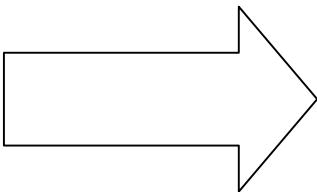


COMPARAISON DU CALCUL DE DOSE MONTE-CARLO (PENFAST) AVEC LES MESURES EN CONDITIONS MÉTÉROLOGIQUES ET EN PRÉSENCE D'HÉTÉROGÉNÉITÉS

B HABIB, B POUMARÈDE, JM BORDY, F TOLA

CEA, LIST, Département des Technologies du Capteur et du Signal,
F-91191 Gif-sur-Yvette, France.

Calcul de dose à l'aide de méthodes statistiques avancées pour le traitement du cancer par radiothérapie



Mise en place d'une optimisation (compromis Précision/Temps de calcul) et d'une validation en conditions métrologiques et cliniques des simulations MC PENFAST et PENELOPE

ETAT DE L'ART : Pourquoi MC ?

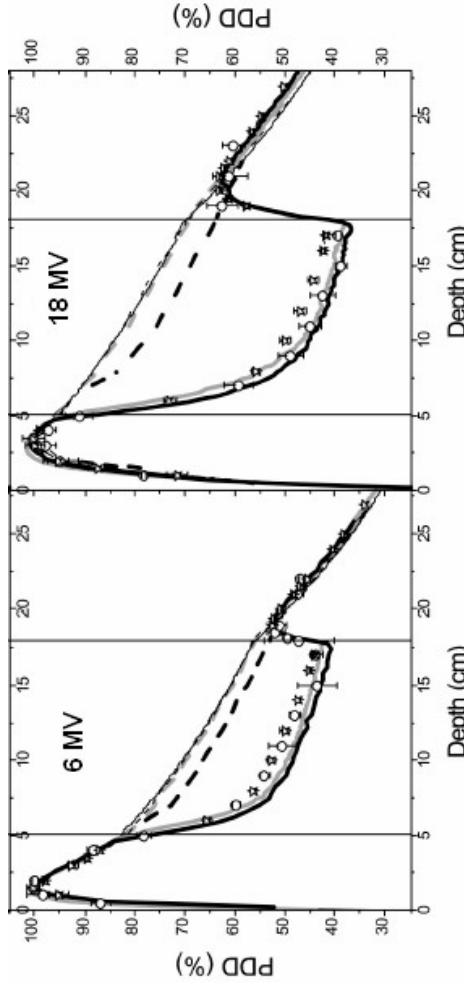


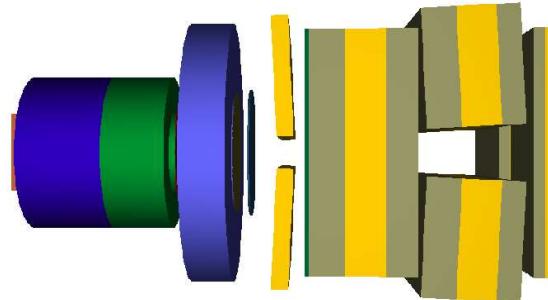
Fig. 3 PDDs for the St. Bartholomew's hospital lung measured with TLD (○), with the ionization chamber NE 2571(△), obtained by Monte Carlo simulations (black thick continuous line) and predicted by the three studied calculation algorithms (Batho, black thick dashed line; Mod Batho, gray thick dashed line; and Equivalent TAR, black thin dashed line).

Carrasco P, Jornet N, Duch MA, Weber L, Ginjaume M, Eudaldo T, Jurado D, Ruiz A and Ribas M 2004 Comparison of dose calculation algorithms in phantoms with lung equivalent heterogeneities under conditions of lateral electronic equilibrium *Medical Physics* **31** 2899-2911

Les systèmes de planification de traitement (TPS) actuels :

- Clarkson, Pencil Beam, collapsed cone, Kernel, 3D Convolution/Superposition algorithms, ...
- une dizaine de codes MC pour la vérification de la dose (MCDE, BEAM/DOSXYZ, MCV, RT_MCNP, MMCTP, SMCP, MCRTV, RTGrid, ...)
- MC pour la planification (PEREGRINE, DPM/PENFAST, MCDOSE/MCSIM, VMC, XVMC, VMC++, MMC) : limitations, évolutions continues ...

DOSIMÉTRIE PAR MONTE-CARLO

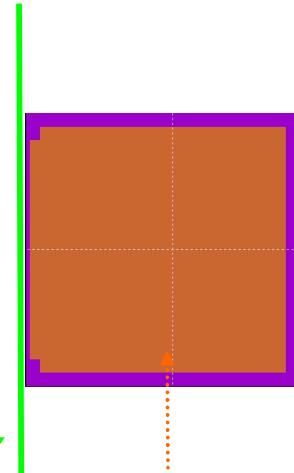


• Code **PENELOPE**:

- Modélisation et simulation du transport des particules dans la tête de l'accélérateur
- Création d'un **espace de phase** (PSF, caractéristiques des particules) pour chaque faisceau

• Code **PENFAST** (dans le TPS):

- **Voxélisation des fantômes homogène** et hétérogènes (CT scan)
- **Simulation optimisée en temps des distributions de dose** moyennant un modèle physique simplifié



1. Optimisation des simulations MC

- Parallélisation de PENELOPE (version 2006) et PENFAST
- Utilisation d'algorithmes de réduction de variance dans PENELOPE

2. Validation du calcul de dose MC (PENFAST) en conditions météorologiques

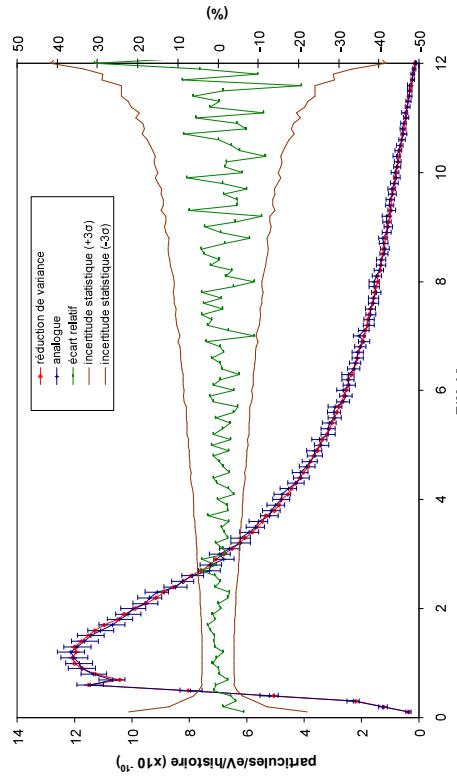
(au Laboratoire National Henri Becquerel, la référence nationale dosimétrique)

- En milieu homogène (ajustement des paramètres du faisceau initial)
- En présence d'hétérogénéités (os et poumon)

OPTIMISATION DES SIMULATIONS MC

1. Techniques de réduction de variance dans PENELOPE-2006

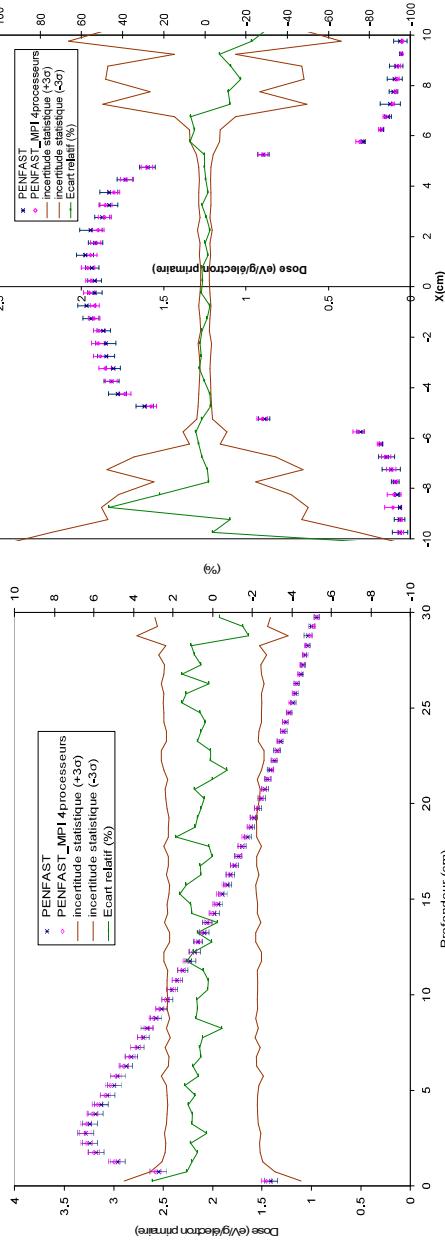
- Bremsstrahlung forcée
- Roulette Russe
- Splitting
- Splitting circulaire (symétrie de révolution)



Gain sur l'efficacité du calcul du PSF > 500 par rapport à une simulation analogue

2. Parallelisation de PENELOPE-2006 et PENFAST

Gain sur le temps égal au nombre de processeurs dédiés aux calculs



Temps nécessaire aujourd’hui pour le calcul d’un dépôt de dose dans un milieu simple à $\pm 1\%$ (1σ , région de doses $> 50\%$ du maximum) avec PENFAST sur le cluster du CEA (20 processeurs, 64 bits, 2.4 GHz)

- ~ 4 min pour un faisceau d’électrons 18 MeV, champ $10 \times 10 \text{ cm}^2$, 1 million de voxels de 4 mm de côté.
- ~ 15 min pour un faisceau de photons 12 MV, sans accessoire, champ $10 \times 10 \text{ cm}^2$, 512000 voxels de 5 mm de côté.

1. Optimisation des simulations MC

- Parallélisation de PENELOPE (version 2006) et PENFAST
- Utilisation d'algorithmes de réduction de variance dans PENELOPE

2. Validation du calcul de dose MC (**PENFAST**) en conditions météorologiques

(au Laboratoire National Henri Becquerel, la référence nationale dosimétrique)

- En milieu homogène (ajustement des paramètres du faisceau initial)
- En présence d'hétérogénéités (os et poumon)

VALIDATIONS MÉTROLOGIQUE

Matériels et méthodes (1)

• Accélérateur Saturne 43

- Faisceaux : photons 12 MV et électrons 18 MeV
- Champ $10 \times 10 \text{ cm}^2$ à 1m de la source

• Fantômes

• Homogène (ajustement du faisceau initial)

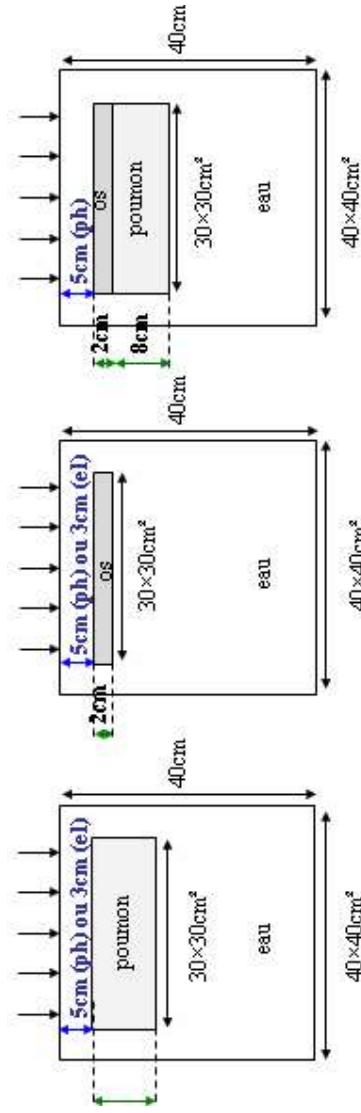
• Hétérogènes

• Dosimètres

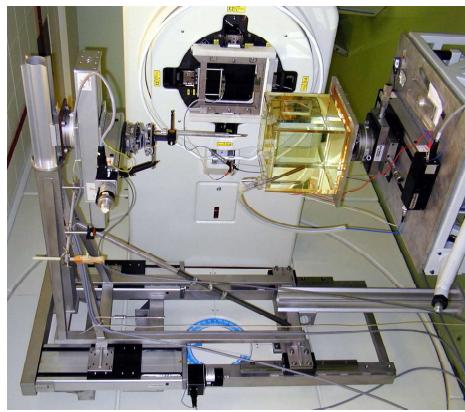
• Chambres d'ionisation (cylindriques et plates)

• Dosimètre de Fricke (mesures aux interfaces)

Configurations des fantômes hétérogènes



Métrie de la dose
(CEA-LIST LNHB)



VALIDATIONS MÉTROLOGIQUE

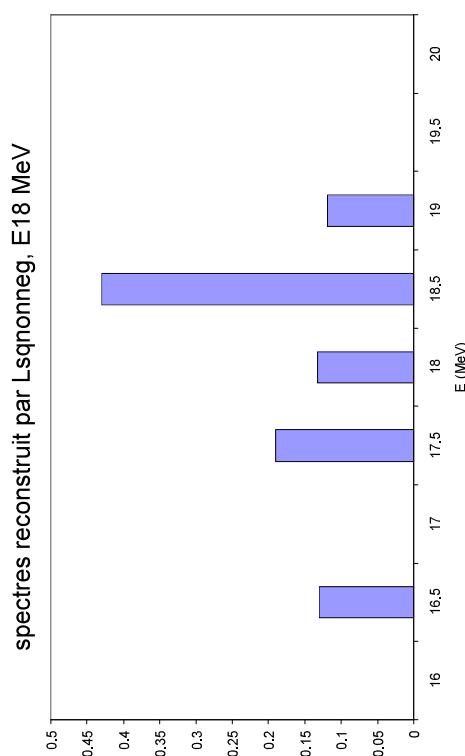
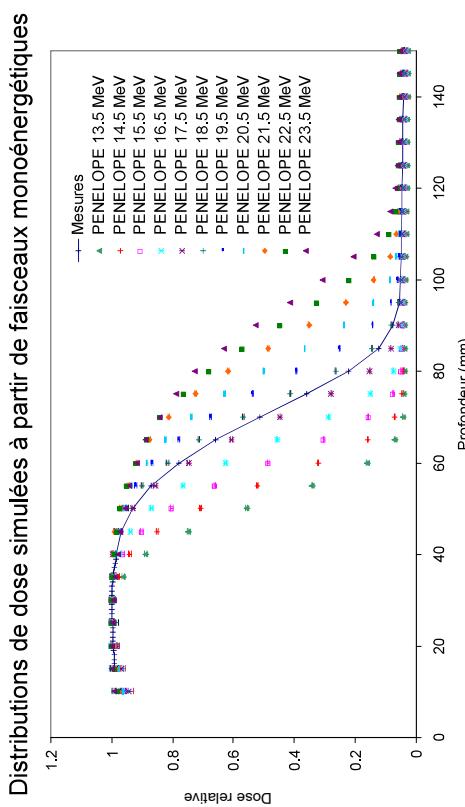
Matériels et méthodes (2)

- Modélisation géométrique et détermination du spectre en énergie initial des faisceaux

• Difficulté : spectre inconnu, méthode itérative empirique dans la littérature (gaussienne)

• Solution : Reconstruction du spectre en énergie (non symétrique) des électrons primaires par la méthode des moindres carrés (MMC) en ajustant les distributions de dose calculées aux mesures expérimentales

→ Modélisation géométrique du LINAC et création d'un espace des phases

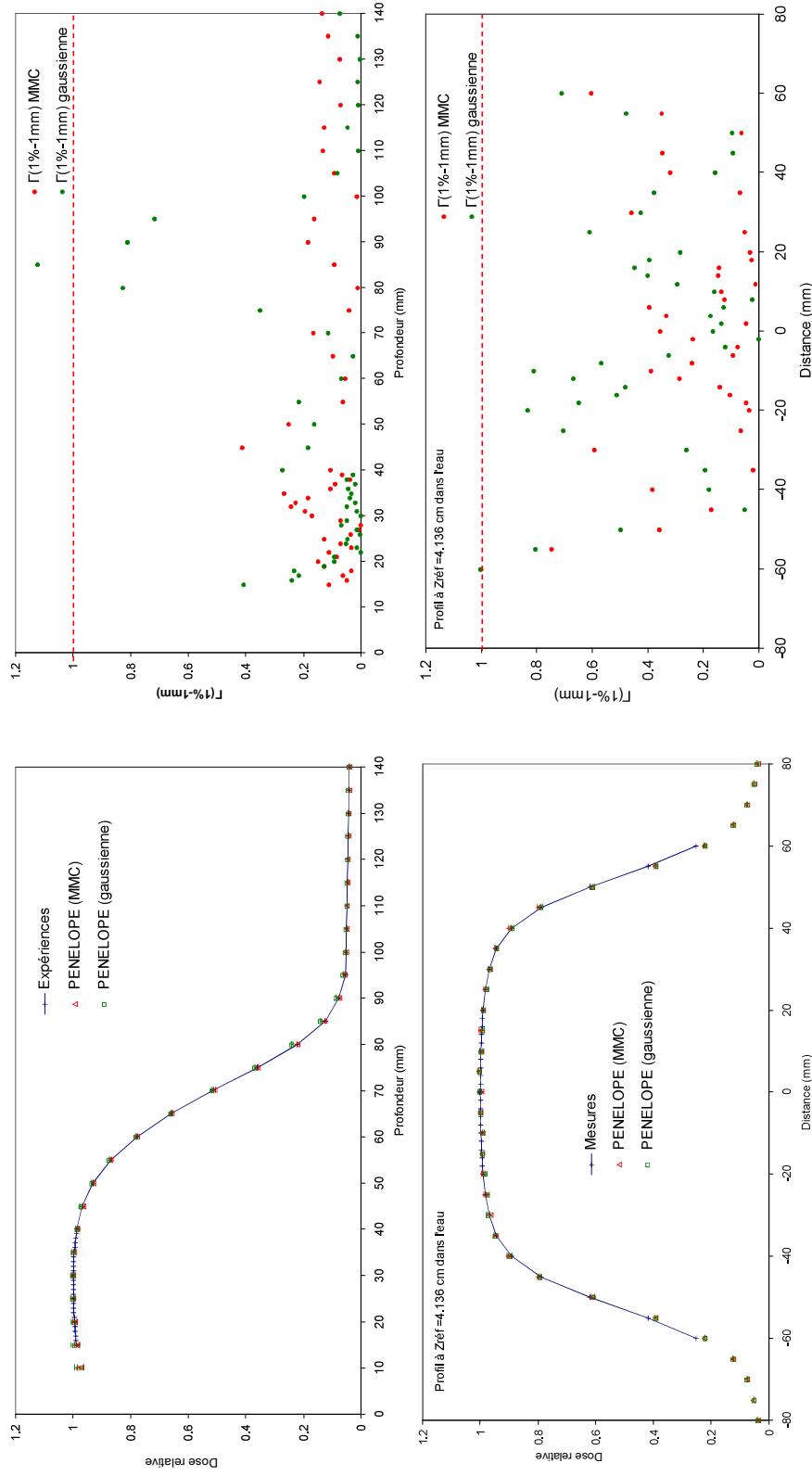


VALIDATIONS MÉTROLOGIQUE

Matiériaux et méthodes (3)

- Modélisation géométrique et détermination du spectre en énergie initial des faisceaux

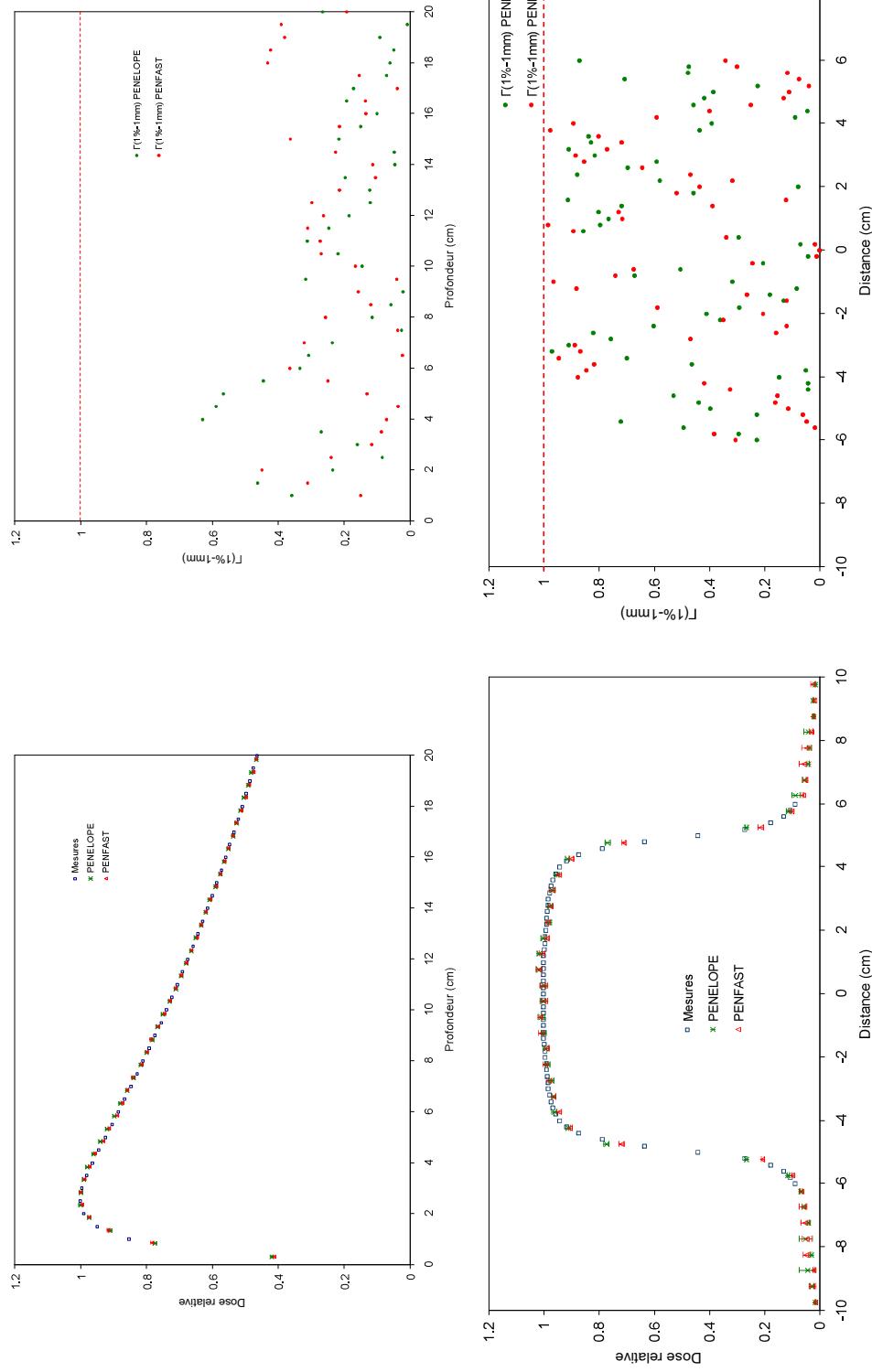
→ Comparaison d'une distribution gaussienne vs un spectre reconstruit par MMC



VALIDATIONS MÉTROLOGIQUE : RÉSULTATS

Validation du PSF (1)

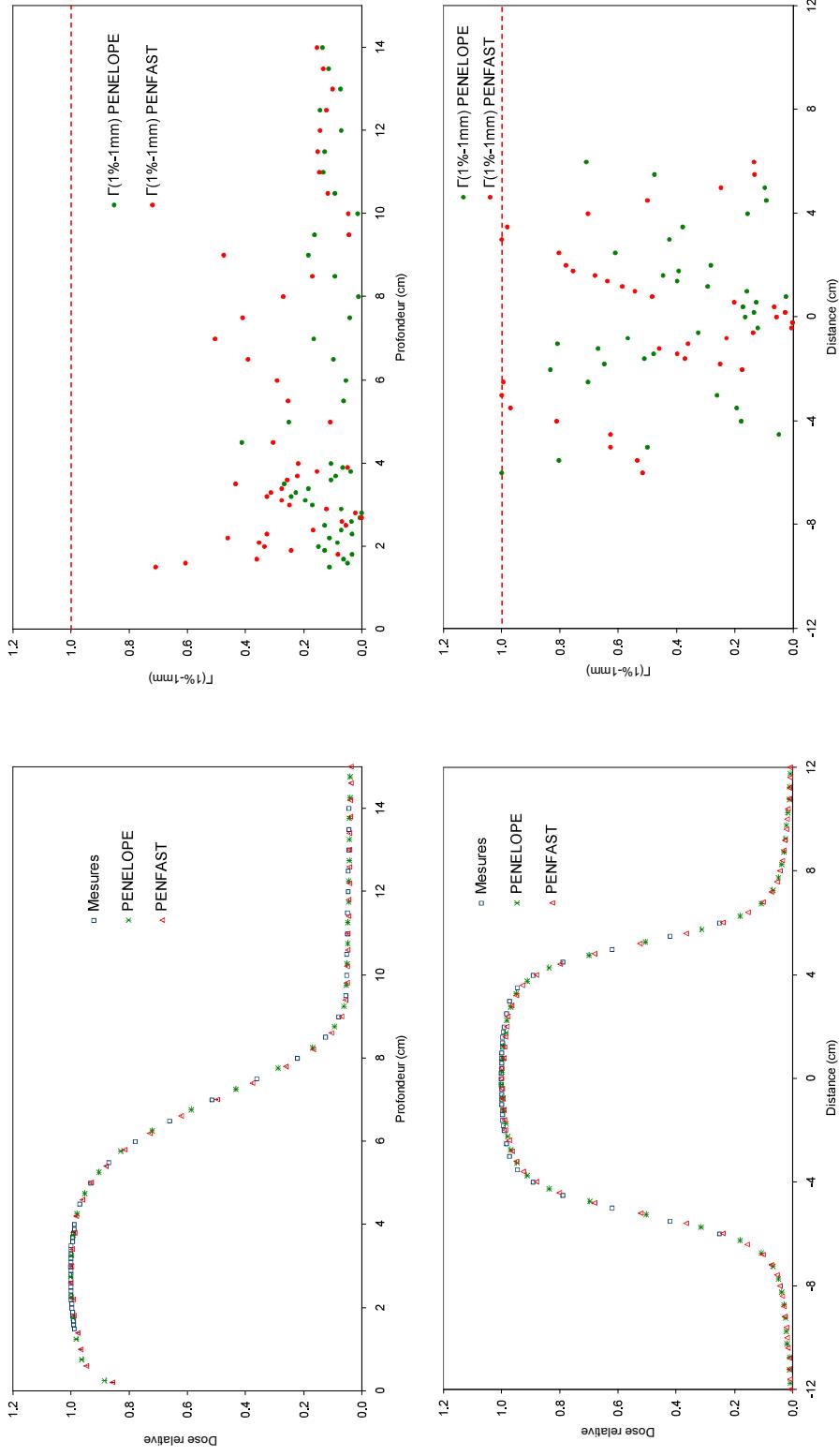
- Faisceau de photons 12 MV



VALIDATIONS MÉTROLOGIQUE : RÉSULTATS

Validation du PSF (2)

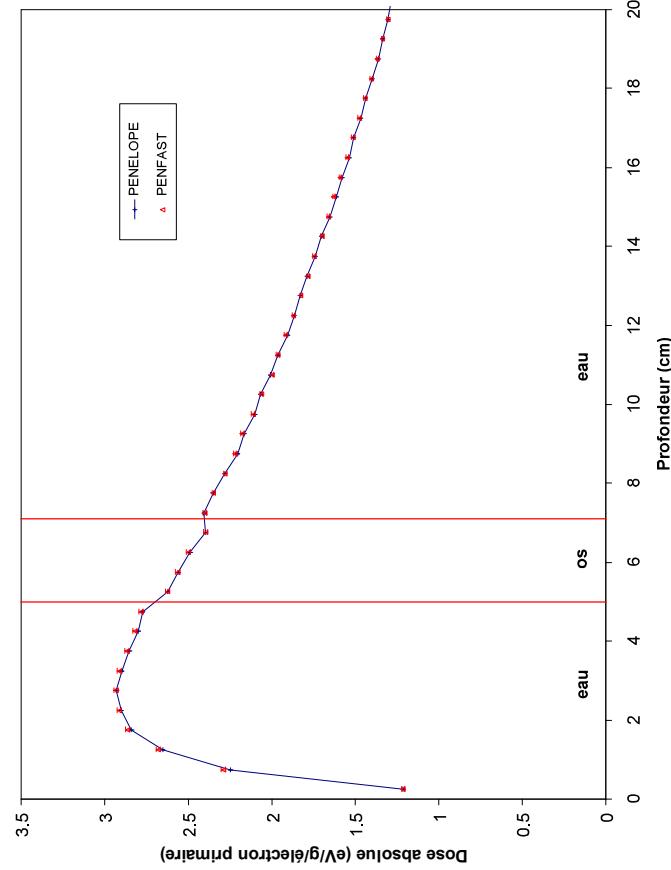
• Faisceau d'électrons 18 MeV



VALIDATIONS MÉTROLOGIQUE : RÉSULTATS

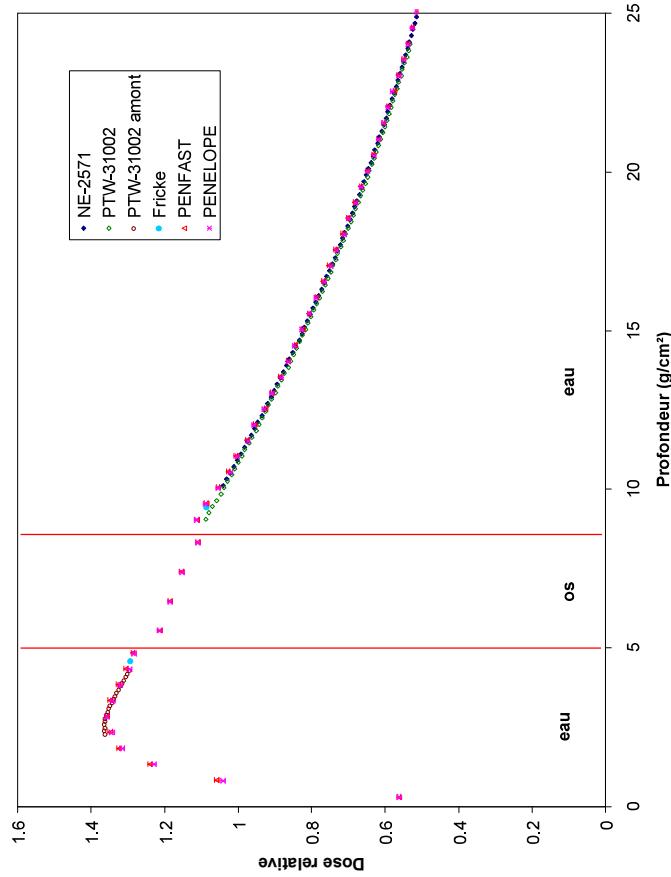
Faisceau de photons 12 MV

- Fantôme eau - os - eau



Ecart maximal PENFAST/PENELope < (0.5 %, 0.5 mm)

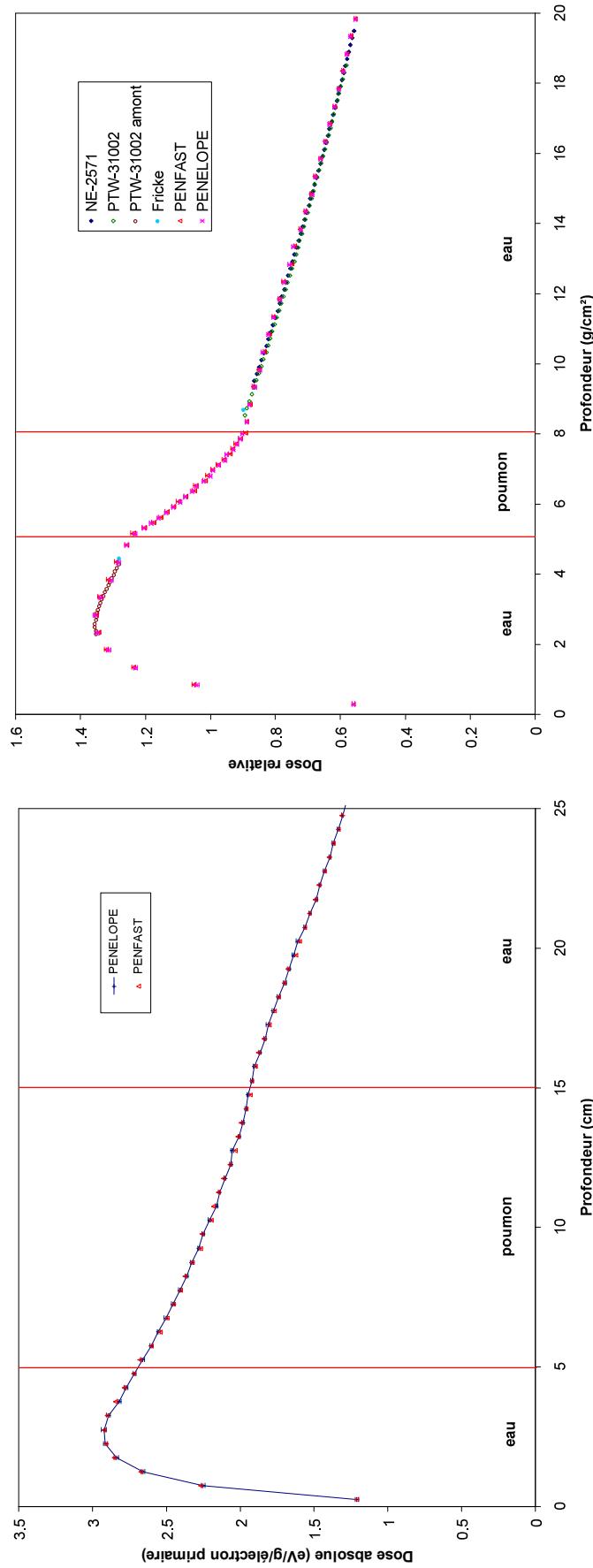
Ecart maximal MC/Mesures < 1.2 %



VALIDATIONS MÉTROLOGIQUE : RÉSULTATS

Faisceau de photons 12 MV

- Fantôme eau - poumon - eau



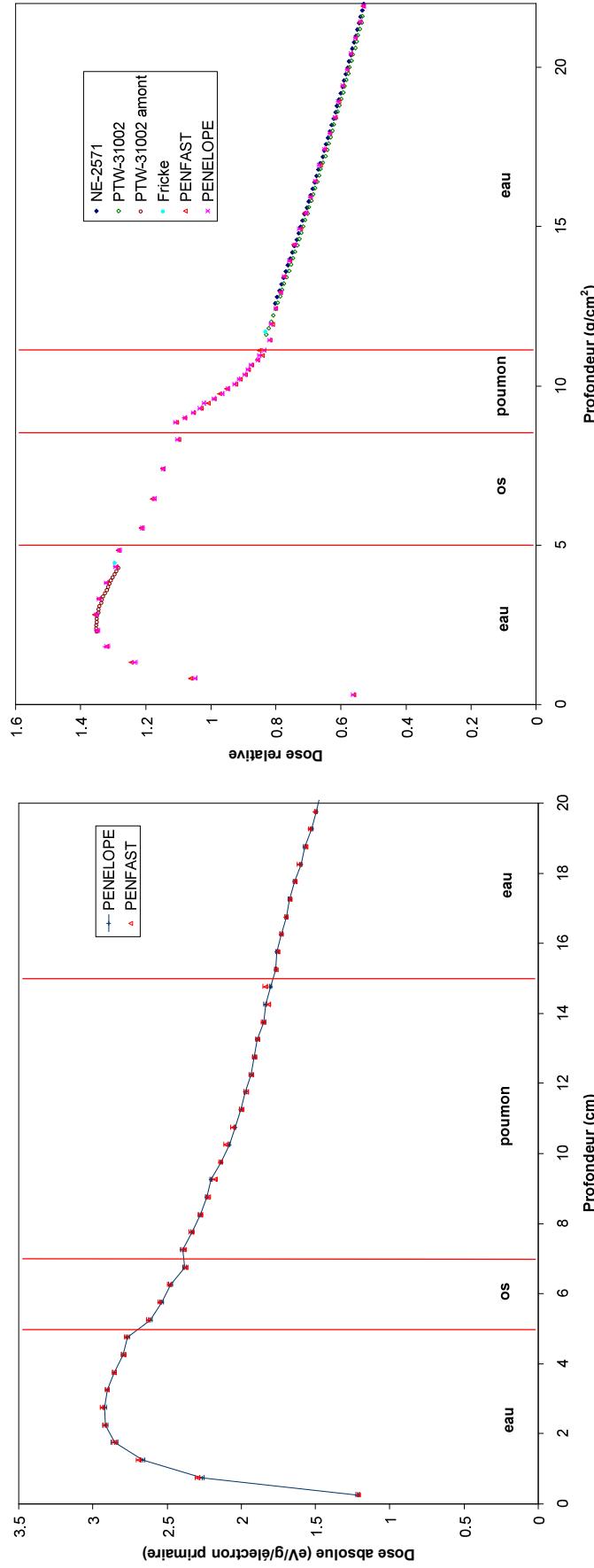
Ecart maximal PENFAST/PENELOPE < (0.5 %, 0.5 mm)

Ecart maximal MC/Mesures < 1.6 %

VALIDATIONS MÉTROLOGIQUE : RÉSULTATS

Faisceau de photons 12 MV

- Fantôme eau - os - poumon - eau



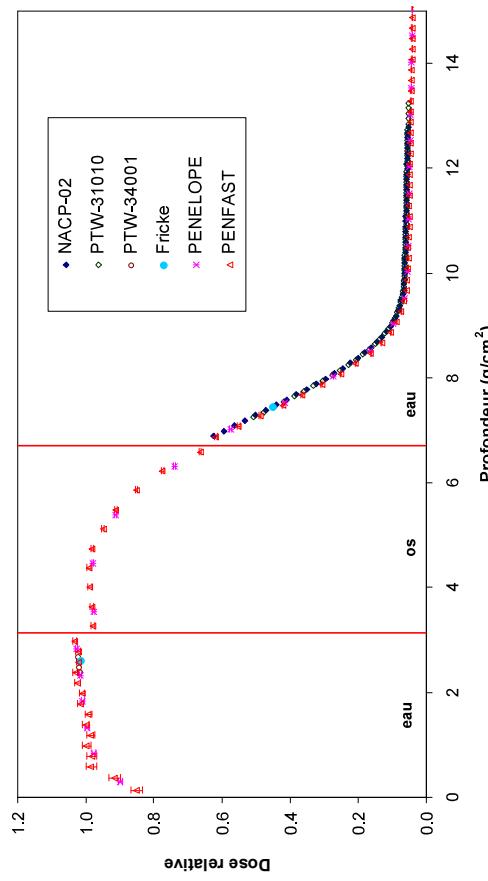
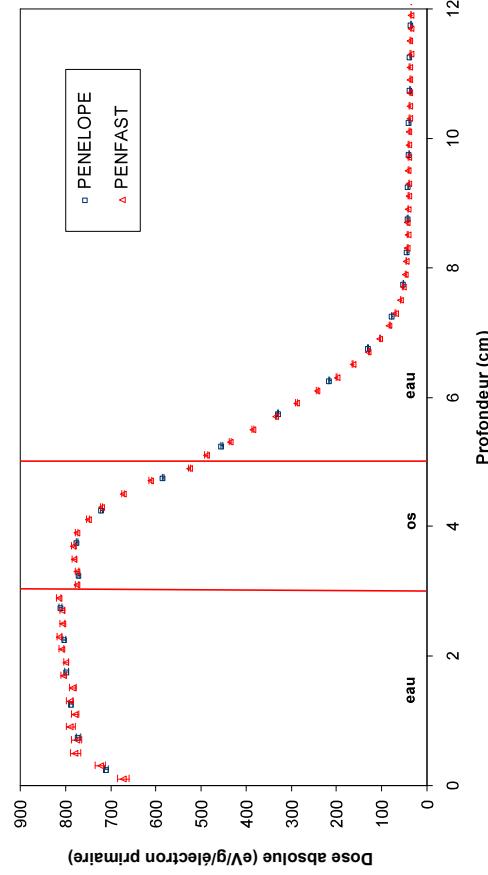
Ecart maximal PENFAST/PENELOPE < (0.5 %, 0.5 mm)

Ecart maximal MC/Mesures < 1.5 %

VALIDATIONS MÉTROLOGIQUE : RÉSULTATS

Faisceau d'électrons 18 MeV

- Fantôme eau - os - eau



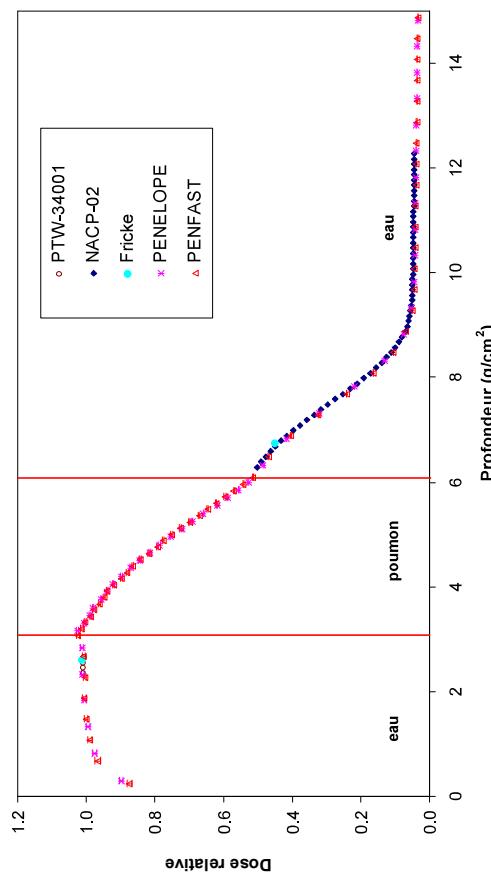
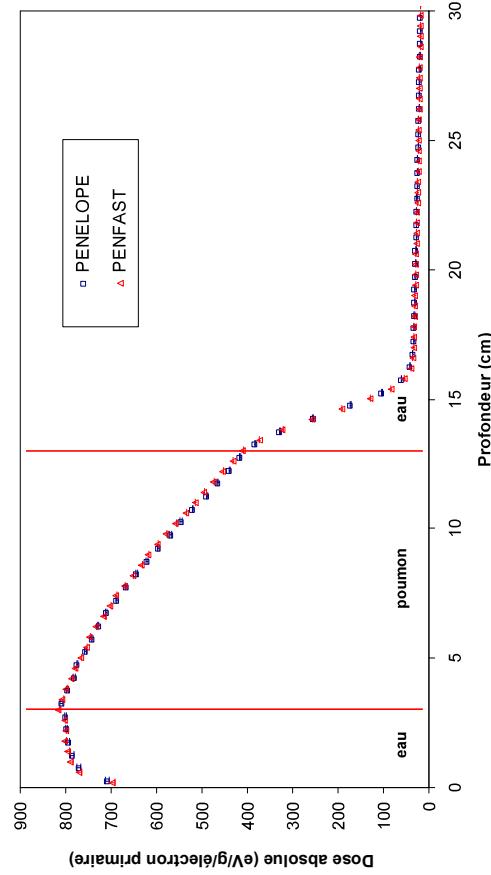
Ecart maximal PENFAST/PENELope < (1 %, 1 mm)

Ecart maximal MC/Mesures < 1.9 %

VALIDATIONS MÉTROLOGIQUE : RÉSULTATS

Faisceau d'électrons 18 MeV

- Fantôme eau - poumon - eau



Ecart maximal PENFAST/PENELope < (1 %, 1 mm)

Ecart maximal MC/Mesures < 1.8 %

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

- Validation de l'accélération des calculs MC
 - Réduction de variance (PENELOPE) : Gain en efficacité > 500 pour le calcul du PSF
 - Parallelisation (PENELOPE, PENFAST) : gain sur le temps égal au nombre de processeurs dédiés aux calculs
- Ajustement du spectre en énergie du faisceau initial par MMC, résultats plus précis que ceux d'une distribution gaussienne
- Validation du calcul de dose avec PENFAST par rapport à PENELOPE et les mesures en présence d'hétérogénéités et en conditions métrologiques
 - Capacité du code à prendre en compte les changements brusques de densité et de fluence aux interfaces entre les hétérogénéités
- Travaux en cours : validation du TPS MC final en conditions cliniques
 - Accélérateur Siemens Primus du CAL à Nice, petits faisceaux et fantômes hétérogènes

Je vous remercie pour votre attention

bouchra.habib@cea.fr

PARALLELISATION DE PENELOPE-2006 ET PENFAST

Principales caractéristiques

- Interface parallèle MPI
version mpich2-1.0.6

- Langage FORTRAN 77

- Générateur parallèle de
nombres pseudo-aléatoires :
Xorgens (R.P. Brent) ; Période : 10¹²³³

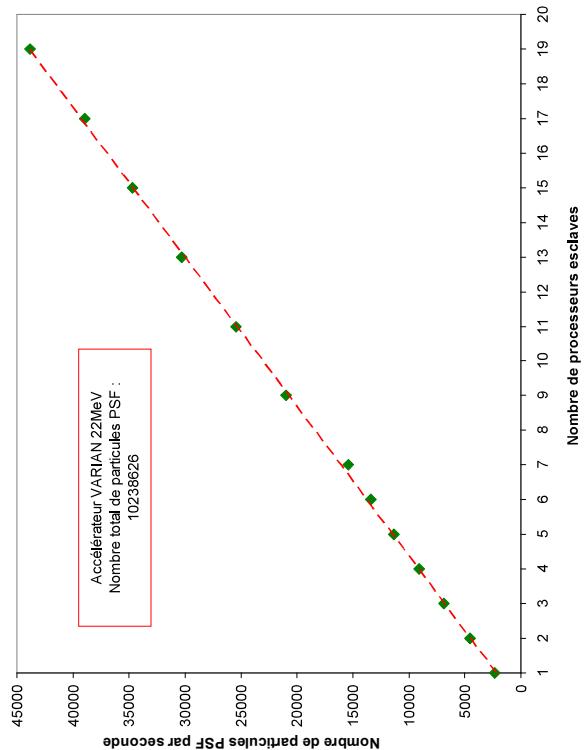
- Nombre N_p quelconque de processeurs

- 1 «maître» chargé de la gestion des fichiers
- $N_p - 1$ «esclaves» dédiés au calcul Monte-Carlo

- Toutes les fonctionnalités de PENELOPE-2006 et PENFAST ont été maintenues

Gain sur le temps égal au nombre de processeurs dédiés aux calculs ($N_p - 1$)

Scalabilité du code parallèle



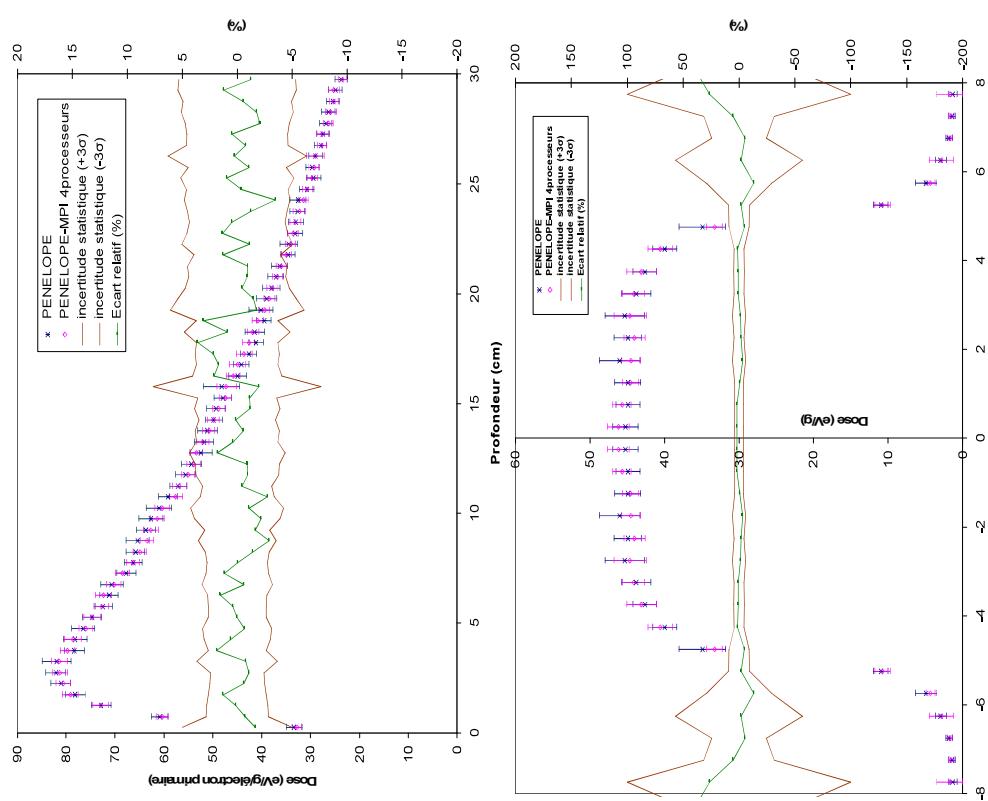
(F.TOLA, 2007, Projet TELEOS)

PARALLELISATION DE PENELOPE-2006 ET PENFAST

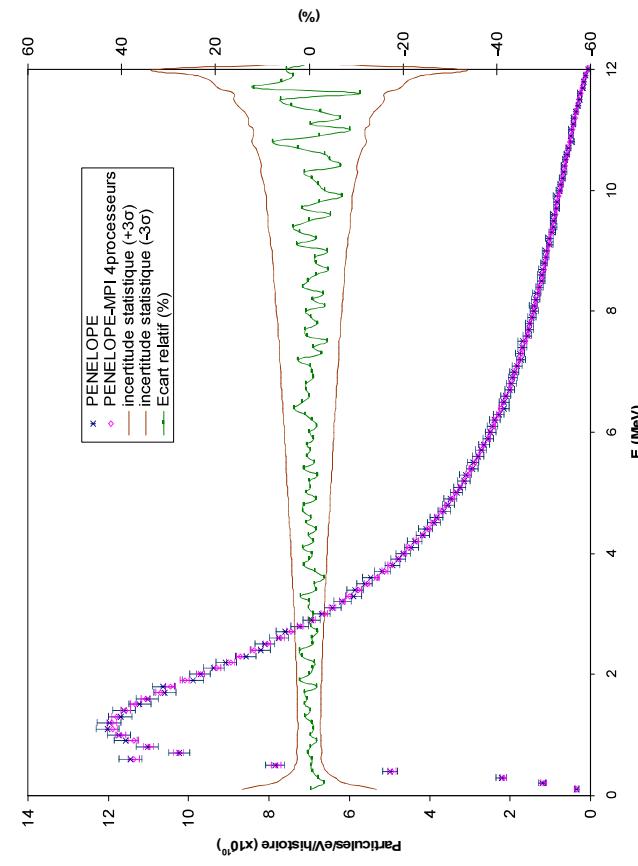
Validation du code parallèle (PENELOPE-MPI) par comparaison à la version originale non parallèle :

- Cas du faisceau de photons 12 MV de Saturne 4.3

Distributions de dose dans une cuve à eau



Spectre en énergie à la sortie de la tête de l'accélérateur

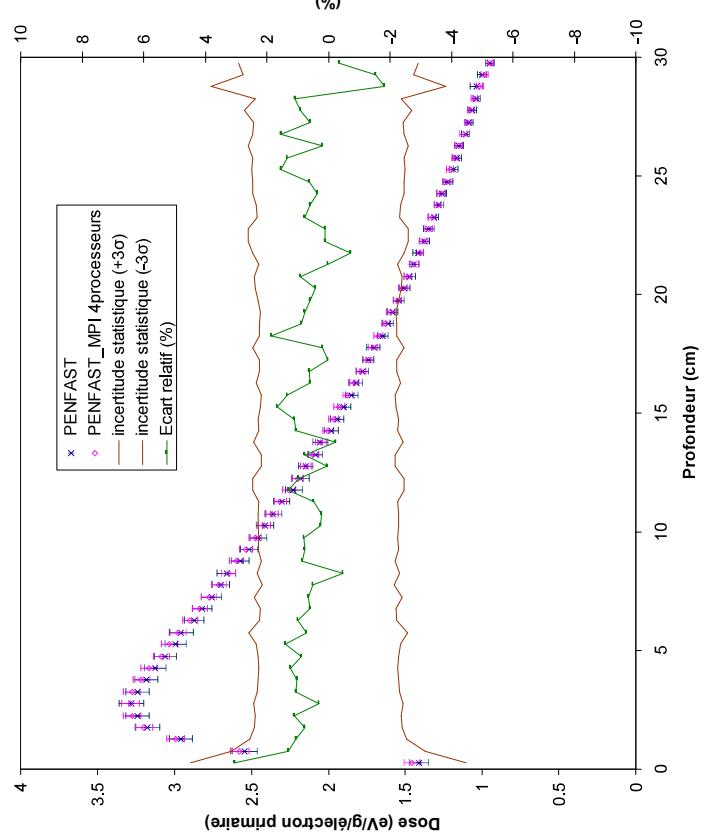


PARALLELISATION DE PENELOPE-2006 ET PENFAST

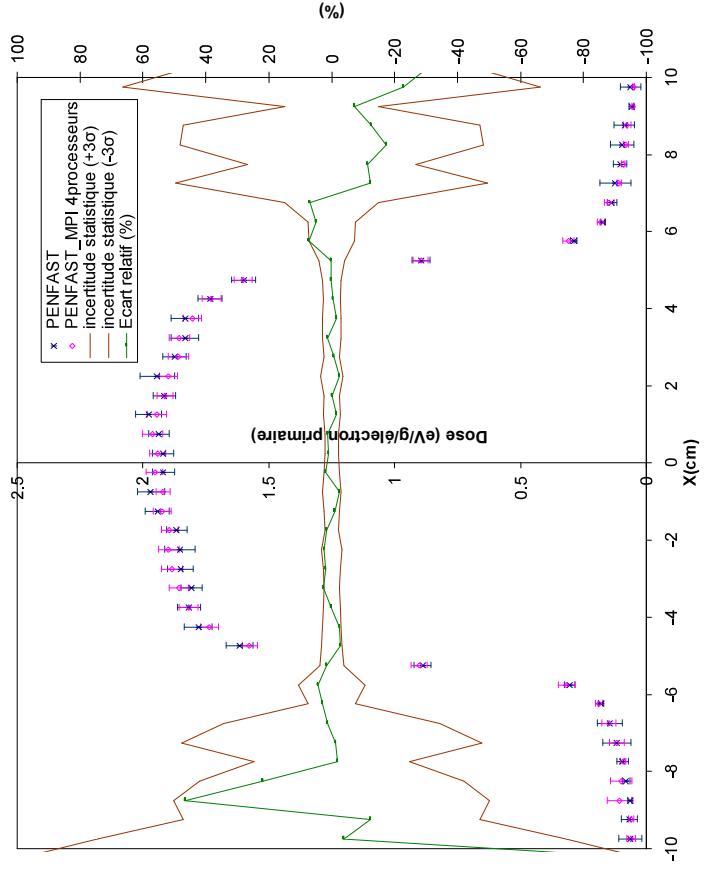
**Validation du code parallèle (PENFAST-MPI) par comparaison
à la version originale non parallèle :**

- Cas du faisceau de photons 12 MV de Saturne 43

Courbes de dose en profondeur sur l'axe

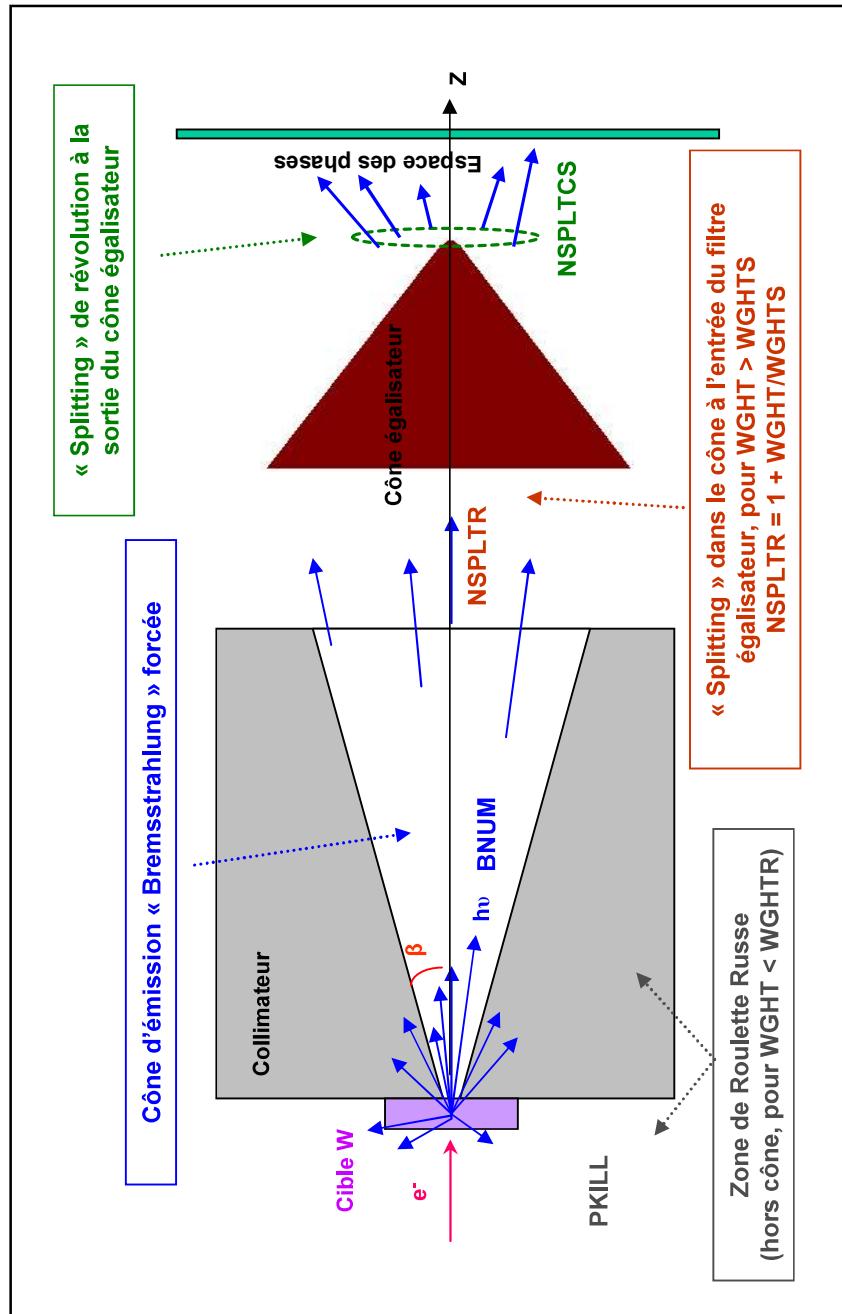


Profils latéraux de dose à la profondeur de référence (10cm)



RÉDUCTION DE VARIANCE DANS PENELOPE

Schéma de principe des méthodes de réduction de variance présentes dans PENELOPE-MPI



(F.TOLA, 2007, Projet TELEOS)

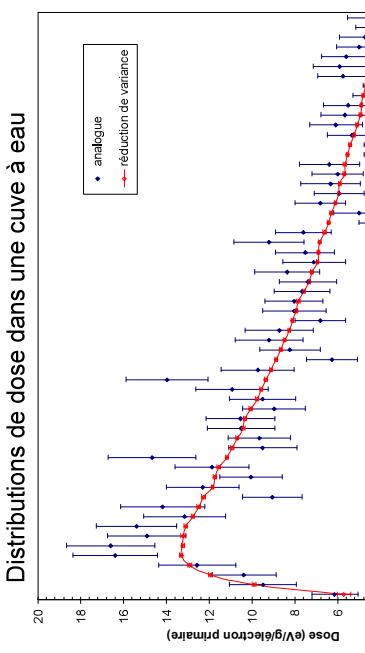
RÉDUCTION DE VARIANCE DANS PENELOPE

Gain en efficacité

Calcul de la dose en une passe à partir de la tête de l'accélérateur avec PENELOPE:

Cas du RX 12 MV

Incertitude statistique < 1% (1σ , région de doses > 50% du maximum) obtenue en 10h sur 10 processeurs ! (au lieu de plusieurs mois en simulation analogue)



L'efficacité de la simulation :

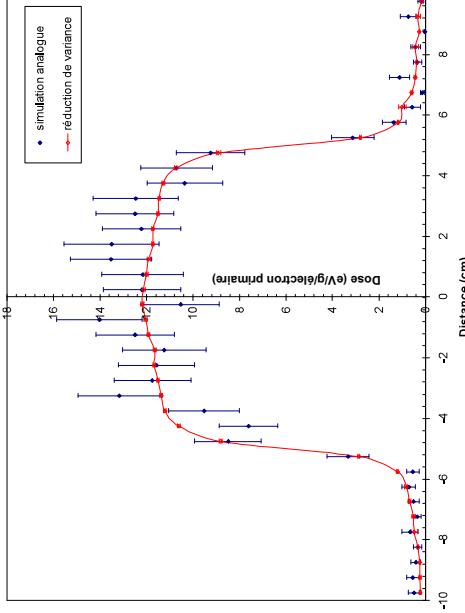
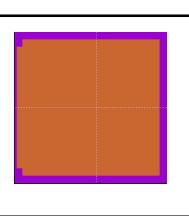
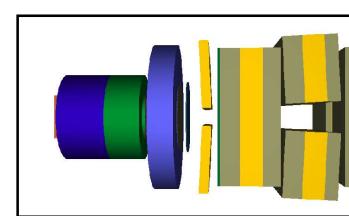
$$\mathcal{E} = \frac{1}{\sigma^2 T} \quad \sigma \text{ est l'incertitude statistique sur la dose} \quad T \text{ est le temps de calcul}$$

Gain sur l'efficacité de la simulation par rapport à la simulation analogue :

- supérieur à 520 sur le rendement en profondeur
- supérieur à 840 sur le profil latéral



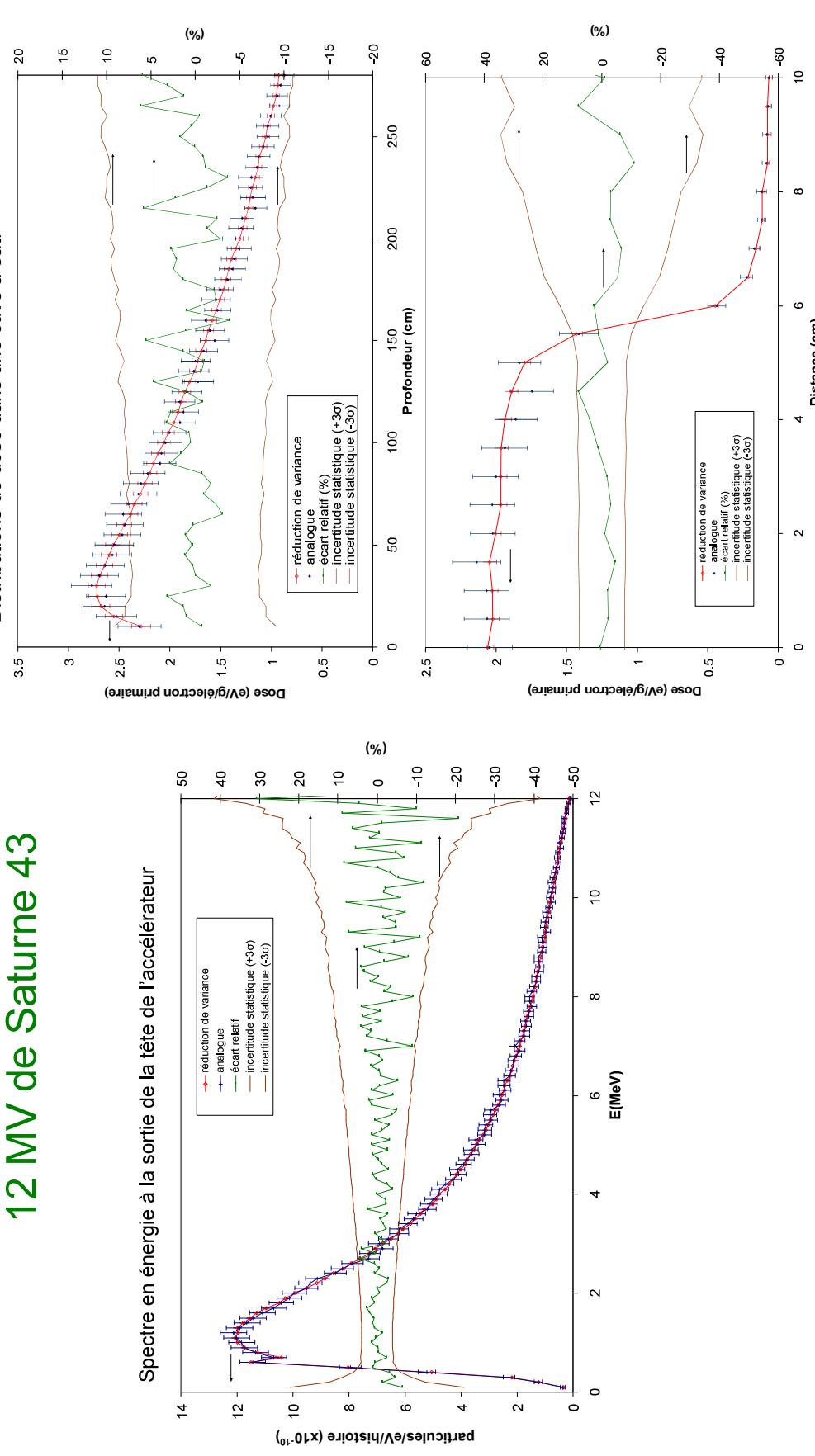
Il s'agit du gain pour la création des PSF



RÉDUCTION DE VARIANCE DANS PENELOPE

Validation par comparaison à une simulation analogue

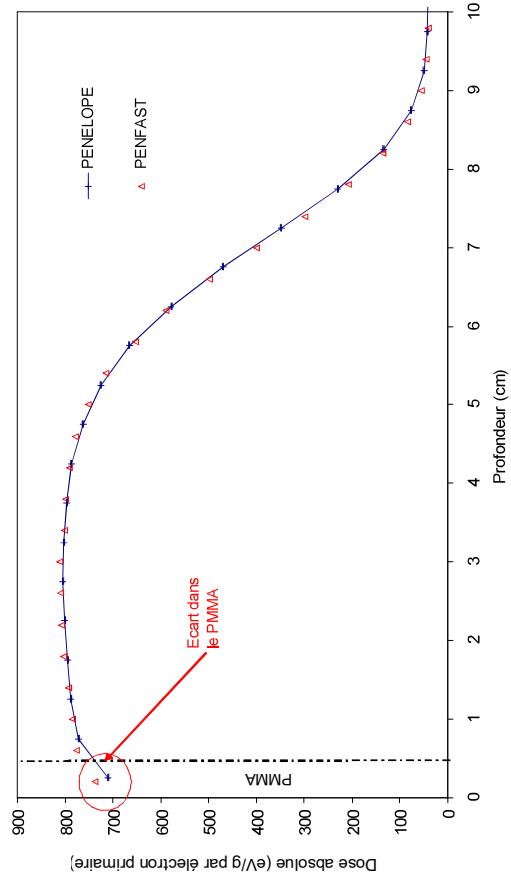
- Cas du faisceau de photons
12 MV de Saturne 43



VALIDATIONS MÉTROLOGIQUE

Calcul de dose

- Difficulté : nombre de matériaux limité dans PENFAST
→ Paroi des fantômes hétérogènes en PMMA, matériau indisponible



- Solution : génération des tables de données (diffusion multiple et perte d'énergie) et sections efficaces du PMMA pour une large gamme d'énergie et introduction de ce matériau dans la bibliothèque de PENFAST

→ ajout indispensable!