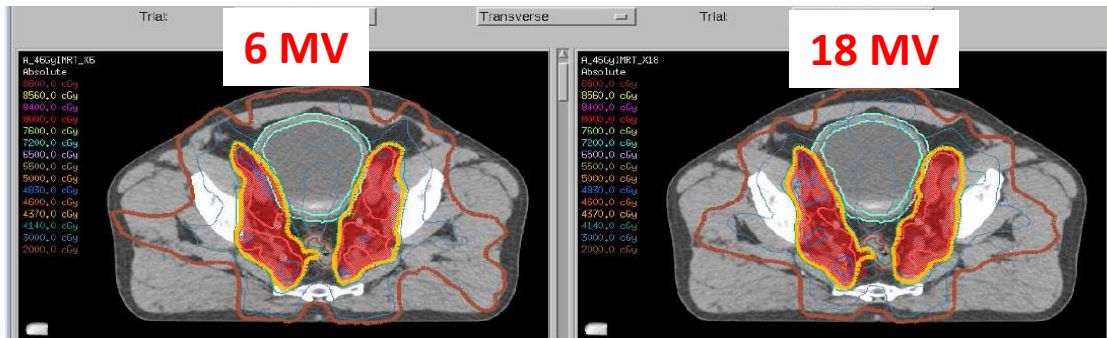
# Correction de la dose Photon



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

# Comparaison de traitements

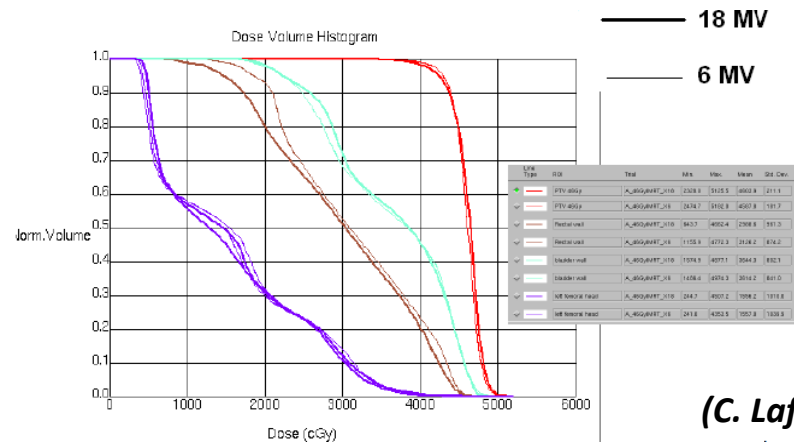
- RCMi pelvis en S&S : 6 MV vs 18 MV
- 6 MV : augmentation du temps de faisceau (DP photon )
- 18 MV : production de photoneutrons (DP neutron)



1013 UM



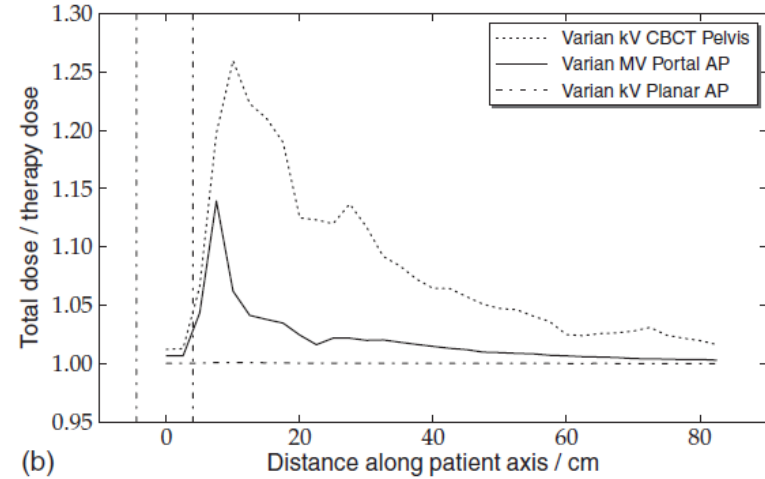
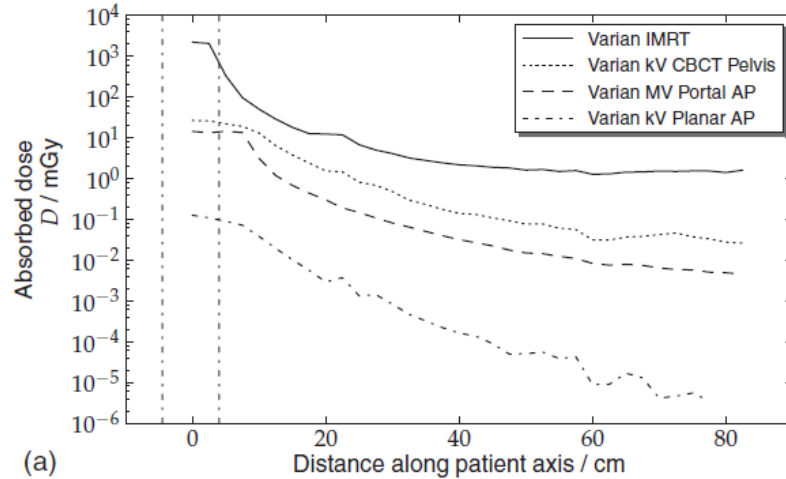
809 UM



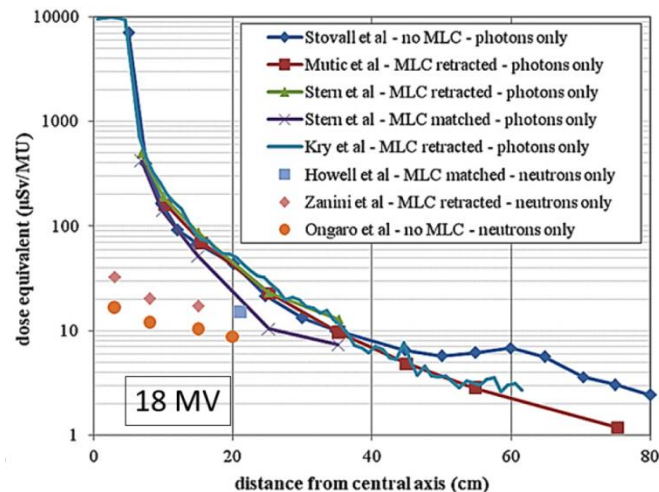
(C. Lafond, 2016)

# Dose d'imagerie

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

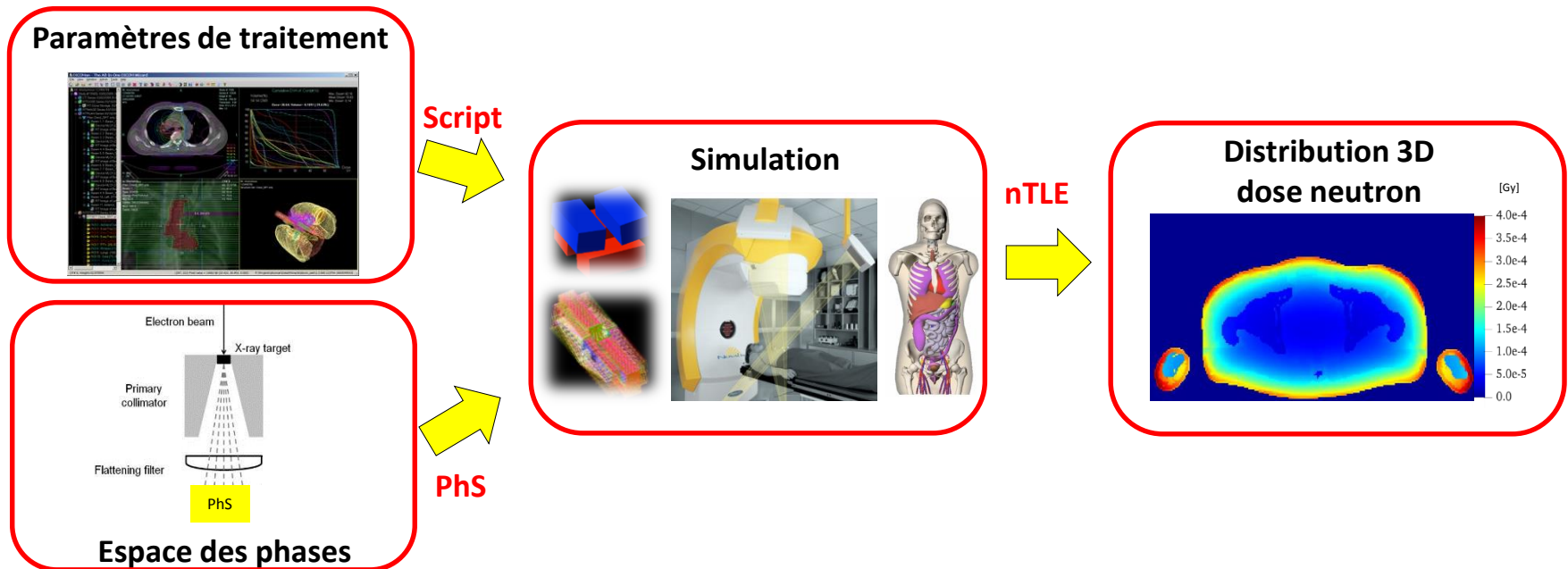


(R. Hälg et al, 2012)



# 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

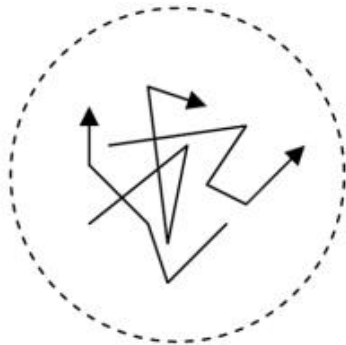


➡ Estimation de la carte de dose 3D neutron à partir d'un plan de traitement

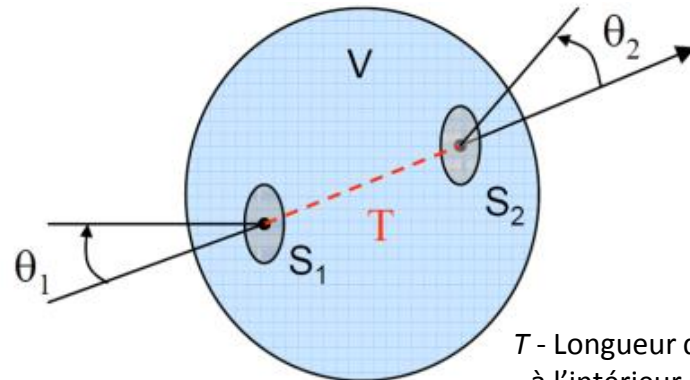
# Méthode du TLE (GATE)

- 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  $V$

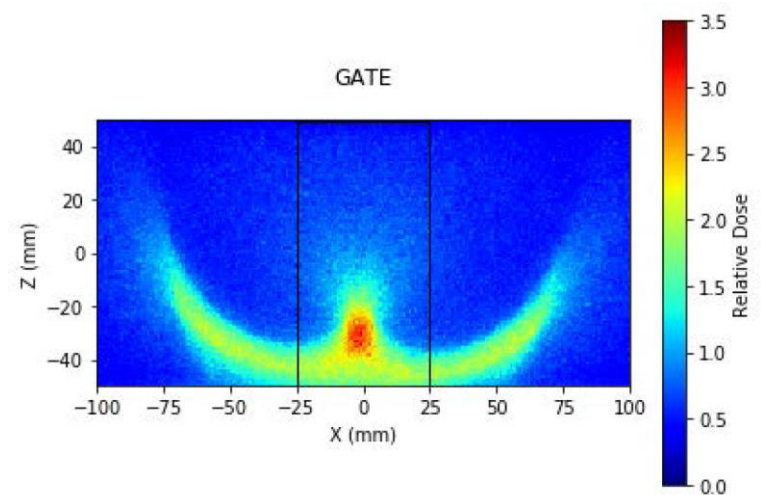
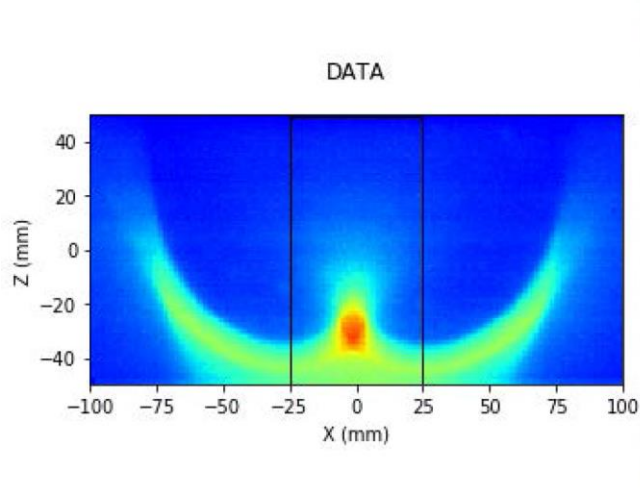
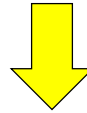


$T$  - Longueur du parcours à l'intérieur du volume

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

# Application

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



**(J. Gasteuil – N. Arbor)**