









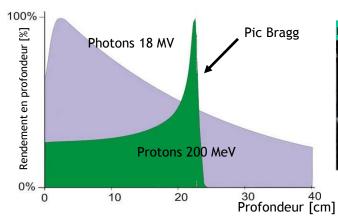
# Doses secondaires en proton thérapie : cas des traitements oculaires et intracrâniennes

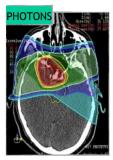
J. Farah, R. Sayah, F. Martinetti, L. Donadille, V. Lacoste, S. Delacroix, J. Hérault, I. Vabre, C. Lee, W.E. Bolch and I. Clairand

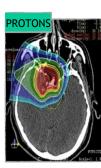
## Principe et utilisation de la proton thérapie en France

#### 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)



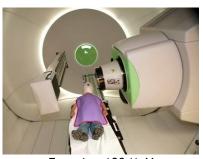


### Principales prescriptions de la proton thérapie :

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



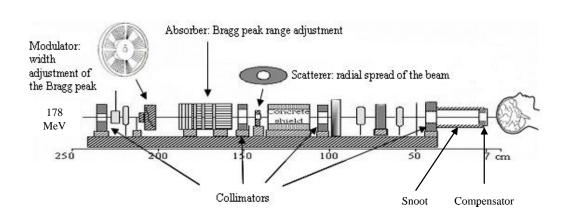
Energie ~75 MeV

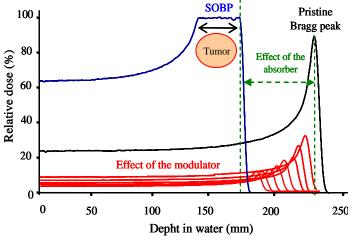


Energie ~180 MeV

## 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

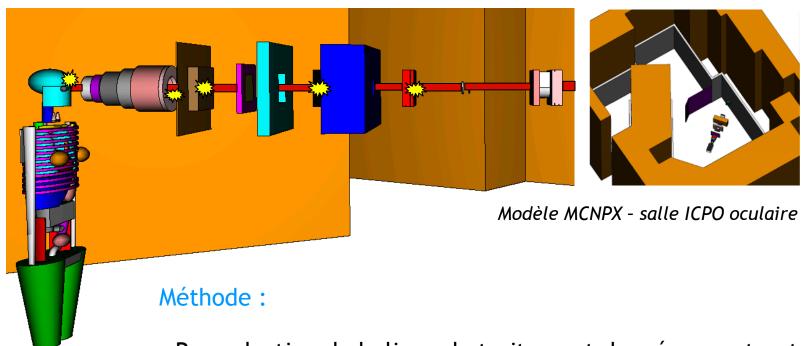
Modélisation et calcul MC des doses secondaires au tissu sain



# 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



- Reproduction de la ligne de traitement données constructeur
- Validation du modèle pour le calcul des protons
- Validation du modèle pour la simulation des neutrons

## Validation expérimentale - Simulation des protons

### 1. Rendements en profondeur

Matériel: Chambre d'ionisation

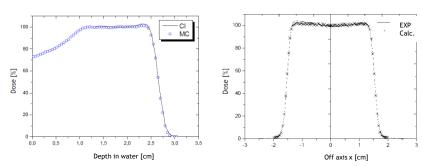
plane parallèle PPC05

Méthode: mesures dans cuve d'eau +

comparaison aux calculs MCNPX



#### Salle oculaire ~75 MeV



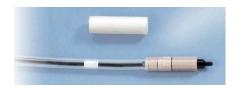
#### 2. Profils de dose

Matériel : Chambre d'ionisation

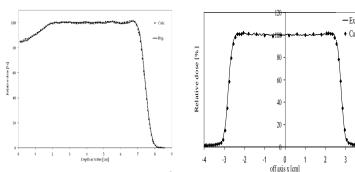
compacte de type CC01

**Méthode :** mesures dans cuve d'eau (à  $Z_0$ ,  $Z_{50\%}$ 

et  $Z_{90\%}$ ) + comparaison aux calculs MCNPX



#### Salle intracrânienne ~178 MeV



Bon accord sur parcours, largeur de modulation, taille champ, pénombre, etc.

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



## Validation expérimentale - Simulation des neutrons

Littérature = Validation neutrons secondaires rarement réalisée

Approche globale développée par IRSN > capacité et précision des simulations

1. Spectrométrie des neutrons

2. H\*(10) neutrons 3. Dose absorbée dans fantôme

Système HERMEIS sphères de Bonner

Compteurs proportionnels

Détecteurs de traces CR-39



Berthold



WENDI-2





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

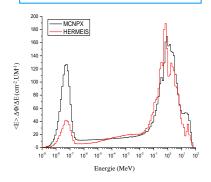
## 2. Equivalent de dose ambiant $H^*(10)$

- Reproduction correcte des neutrons dans la salle
- Surestimation des mesures (20% à 75 MeV, facteur 2 à 178 MeV)

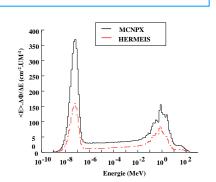
## 3. Dose dans fantôme anthropomorphe

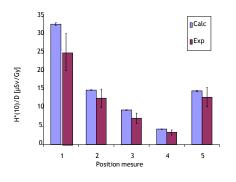
- > Reproduction correcte des doses aux organes
- Bon accord calculs-mesures (différence < 40%)</p>

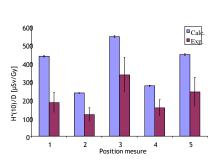
#### Oculaire ~75 MeV

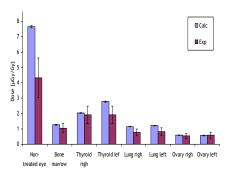


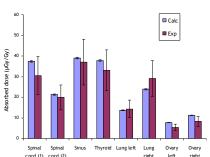
#### Intracran. ~178 MeV











## 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

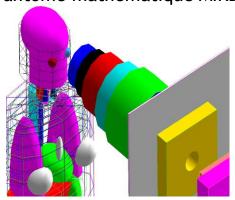


# Calculs MC des doses secondaires à l'aide de fantômes numériques

# Calcul des doses hors champ de traitement - fantômes numériques

#### Traitement oculaire ~75 MeV

#### Fantôme mathématique MIRD



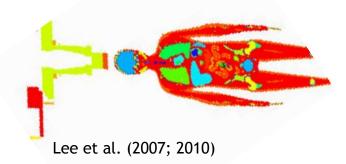
Cristy et Eckerman (1987)

#### Conditions cliniques de traitement :

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

#### Traitement intracrânien ~178 MeV

#### Fantômes hybrides voxelisés, Université de Floride



#### 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

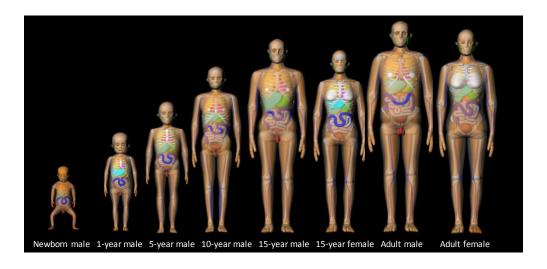
Traitement oculaire ~75 MeV

Traitement intracrânien ~178 MeV

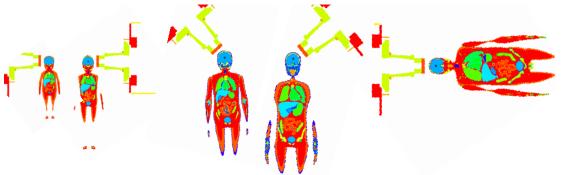
Doses faibles mais non négligeables

Organe/tissue	Dose absorbée / Dose thérapeutique (μGy/Gy)	$W_R$	Dose équivalente / Dose thérapeutique (μSv/Gy)		Organe/tissue	Dose absorbée / Dose thérapeutique (µGy/Gy)	$W_R$	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		Oose décroit avec	120	5.23	628	
Cœur	0.98	5.87	6	C	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	ļ
Reins	0.41	4.38	(2)	L _	Reins	66	4.80	(3 <u>1</u> 7	X 160
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	6 🔻		Vessie	40	4.47	779	
Testicules	1_54	_ 6.73	(w)	L_	Testicules	35	_4.74	166	X 17

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



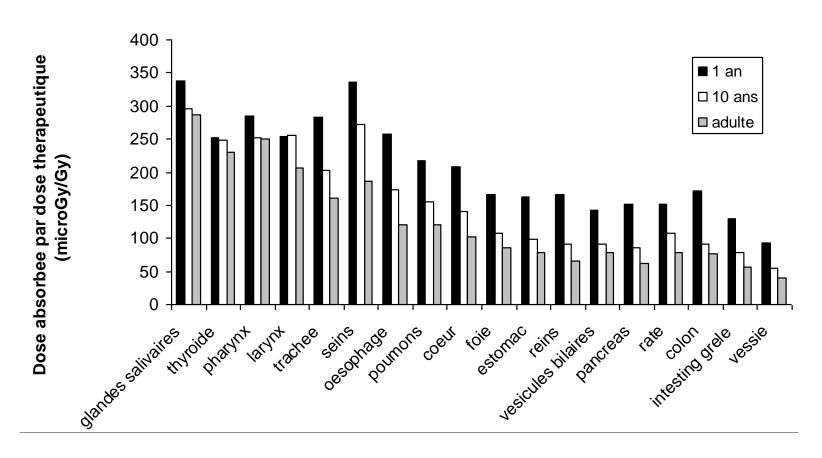
Fantômes hybrides de l'Université de Floride



Fantômes voxelisés avec incidences de traitement

13

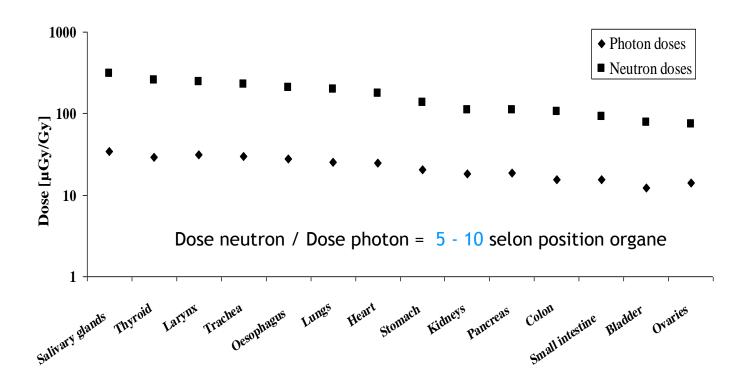
# Exemple 2 - Fantômes pédiatriques et adulte - effet taille du patient



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

Temps de simulation = 2 semaines

## 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 → accès info indisponibles par TPS/mesure mais nécessite des améliorations (sections efficaces et modèles nucléaires neutrons corps humain)
- Doses secondaires faibles mais non négligeables > risque de cancer radio-induit
- ➤ Calculs lourds et temps simulation conséquent → 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

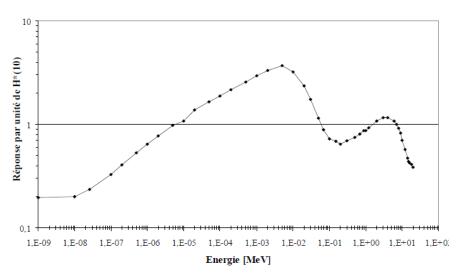


Figure IV.8- Réponse en H\*(10) du radiamètre Berthold LB 6411 en fonction de l'énergie des neutrons, normaliseé à un étalonnage au <sup>257</sup>Cf (Données adaptées de Burgkhardt et al., 1997).

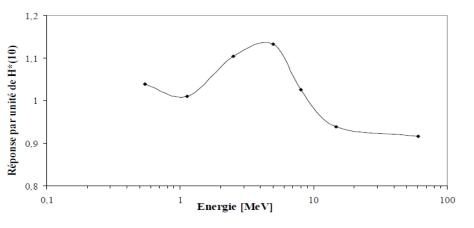


Figure IV.11- Réponse en H\*(10) du CPET Hawk en fonction de l'énergie des neutrons (données adaptées de Trompier et al. 2007).

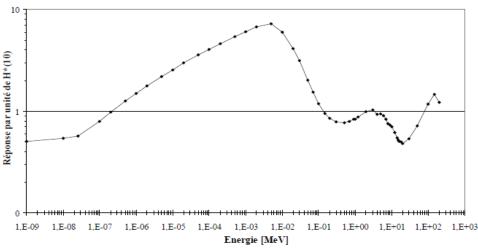


Figure IV.9- Réponse en H\*(10) du radiamètre WENDI-2 en fonction de l'énergie des neutrons (Données adaptées de Olsher et al., 2000).

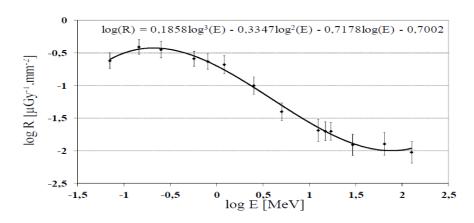


Figure E 6- Réponse (R) des CR-39 en fonction de l'énergie, en échelle doublement logarithmique. Les points représentent les résultats expérimentaux avec les incertitudes associées, et la courbe l'ajustement des points expérimentaux (équation indiquée).

