



Laboratoire National  
Henri Becquerel

list

## Exercice d'intercomparaison de codes Monte Carlo pour la modélisation d'un accélérateur linéaire médical

Maiwenn LE ROY, Loïc de CARLAN, Jean-Marc BORDY

CEA, LIST, LNE-LNHB, 91191 Gif-sur-Yvette

Barbara Caccia<sup>1</sup>, Claudio Andenna<sup>2</sup>, Arun Charimadurai<sup>3</sup>, T Palani Selvam<sup>4</sup>,  
Damian Czarnecki<sup>5</sup>, Klemens Zink<sup>5</sup>, Régine Gschwind<sup>6</sup>, Eric Martin<sup>6</sup>, Nicolas  
Huot<sup>7</sup>, Mariam Zoubair<sup>8</sup>, Tarek El Bardouni<sup>8</sup>

<sup>1</sup> Istituto Superiore di Sanità, Rome, Italie

<sup>2</sup> INAIL DIPIA-Ex-ISPEL, Rome, Italie

<sup>3</sup> Jaypee Hospital, Noida, Inde

<sup>4</sup> Bhabha Atomic Research Centre, Bombay, Inde

<sup>5</sup> Institut für Medizinische Physik und Strahlenschutz, Giessen, Allemagne

<sup>6</sup> IRMA/LCPR-AC/Chrono-Environnement – UMR CNRS 6249, Université de Franche-Comté,  
France

<sup>7</sup> CEA, Saclay, DEN/DANS/DRSN/SEROS, 91191 Gif-sur-Yvette, France

<sup>8</sup> Université Abdelmalek Essaadi, faculté des Sciences, Tétouan, Maroc

[maiwenn.le-roy@cea.fr](mailto:maiwenn.le-roy@cea.fr)

## Utilisation des codes Monte Carlo en radiothérapie

- Systèmes de planification de traitement (TPS) : réalisation ou vérification des calculs
- Établissement des références dosimétriques
- Études dosimétriques, développement ou étude de détecteurs, ...



Exercice de modélisation d'un accélérateur linéaire médical  
ouvert à tous les acteurs de la dosimétrie



CEA, LIST, LNE-LNHB

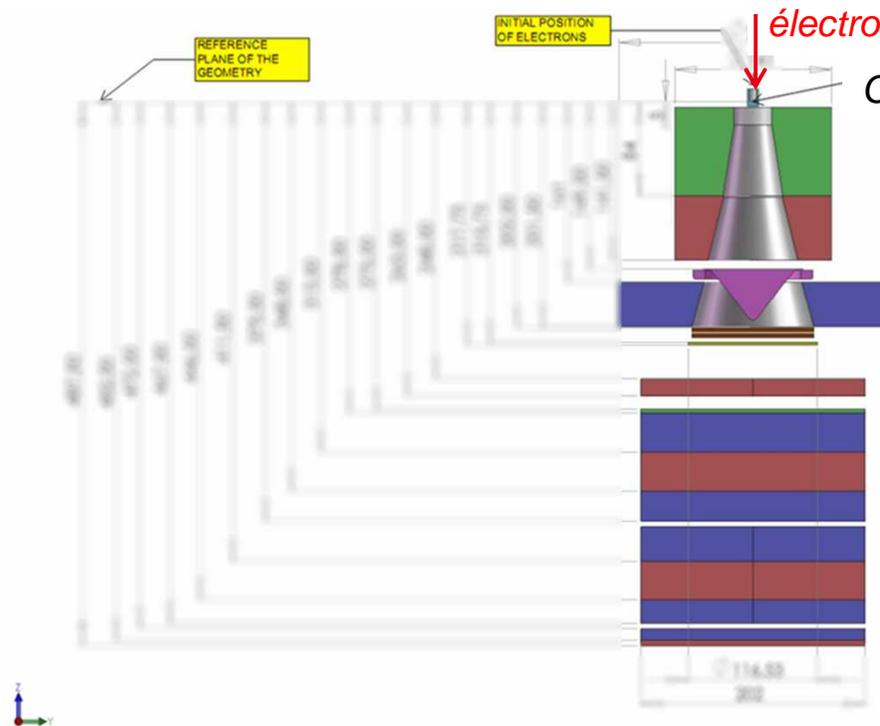
**EURADOS** →  
European Radiation Dosimetry Group e.V.

Accélérateur Saturne 43 du LNHB  
Faisceau de photons 12 MV  
10x10 cm<sup>2</sup> à 100 cm de la source

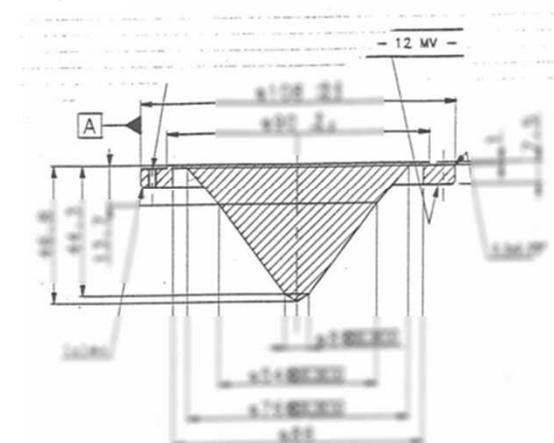
## Tache 1 : modélisation de la tête d'irradiation de l'accélérateur

### ■ A) Géométrie de la tête d'irradiation

- ✓ Données "géométrie" et "matériau" fournies comparables à celles disponibles auprès des constructeurs.



Cible (rayonnement de freinage)



	density (g.cm-3)	H 1	C 6	N 7	O 8	Mg 12	Al 13	Si 14	P 15	Cl 17	Ar 18	Ca 20	Ti 22	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Ni 28	Cu 29	W 74	Pb 82
Aluminium	2.7																			
Titanium	4.54																			
Tungsten	19.3																			
Lead	11.35																			
XC10	7.8		8.1												16	8	66.98	16		
Denal (WNICU)	7.8		8.1															1	1.2	96.2
Stainless steel	7.8		8.1																	
kapton	1.42	2.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
air	1.293	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
lung equivalent	1.2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
bone equivalent	1.8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
water	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
PMMA	1.19	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

composition is given per mass

## Tache 1 : modélisation de la tête d'irradiation de l'accélérateur

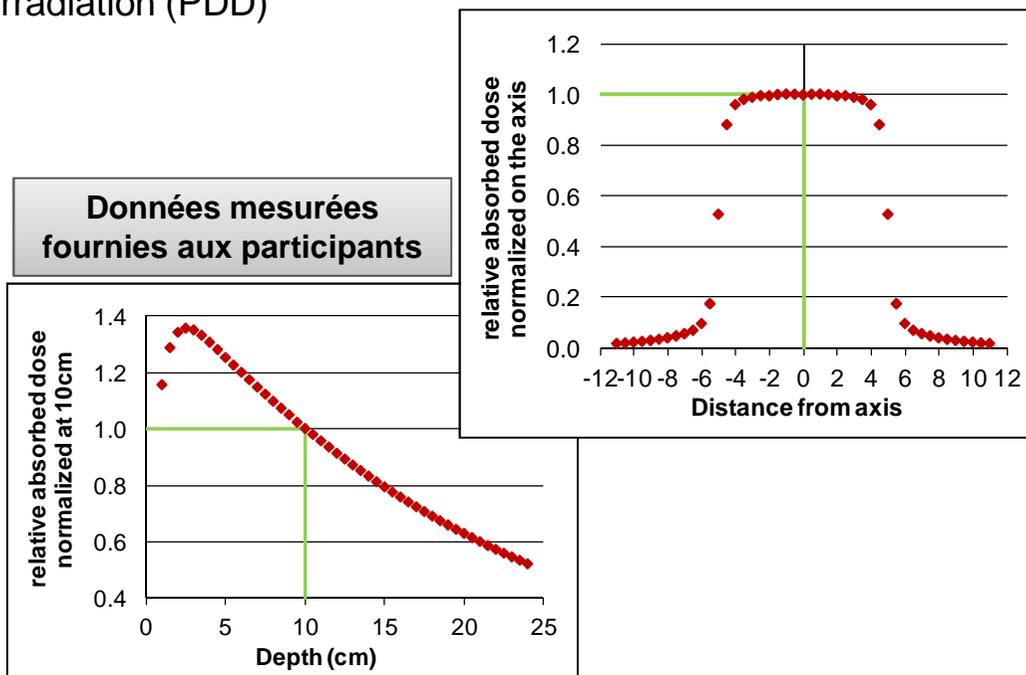
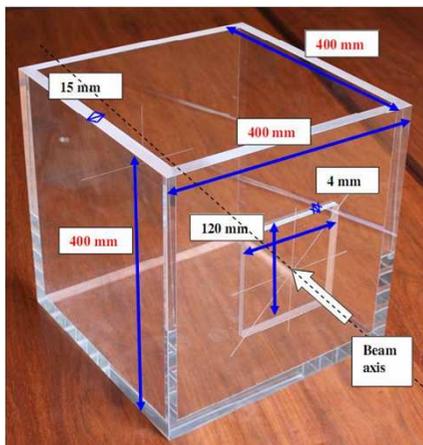
- A) Géométrie de la tête d'irradiation
- B) Ajustement des paramètres initiaux de la simulation

### ■ Paramètres initiaux = caractéristiques des électrons incidents sur la cible :

- ✓ Distribution en énergie
- ✓ Distribution spatiale (tâche focale)

### ■ Comparaison entre distributions de dose 1D mesurées et calculées (milieu homogène, eau)

- ✓ Rendement en profondeur sur l'axe d'irradiation (PDD)
- ✓ Profil de dose à 10 cm de profondeur

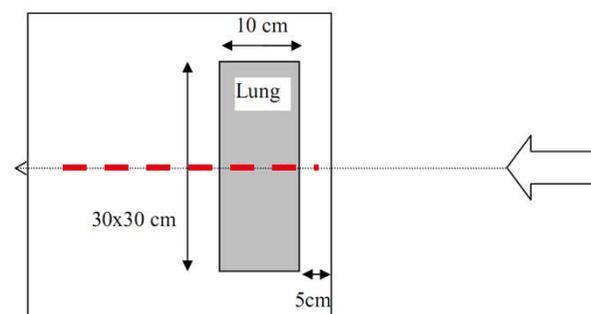
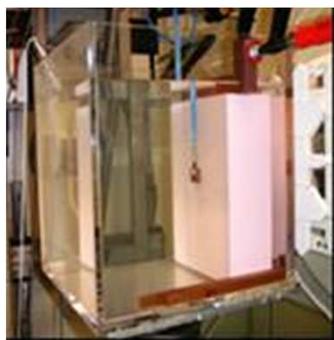


## Tache 2 : calculs en présence d'hétérogénéités

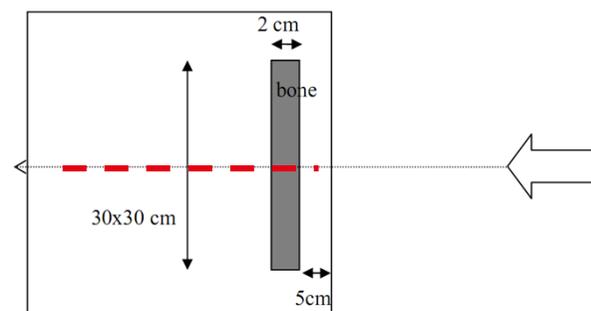
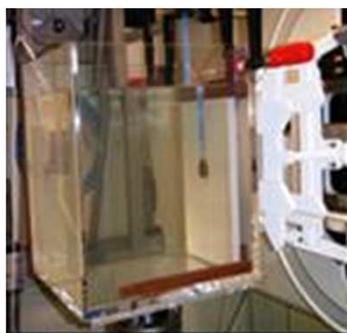
- **Calculs de distribution de dose en présence d'hétérogénéités os et/ou poumon**
- **Comparaison aux mesures réalisées au LNHB** (*Blazy et al, Phys.Med.Biol. 51 (2006)*)

Données mesurées **NON**  
fournies aux participants

### A) Hétérogénéité poumon : calcul d'un PDD dans eau et poumon



### B) Hétérogénéité os : calcul d'un PDD dans eau et os

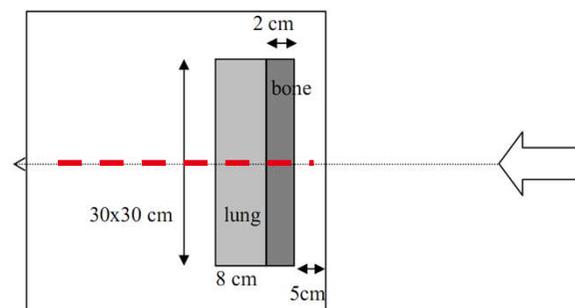


## Tache 2 : calculs en présence d'hétérogénéités

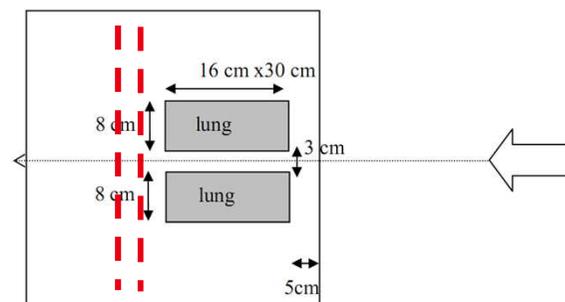
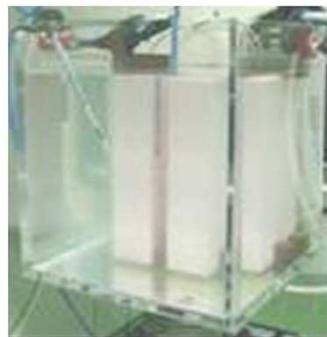
- **Calculs de distribution de dose en présence d'hétérogénéités os et/ou poumon**
- **Comparaison aux mesures réalisées au LNHB** (*Blazy et al, Phys.Med.Biol. 51 (2006)*)

Données mesurées non  
fournies aux participants

### C) Hétérogénéité poumon + os : calcul d'un PDD dans eau, poumon et os



### D) Hétérogénéité "2 poumons" : calcul de profils dans l'eau à deux profondeurs



## Codes MC et paramètres des électrons initiaux

	Code MC
1	GEANT 4 v9.2
2	EGSnrc v4.3.2.1
3	TRIPOLI 4 v4.8
4	EGSnrc v4
5	MCNPX v2.5
6	EGSnrc V4.3.2.2

TRIPOLI : 1<sup>er</sup> essai dans le domaine de la radiothérapie

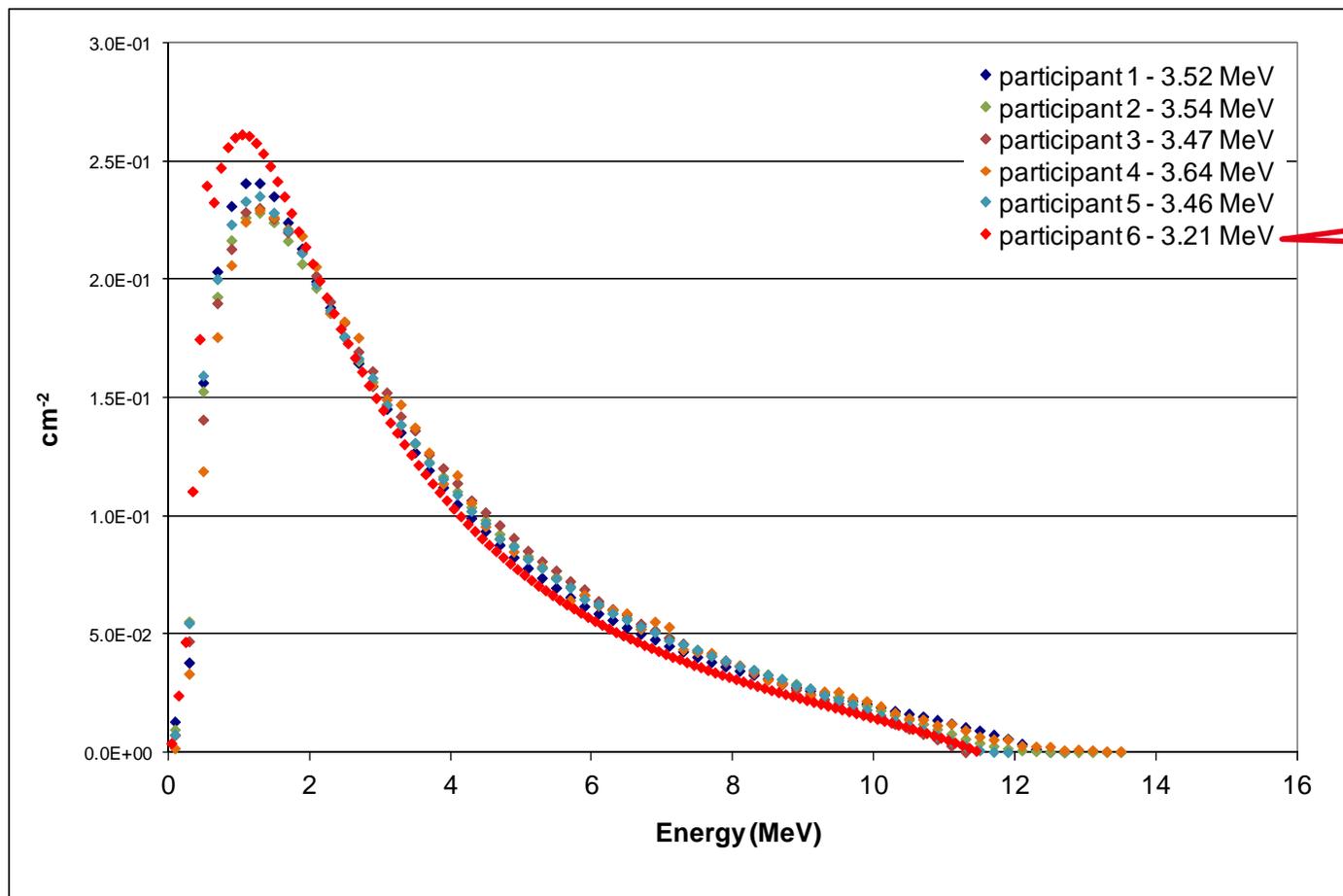
## Codes MC et paramètres des électrons initiaux

$\varnothing = 0 \text{ à } 2 \text{ mm}$

$E_{\text{moy}} = 11,25 \text{ à } 12,3 \text{ MeV}$

	Code MC	Distribution spatiale e <sup>-</sup>	Distribution énergétique e <sup>-</sup>
1	GEANT 4 v9.2	<b>Circulaire uniforme</b> $\varnothing = 2 \text{ mm}$	<b>Gaussienne</b> Moy : 12,3 MeV / FWHM = 0,123 MeV
2	EGSnrc v4.3.2.1	<b>Circulaire gaussienne</b> FWHM = 0,5 mm 0.5° divergence	<b>Gaussienne</b> Moy : 11,7 MeV / FWHM = 1,7 MeV
3	TRIPOLI 4 v4.8	<b>Ponctuelle</b> dist. angul. complexe entre 0 et 5,5°	<b>Monoénergétique</b> 11,25 MeV
4	EGSnrc v4	<b>Circulaire uniforme</b> $\varnothing = 0,8 \text{ ou } 1,6 \text{ mm}$	<b>Gaussienne</b> Moy : 12 MeV / FWHM = ?
5	MCNPX v2.5	<b>Circulaire gaussienne</b> FWHM = 1,7 mm	<b>Gaussienne</b> Moy : 11,4 MeV / FWHM = 0,5 MeV
6	EGSnrc V4.3.2.2	<b>Circulaire uniforme</b> $\varnothing = 1,5 \text{ mm}$	<b>Monoénergétique</b> 11,5 MeV

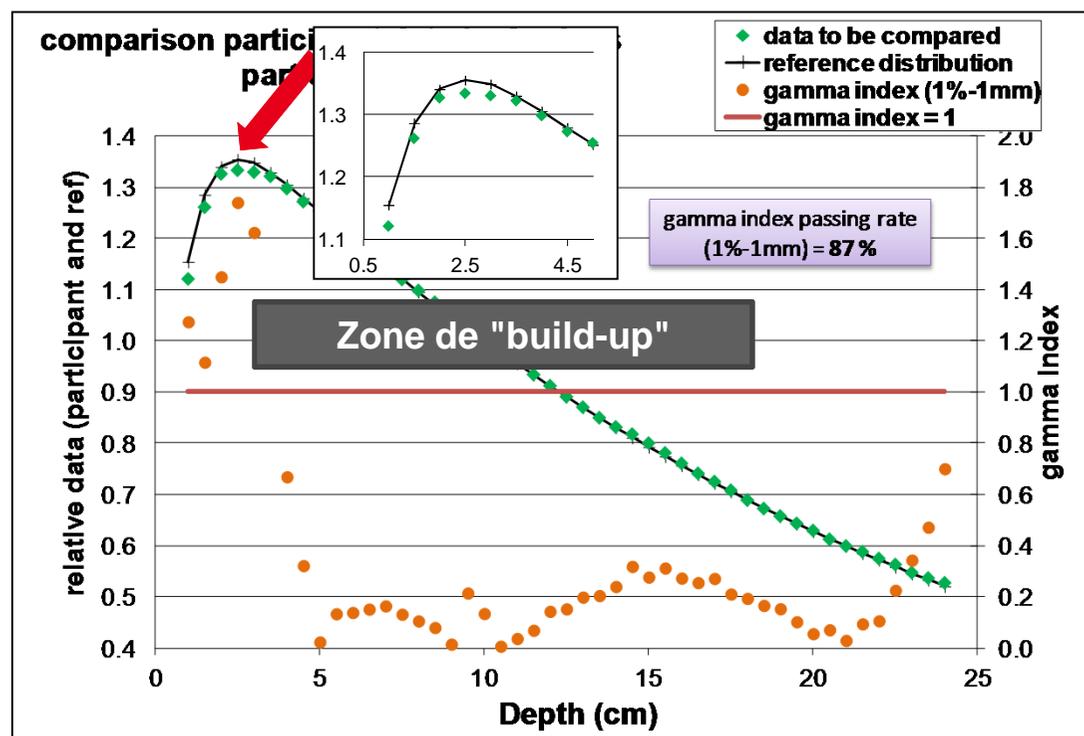
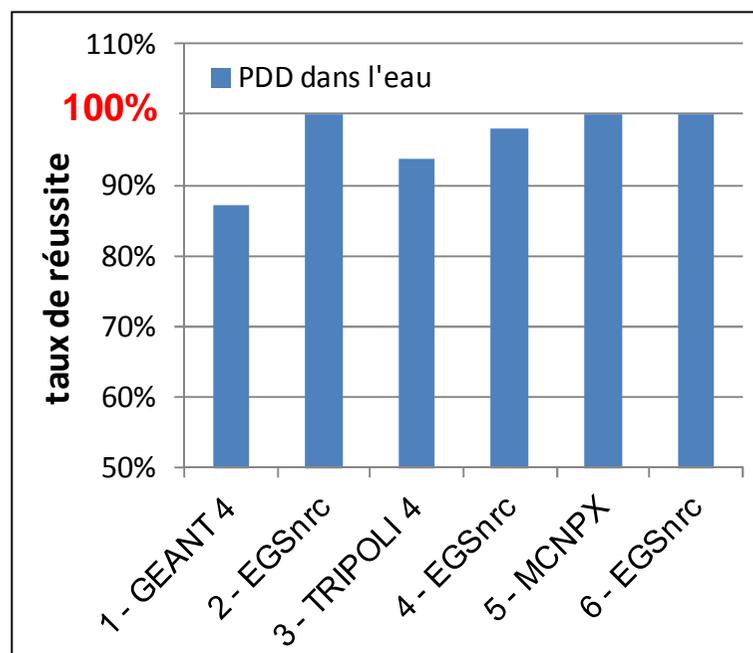
## Spectre en énergie – 90 cm de la source, dans l'air, sur l'axe



Pas calculé sur l'axe  
(10 cm de rayon)

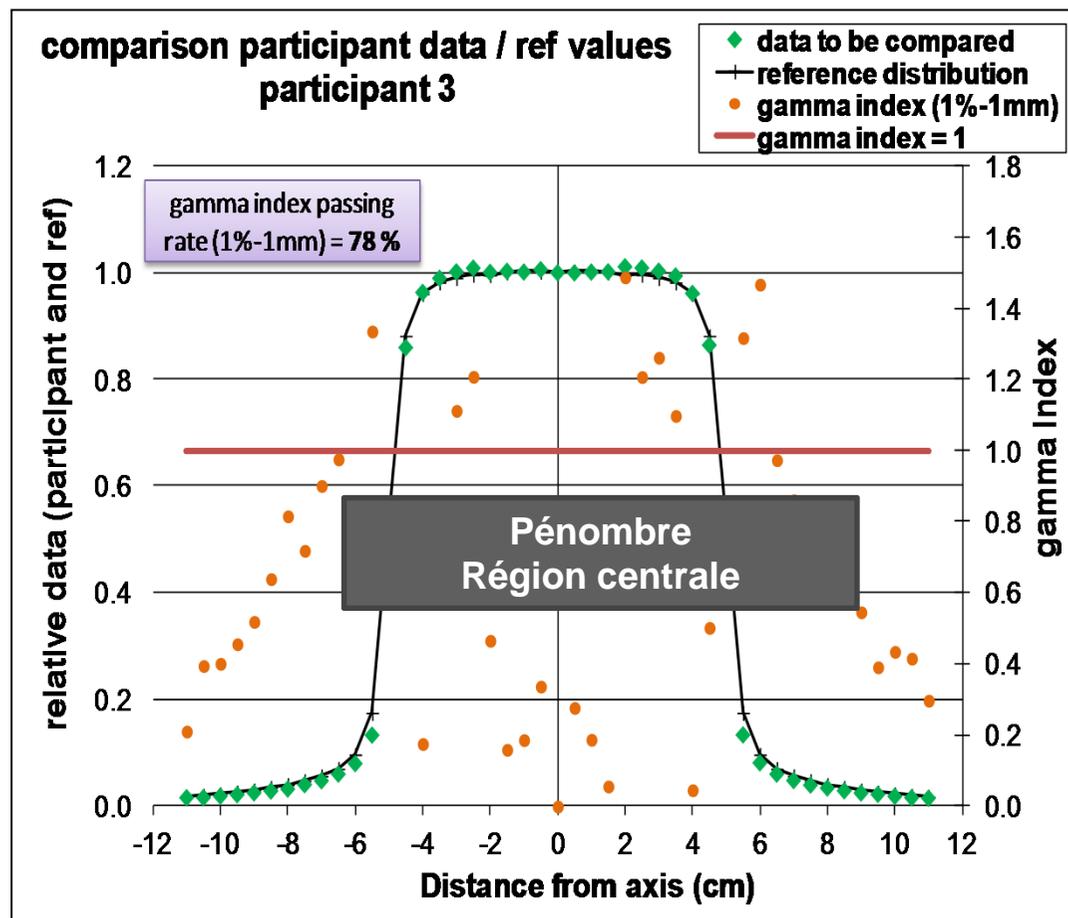
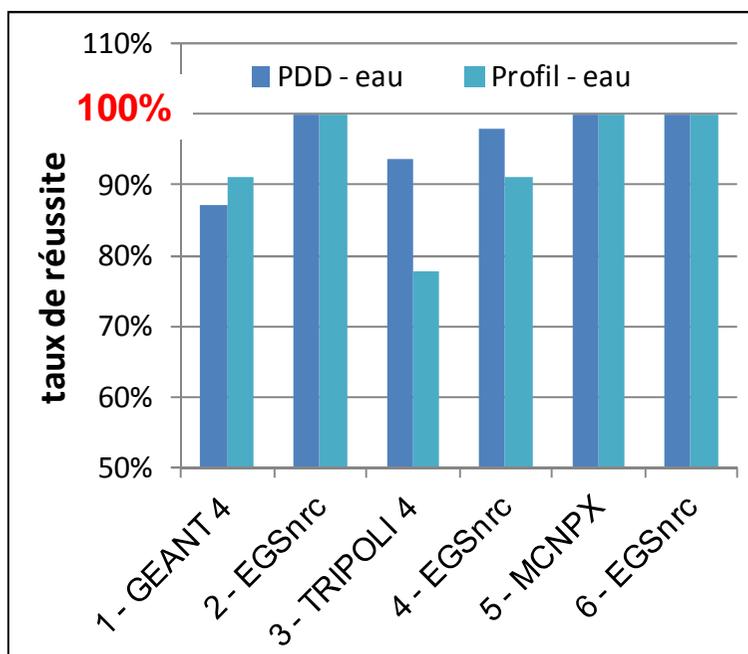
## Tache 1 – Ajustement – PDD dans l'eau

- **Objectif fixé** : correspondance des distributions de dose pour  $\gamma$ -index 1%-1mm.
  - Comparaison en termes de position (1mm) et de dose (1%)
    - ✓ 100% = dose à 10cm de profondeur sur l'axe
  - Les données calculées sont ré-échantillonnées (pas de 0, 1 mm)
    - ✓ Interpolation linéaire ou polynomiale



## Tache 1 – Ajustement – profil dans l'eau

- **Objectif fixé** : correspondance des distributions de dose pour  $\gamma$ -index 1%-1mm.



## Tache 2 – Hétérogénéités

### ■ Combinaison de deux critères

—  $\gamma$  index (1%-1mm)

— Différence (mesures – MC) et incertitude associée à  $k=2$

- ✓ Incertitude sur les mesures : 0,72 % à  $k=2$
- ✓ Incertitudes statistiques sur les calculs : 0,08% à **1,6 %** selon les participants ( $k=2$ )

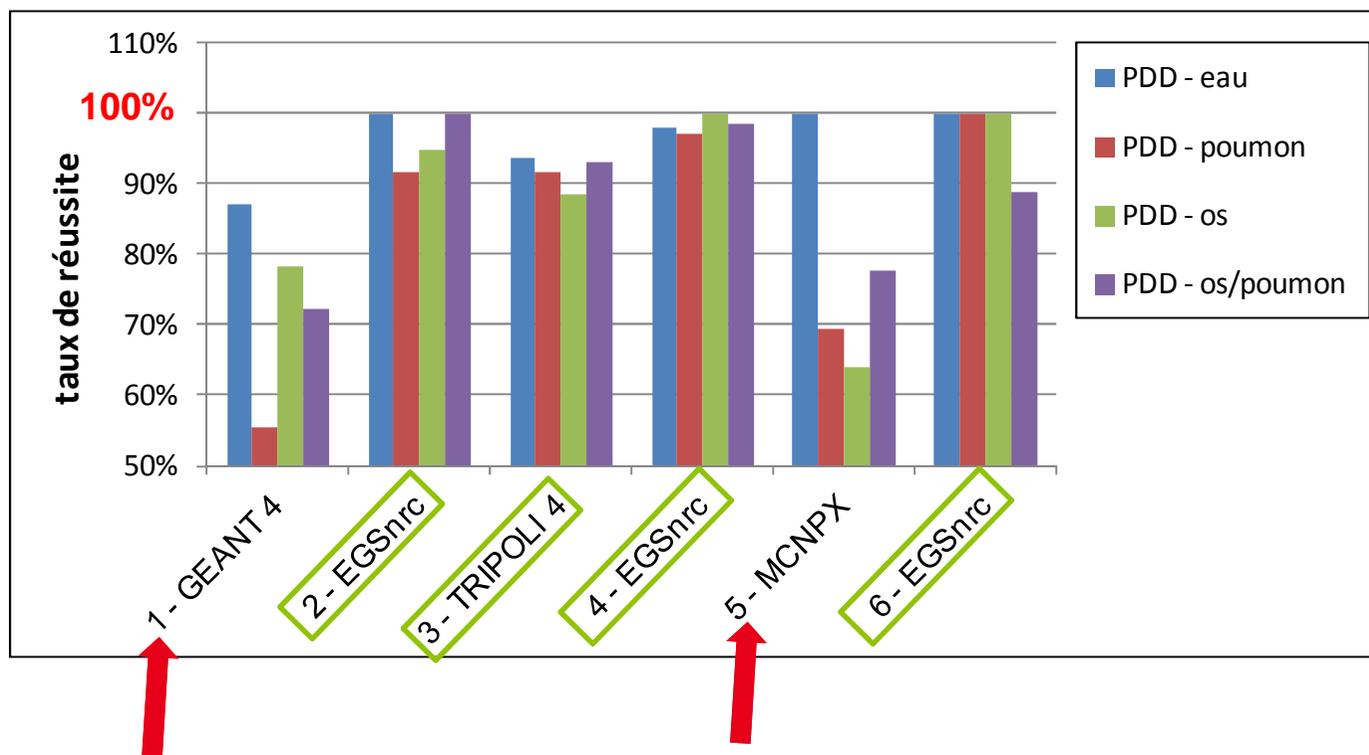
Si en un point  $\left\{ \begin{array}{l} \gamma \leq 1 \\ \text{ou} \\ |\Delta(\text{mes} - \text{MC})| \leq U(\Delta(\text{mes} - \text{MC}), k=2) \end{array} \right\}$  alors, on a correspondance des distributions mesurées et calculées en ce point

**Taux de réussite : pourcentage de points satisfaisant à un des deux critères**

## Tache 2 – Hétérogénéités - PDD

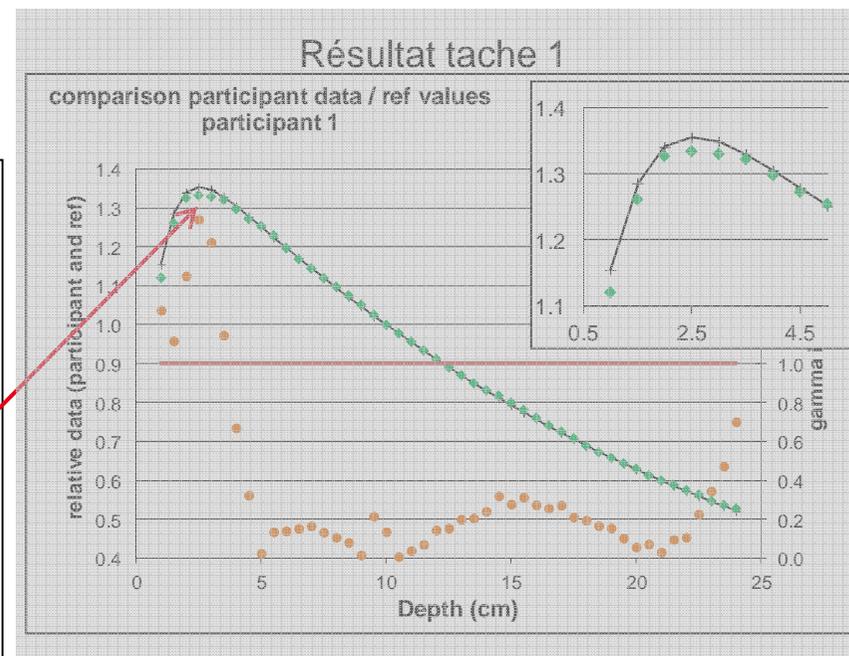
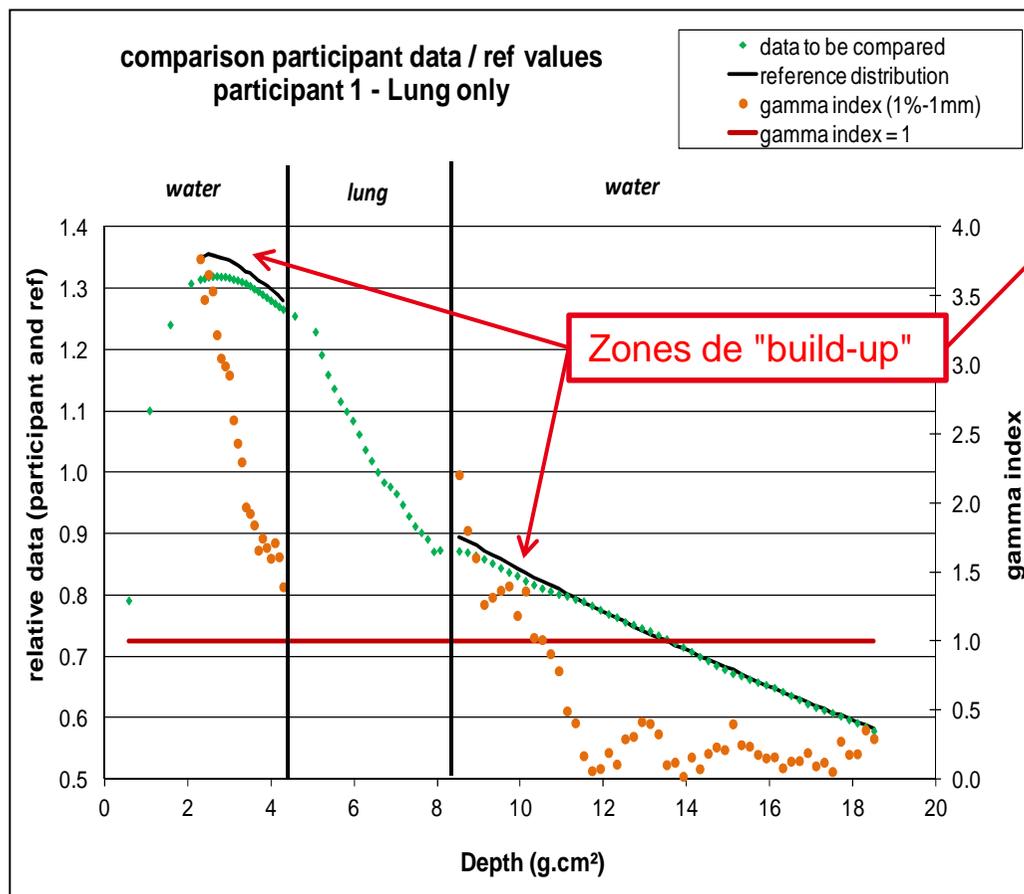
### ■ Vue générale des résultats - PDD

- Hétérogénéité os
- Hétérogénéité poumon
- Hétérogénéité os et poumon

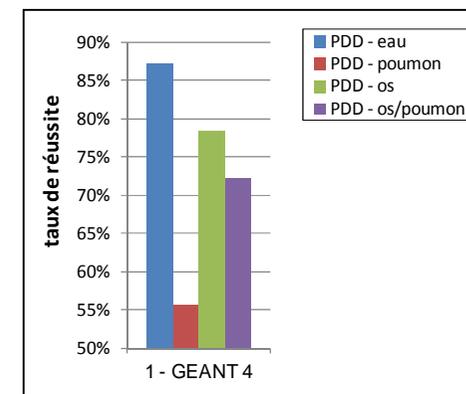


## Tache 2 – Hétérogénéités - PDD

### ■ Détails – GEANT 4

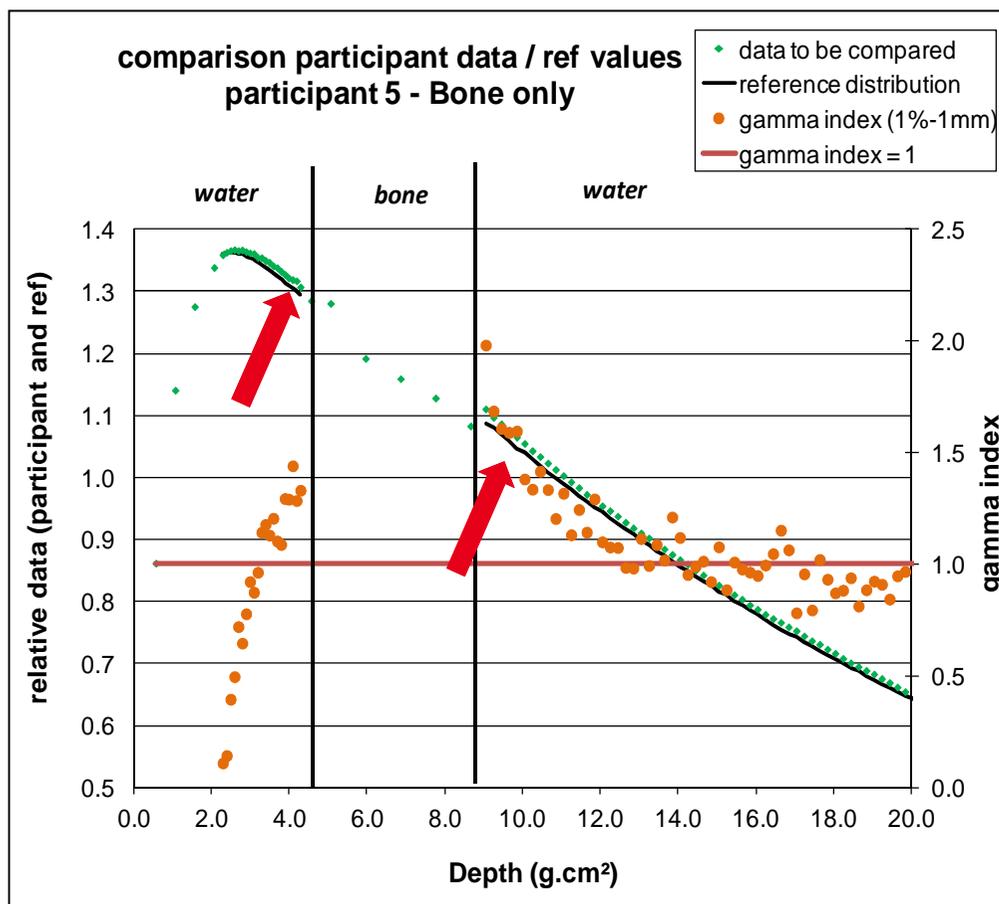


**Importance de l'ajustement des électrons incidents sur la cible**

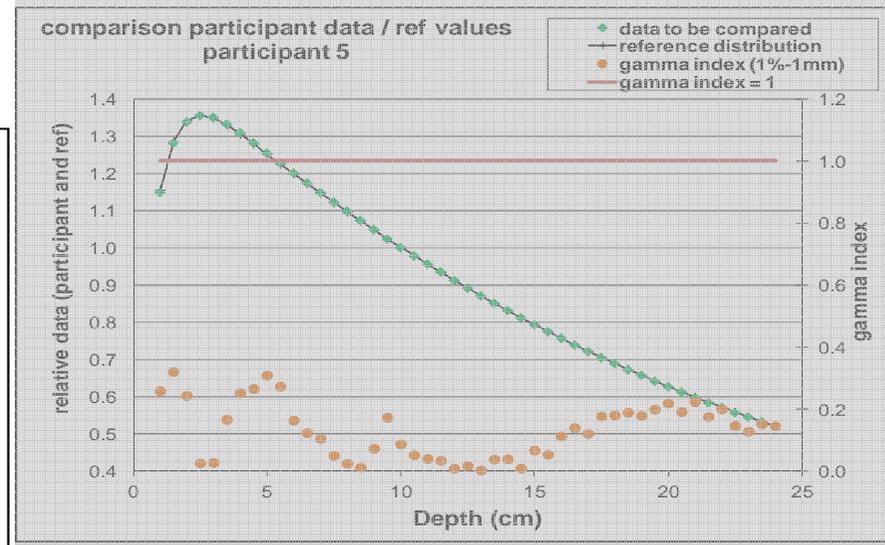


## Tache 2 – Hétérogénéités - PDD

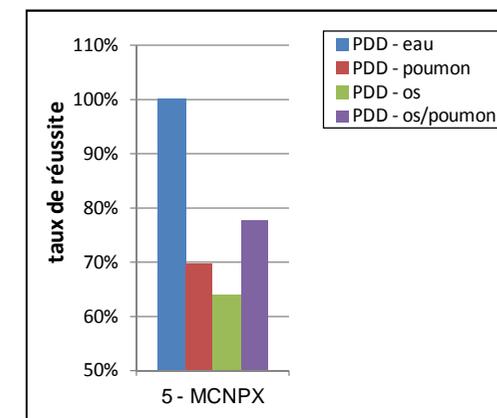
### ■ Détails – MCNPX



### Résultat tache 1



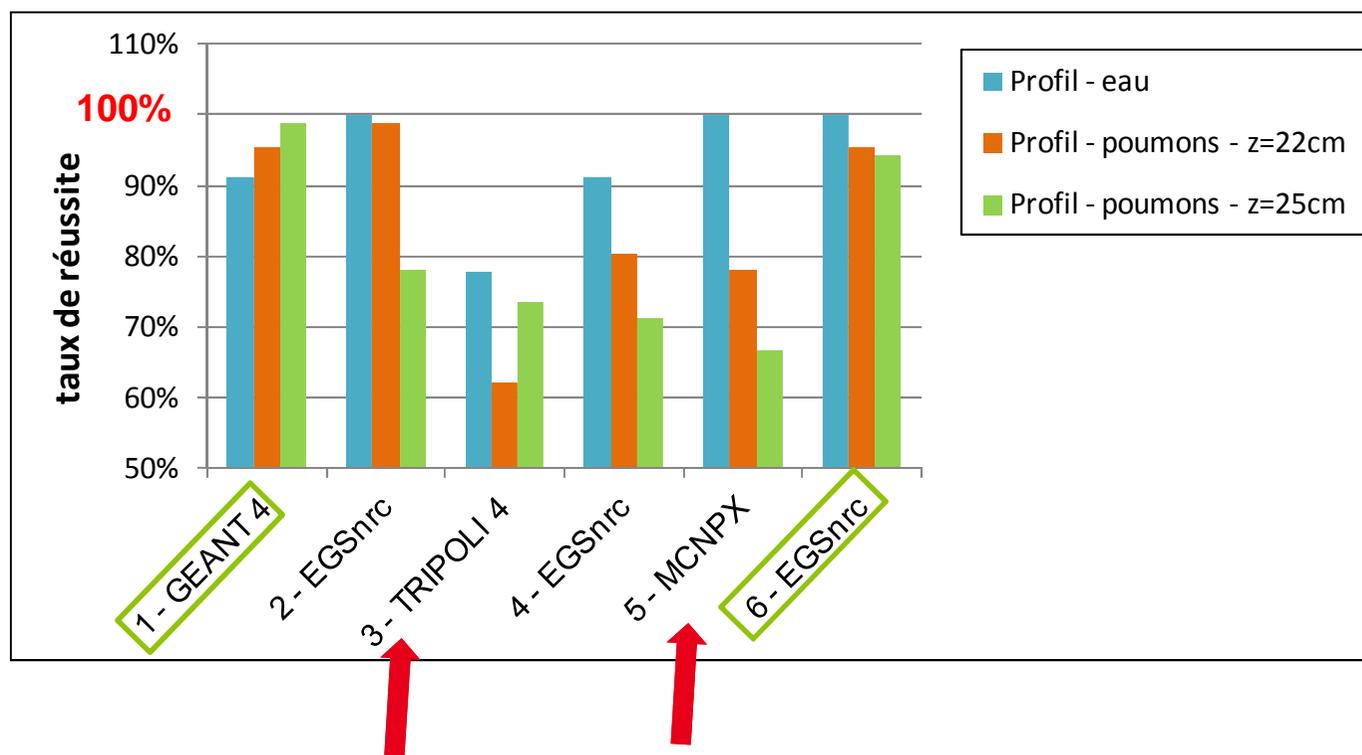
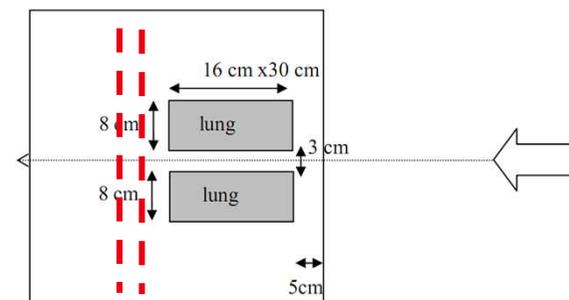
Prise en compte des hétérogénéités  
par le code?  
Paramètres de simulation?



## Tache 2 – Hétérogénéités - profils

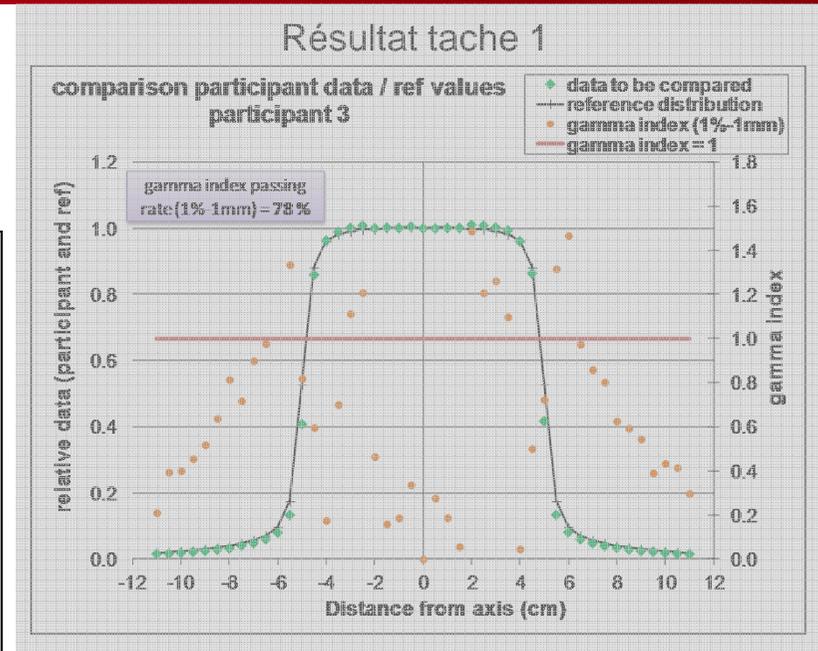
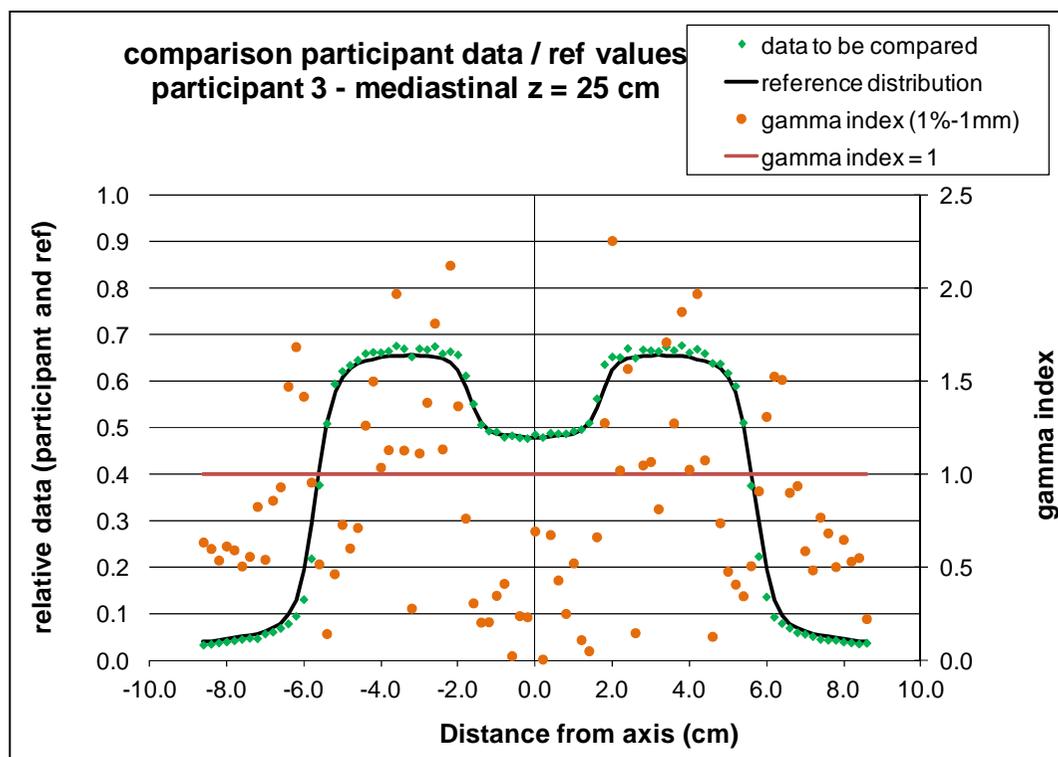
### ■ Vue générale des résultats - profils

■ Hétérogénéité "2 poumons"

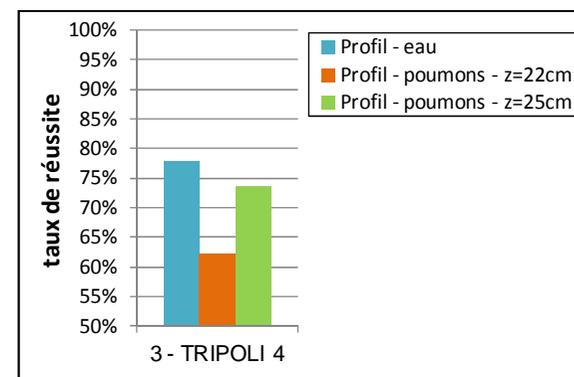


## Tache 2 – Hétérogénéités - profils

### ■ Détails - TRIPOLI 4

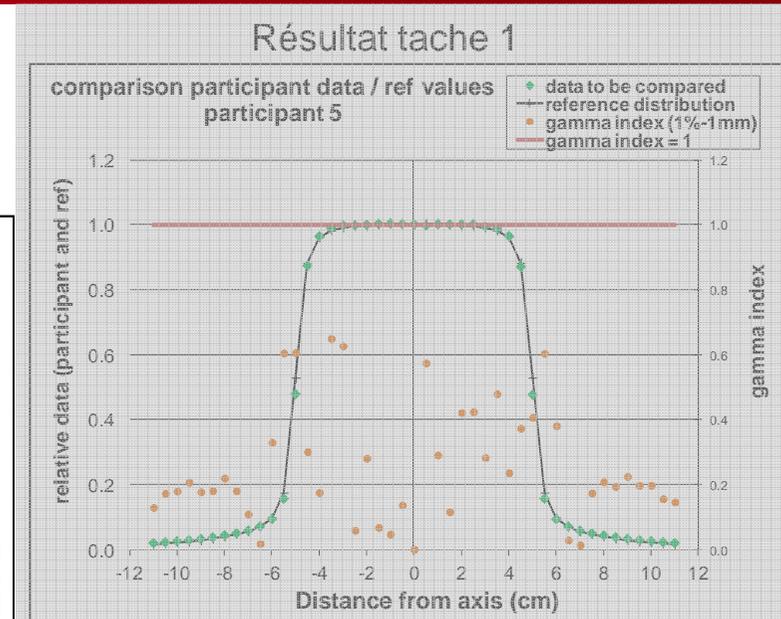
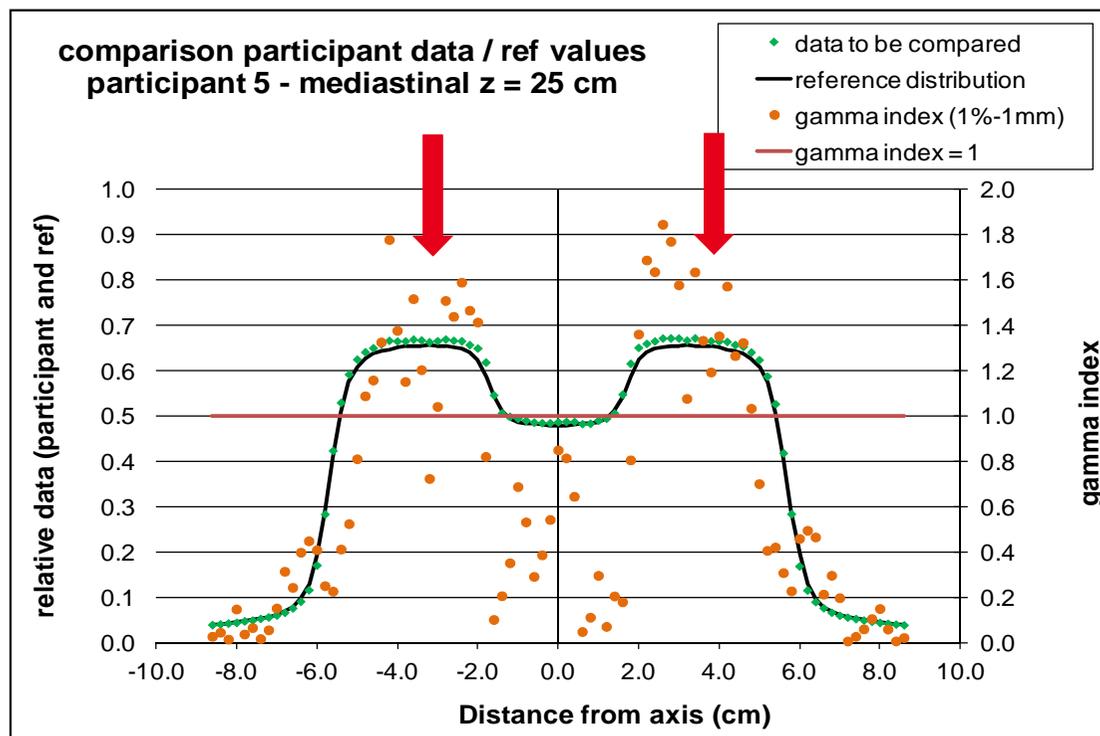


**Importance de l'ajustement des électrons incidents sur la cible**

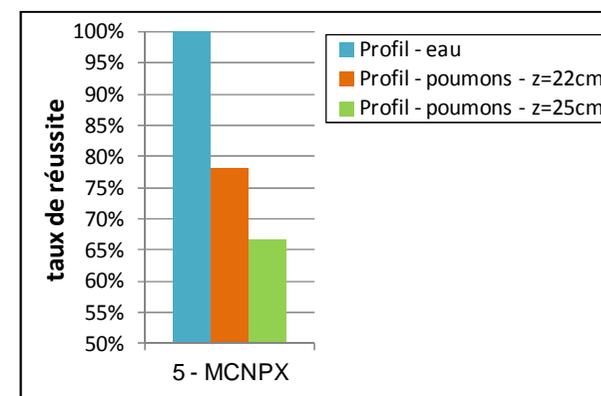


## Tache 2 – Hétérogénéités - profils

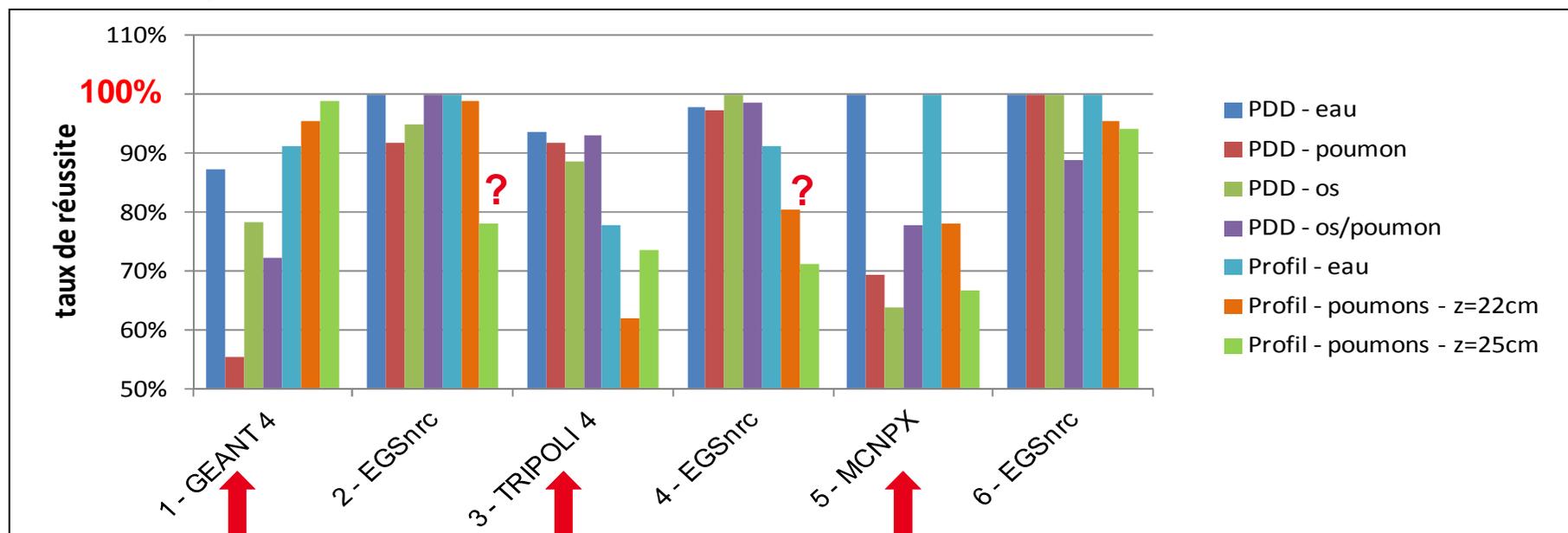
### ■ Détails - MCNPX



Prise en compte des hétérogénéités  
par le code?  
Paramètres de simulation?



## Synthèse des résultats



- Importance de l'ajustement des paramètres des électrons incidents sur la cible
- TRIPOLI 4 semble être utilisable pour des applications de radiothérapie (revoir ajustement profil)
- Analyse à poursuivre en considérant la physique des codes, les paramètres de simulation, en particulier pour MCNPX

## ■ Perspective dans le cadre d'EURADOS

### ■ Mise à disposition des données nécessaires à la réalisation de l'exercice

- ✓ Validation de codes
- ✓ Formation à la modélisation d'accélérateurs linéaires médicaux



Laboratoire National  
Henri Becquerel

**MERCI POUR VOTRE ATTENTION**

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives  
Centre de Saclay | 91191 Gif-sur-Yvette Cedex  
T. +33 (0)1 69 08 17 74 | @ : maiwenn.le-roy@cea.fr

Etablissement public à caractère industriel et commercial | RCS Paris B 775 685 019

DRT/LIST  
DM2I

Laboratoire National Henri Becquerel  
Laboratoire de Métrologie de la Dose

