









## Doses secondaires en proton thérapie : cas des traitements oculaires et intracrâniennes

J. Farah, R. Sayah, F. Martinetti, L. Donadille, V. Lacoste, S. Delacroix, J. Hérault, I. Vabre, C. Lee, W.E. Bolch and I. Clairand

### Principe et utilisation de la proton thérapie en France

100%-

Utiliser les protons pour :

- Cibler les cellules cancéreuses
- Epargner les tissus sains

Deux centres de traitement opérationnels depuis 90 :

- Centre Antoine Lacassagne, Nice
- Institut Curie Centre de Proton thérapie d'Orsay (ICPO)





Principales prescriptions de la proton thérapie :

- Tumeurs oculaires (CAL-ICPO)
- Tumeurs intracrâniennes (ICPO)





IRS

Energie ~75 MeV

### Problématique de radioprotection en proton thérapie

Technique passive de mise en forme du faisceau  $\rightarrow$  particules secondaires dont neutrons



Exposition des tissus sains aux neutrons  $\rightarrow$  risque de second cancer radio-induit Neutrons non modélisés dans TPS et mesures *in vivo* impossibles  $\rightarrow$  calcul Monte Carlo

Modélisation et calcul MC des doses secondaires au tissu sain



# Modélisation et validation expérimentale d'une installation de proton thérapie

### Développement d'un modèle MCNPX des installation de l'ICPO

Objectif : reproduire exactement le faisceau de protons et les neutrons secondaires



- Validation du modèle pour le calcul des protons
- Validation du modèle pour la simulation des neutrons



### Validation expérimentale - Simulation des protons



Résultat très satisfaisant permettant de valider le modèle MC pour la dose à la tumeur

J SFRP Codes de calcul en radioprotection, radiophysique et dosimétrie - Paris, Mars 2014

6

IRS

### Validation expérimentale - Simulation des neutrons

Littérature = Validation neutrons secondaires rarement réalisée

Approche globale développée par IRSN  $\rightarrow$  capacité et précision des simulations

- 1. Spectrométrie des neutrons
- Système HERMEIS sphères de Bonner



Compteurs proportionnels









Détecteurs de traces CR-39



fantôme Rando-Alderson

**Méthode :** mesures dans salle de traitement + comparaison aux calculs MCNPX

### Validation expérimentale - Simulation des neutrons - Résultat

#### 1. Spectrométrie des neutrons

- Forme du spectre correctement reproduite
- Surestimation des neutrons thermiques + facteur d'échelle ~2 pour le modèle à 178 MeV
- 2. Equivalent de dose ambiant  $H^*(10)$
- Reproduction correcte des neutrons dans la salle
- Surestimation des mesures (20% à 75 MeV, facteur 2 à 178 MeV)
- 3. Dose dans fantôme anthropomorphe
- Reproduction correcte des doses aux organes
- Bon accord calculs-mesures (différence < 40%)</p>



IRS

8

### Simulation des neutrons - Sources d'incertitude

- 1. Approximations sur la modélisation
- > Donnes constructeur non complètes = éléments de la ligne non modélisés
- Connaissance imparfaite de la composition des éléments de la ligne et des murs

#### 2. Incertitudes de mesure

- Initialisation de la déconvolution des spectres via un spectre simulé (20%)
- > Dépendance en énergie des compteurs proportionnels et des détecteurs de trace (30-40%)

#### 3. Incertitudes de calculs

- Incertitude statistique peu représentative de l'incertitude globale
- > Limites actuelles des sections efficaces et modèles nucléaires



# Calculs MC des doses secondaires à l'aide de fantômes numériques

Calcul des doses hors champ de traitement - fantômes numériques

Traitement oculaire ~75 MeV

Fantôme mathématique MIRD



Cristy et Eckerman (1987)

#### Traitement intracrânien ~178 MeV

Fantômes hybrides voxelisés, Université de Floride



Lee et al. (2007; 2010)

#### Conditions cliniques de traitement :

- 75 MeV
- Mise en forme passive du faisceau
- 1 incidence
- Prescription = 60 Gy

#### Conditions cliniques de traitement :

- 178 MeV
- Mise en forme passive du faisceau
- 5 incidences (AS, LL, RL, UL, UR)
- Prescription = 54 Gy

### Exemple 1 - Fantôme adulte - effet énergie du traitement

#### Augmentation de la dose avec l'énergie

Trai	tement oculair	<b>NeV</b>	Traitement	Traitement intracrânien ~178 MeV			
Doses faibles mais non négligeables							
Organe/tissue	Dose absorbée / Dose thérapeutique (µGy/Gy)	W <sub>R</sub>	Dose équivalente / Dose thérapeutique (µSv/Gy)	Organe/tissue	Dose absorbée / Dose thérapeutique (µGy/Gy)	W <sub>R</sub>	Dose équivalente / Dose thérapeutique (µSv/Gy)
Œil non traité	11.42	10.64	122	G. Salivaires	286	6.49	1856
Cerveau	4.55	8.09	37	Pharynx	251	5.36	1499
Thyroïde	3.33	8.29	28	Thyroïde	231	6.49	1345
Thymus	1.75	7.02	12	Larynx	207	5.82	1205
Seins	1.99	8.76	17	Seins	187	8.05	1505
Œsophage	0.77	5.17	4	Œsophage	120	4.90	588
Poumons	0.96	6.19	6	Dose décroit avec	120	5.23	628
Cœur	0.98	5.87	6	distance à la tume	eur 102	4.98	508
Foie	0.80	5.7	5	Foie	86	4.95	426
Estomac	0.93	5.93	6	Estomac	79	4.89	286
Reins	0.41	4.38	2	Reins	66	4.80	317
Vés. Biliaire	0.78	5.4	4	Vés. Biliaire	78	4.96	387
Pancréas	0.61	4.8	3	Pancréas	63	4.78	301
Rate	0.53	4.83	3	Rate	79	5.01	396
Colon	0.89	5.34	5	Colon	76	4.98	378
Intestin grêle	0.76	5.19	4	Intestin grêle	57	4.80	274
G. Surrénales	0.38	4.39	2	Prostate	35	4.57	160
Vessie	1.10	5.78	A T	Vessie	40	4.47	<b>T</b>
	1_54	_ 6_73		Testicules	35	_ 4_74_	

J SFRP Codes de calcul en radioprotection, radiophysique et dosimétrie - Paris, Mars 2014

12

IRSN

### Exemple 2 - Fantômes pédiatriques et adulte - effet taille du patient



#### Fantômes hybrides de l'Université de Floride



Exemple 2 - Fantômes pédiatriques et adulte - effet taille du patient



Calculs pour une seule configuration de traitement (taille et position tumeur)

Temps de simulation = 2 semaines

J SFRP Codes de calcul en radioprotection, radiophysique et dosimétrie - Paris, Mars 2014

**IRSN** 14

### Exemple 3 - Fantôme 5 ans - doses Neutrons vs. Photons



- Effet morphologie du patient : assez faible <15%
- Effet composantes de la salle de traitement (murs et sols) : 20-45%
- Effet incidence du faisceau : neutrons externes ~80% dose au patient

### Conclusion, besoins et perspectives

> Calculs MC = outil indispensable  $\rightarrow$  accès info indisponibles par TPS/mesure mais nécessite des améliorations (sections efficaces et modèles nucléaires neutrons - corps humain)

> Doses secondaires faibles mais non négligeables  $\rightarrow$  risque de cancer radio-induit

> Calculs lourds et temps simulation conséquent  $\rightarrow$  inadaptés pour la routine clinique

> TPS = aucune particule secondaire prise en compte dans le calcul des doses aux organes

Besoin d'une méthode pratique pour estimer les doses aux tissus sains pour toutes les particules secondaires et toute condition de traitement

Perspectives (thèse A. Bonfrate 2013-2016):

- Identification des paramètres d'influence (énergie, modulation, position tumeur, etc.)
- > Calcul de la variation des doses secondaires avec ces paramètres
- > Mise en place d'abaques/tableaux spécifiques à l'installation d'Orsay
- > Développement d'un modèle analytique universel (neutrons, photons, électrons)





### Thèses : F. Martinetti, R. Sayah et A. Bonfrate

## Merci pour votre attention

jad.farah@irsn.fr

### Réponse en énergie des compteurs proportionnels et des CR-39



Figure IV.8- Réponse en H\*(10) du radiamètre Berthold LB 6411 en fonction de l'énergie des neutrons, normaliseé à un étalonnage au <sup>257</sup>Cf (Données adaptées de Burgkhardt et al., 1997).



Figure IV.11- Réponse en H\*(10) du CPET Hawk en fonction de l'énergie des neutrons (données adaptées de Trompier et al. 2007).





Figure E 6- Réponse (R) des CR-39 en fonction de l'énergie, en échelle doublement logarithmique. Les points représentent les résultats expérimentaux avec les incertitudes associées, et la courbe l'ajustement des points expérimentaux (équation indiquée).