



HAL
open science

Nouvelle méthode de détermination du spectre en énergie initial d'un accélérateur linéaire en vue d'une planification de traitement en radiothérapie par Monte Carlo

Bouchra Habib, Bénédicte Poumarède, Jean Barthe

► **To cite this version:**

Bouchra Habib, Bénédicte Poumarède, Jean Barthe. Nouvelle méthode de détermination du spectre en énergie initial d'un accélérateur linéaire en vue d'une planification de traitement en radiothérapie par Monte Carlo. 48èmes Journées Scientifiques de la Société Française de Physique Médicale (JS-SFPM - 2009), Société Française de Physique Médicale, Jun 2009, Montauban, France. cea-02562712

HAL Id: cea-02562712

<https://cea.hal.science/cea-02562712>

Submitted on 5 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

NOUVELLE MÉTHODE DE REPRÉSENTATION DU SPECTRE EN ÉNERGIE INITIAL D'UN ACCÉLÉRATEUR LINÉAIRE EN VUE D'UNE PLANIFICATION DE TRAITEMENT EN RADIOTHÉRAPIE PAR MONTE CARLO

AUTEURS : B.HABIB, B.POUMARÈDE, J.BARTHE - CEA, LIST, Département des Technologies du Capteur et du Signal, F-91191 Gif-sur-Yvette, France.

1. Introduction

Depuis la fin des années 90, des systèmes de planification de traitement offrant des options de calcul de dose par Monte Carlo (MC) sont apparus. Ces méthodes sont considérées comme étant les plus précises. Cependant, pour calculer la dose par MC, deux étapes sont nécessaires : (1) la modélisation géométrique de la tête de l'accélérateur linéaire et (2) la caractérisation du faisceau d'électrons primaires à la sortie de la section de déviation magnétique. Malheureusement, les données relatives à l'accélérateur linéaire ne sont pas toujours connues avec précision. Par exemple, les caractéristiques du faisceau d'électrons primaires (distributions énergétique, spatiale et angulaire de ces électrons) sont relativement mal connues et difficilement mesurables.

Il est admis que la caractéristique principale du faisceau d'électrons primaires est son énergie puisqu'elle affecte directement la qualité du faisceau. Il n'existe actuellement aucune méthode simple permettant de déterminer avec certitude le spectre en énergie physique continu des électrons primaires vu le filtrage en énergie des électrons par le champ magnétique à la sortie de la section accélératrice. En simulation MC, le spectre en énergie des électrons primaires est souvent approximé à une distribution gaussienne. Cette distribution est généralement déterminée en optimisant d'une manière empirique son énergie moyenne, écart-type et fenêtre en énergie. Cette méthode manque toutefois en rigueur pour deux raisons. La première puisque l'asymétrie du spectre, implicitement due au fenêtrage en énergie des électrons lors de la déviation magnétique, doit être prise en compte. La seconde puisque la solution est empirique et dépend du choix des valeurs testées des trois paramètres.

Nous avons donc cherché une méthode mathématique qui détermine un spectre discret avec un nombre limité d'énergies. Cette représentation spectrale n'est pas réelle mais induit un dépôt d'énergie qui correspond à la réalité expérimentale. Cette étude propose donc une nouvelle méthode d'ajustement de la distribution énergétique initiale d'un accélérateur linéaire. Il s'agit de déterminer une représentation discrète du spectre en énergie des électrons primaires en utilisant à la fois les simulations MC PENELOPE [1] et le principe des moindres carrés avec la contrainte de non-négativité [2] afin d'ajuster aux mieux les distributions de dose calculées à celles mesurées. Pour valider cette méthode, des simulations des deux accélérateurs Saturne 43 et Primus K-CLASS de Siemens recouvrant les modes photon et électron selon diverses énergies et tailles de champs ont été réalisées. Cet article présente uniquement les résultats de l'ajustement du spectre en énergie du mode électron 9 MeV de l'accélérateur Primus présent au Centre Antoine Lacassagne à Nice. L'index gamma a été utilisé pour évaluer la concordance entre les simulations et les mesures.

2. Matériels et Méthodes

2.1. Méthode d'ajustement du spectre en énergie initial d'un accélérateur linéaire

La dose absorbée dans un milieu répond à la loi d'additivité, autrement dit la dose totale absorbée est égale à la somme des doses absorbées dues aux rayonnements de différentes énergies irradiant le milieu. Cette propriété justifie le choix d'une représentation du spectre énergétique inconnu des électrons primaires d'un accélérateur linéaire à partir des distributions de dose déposée dans l'eau (milieu de référence en radiothérapie), en utilisant le principe des moindres carrés [2].

Cette méthode d'ajustement du spectre en énergie initial repose, tout d'abord, sur plusieurs simulations du rendement en profondeur dans l'eau réalisées avec le code MC PENELOPE en considérant des faisceaux d'électrons primaires monoénergétiques. Les simulations sont effectuées pour le champ de référence 10×10cm² afin de minimiser l'effet des particules diffusées latéralement dans l'eau. Ensuite, le principe

des moindres carrés est utilisé pour déterminer une représentation discrète du spectre énergétique des électrons primaires qui permet d'obtenir un rendement en profondeur, reconstruit par combinaison linéaire entre les rendements en profondeur simulés à différentes énergies, se conformant aux mesures expérimentales dans l'eau.

Etant donné que les paramètres recherchés correspondent à l'intensité de chaque énergie, leurs valeurs ne peuvent être que positives ou nulles. La détermination du poids optimal de chaque énergie se fait donc selon un algorithme des moindres carrés approprié dit « moindres carrés avec la contrainte de non-négativité » qui trouve l'ensemble des paramètres optimaux minimisant la distance entre le modèle théorique (simulation MC) et les mesures, sous la condition supplémentaire de non-négativité de ces paramètres. Pour mettre en œuvre cette méthode, la fonction *lsqnonneg* (Least Squares with NONNEGativity constraints) du logiciel MATLAB [2,3] a été utilisée.

2.2. Conditions de mesures expérimentales et de simulations Monte Carlo

Dans cette étude, le mode électron 9MeV de l'accélérateur Primus a été étudié. La tête de l'accélérateur a été modélisée avec le code PENELOPE pour les champs 6×6 , 10×10 (Figure 1) et $20 \times 20 \text{cm}^2$, définis à 100cm de la source. La représentation du spectre en énergie initial a été déterminée à l'aide de la méthode décrite précédemment. Ensuite, les rendements en profondeur et les profils de dose (à 2cm de profondeur) ont été simulés dans une cuve à eau de $50 \times 50 \times 50 \text{cm}^3$ positionnée à 100cm de la source. La taille des voxels choisie est égale à $4 \times 4 \times 2 \text{mm}^3$. L'incertitude statistique (1σ) associée aux calculs MC dans les régions de forte dose (entre 50% et 100% de la dose maximale) est inférieure à 2,7% pour le champ $6 \times 6 \text{cm}^2$ et inférieure à 0,5% pour les deux autres champs étudiés.

Afin de valider la simulation MC des faisceaux étudiés, les résultats des simulations ont été comparés aux mesures expérimentales effectuées à l'aide d'une chambre d'ionisation cylindrique de type « Scanditronix Wellhöffer CC13 Compact Chamber » (volume sensible de $0,13 \text{cm}^3$). Les rendements en profondeur mesurés ont été corrigés du facteur $S_{eau,air}$ [4]. Les incertitudes associées aux mesures expérimentales sont de l'ordre de 1,5% (1σ).

Toutes les distributions de dose calculées et mesurées ont été normalisées au maximum de dose.

Le test de l'index gamma a été utilisé pour évaluer l'écart entre les distributions de dose

calculées et mesurées. Les valeurs des critères d'acceptabilité ont été choisies égales à 2% et 1mm [5]. Ces valeurs sont compatibles avec les incertitudes associées aux mesures.

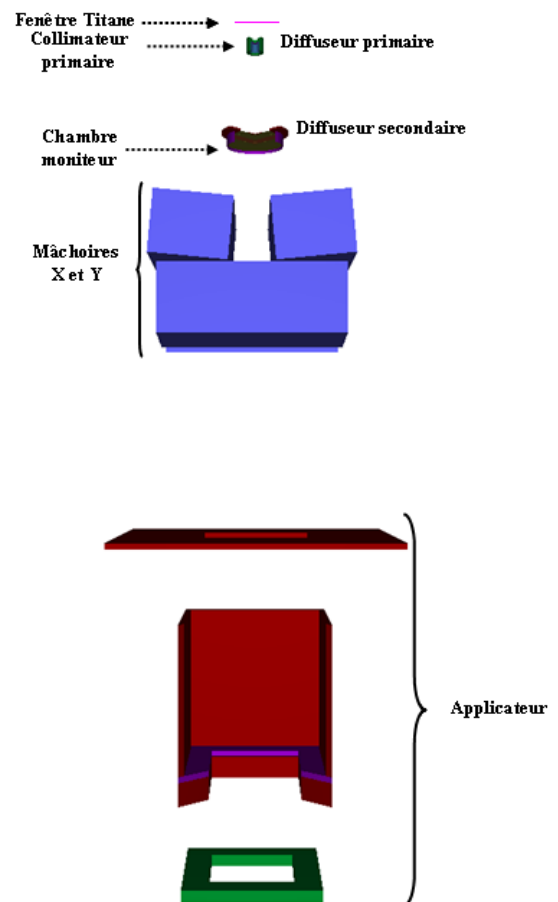


Figure 1 : Visualisation avec le logiciel GVIEW3D de la tête du Primus en mode électron 9MeV (champ $10 \times 10 \text{cm}^2$).

3. Résultats et discussions

3.1. Spectre en énergie des électrons primaires

Pour la représentation du spectre en énergie initial du mode électron 9MeV, 21 rendements en profondeur ont été simulés avec le code MC PENELOPE en considérant des sources d'électrons primaires ponctuelles monoénergétiques d'énergie allant de 7 à 11MeV par pas de 200keV, autour de l'énergie moyenne annoncée par le constructeur (9,4MeV). Le pas en énergie a été choisi en fonction de la sensibilité des

rendements en profondeur à la variation de l'énergie (en effet, un changement de l'énergie initiale de 200keV correspond à un changement de 1mm du parcours pratique du faisceau d'électrons). Le spectre en énergie du faisceau initial a été déterminé en ajustant, par la méthode des moindres carrés avec la contrainte de non-négativité, les rendements en profondeur calculés à celui mesuré. Les simulations ont été réalisées pour le champ de référence $10 \times 10 \text{ cm}^2$ défini à 100cm de la source.

La Figure 2a illustre les rendements en profondeur calculés et celui mesuré. La représentation du spectre en énergie des électrons primaires obtenue est illustrée sur la Figure 2b.

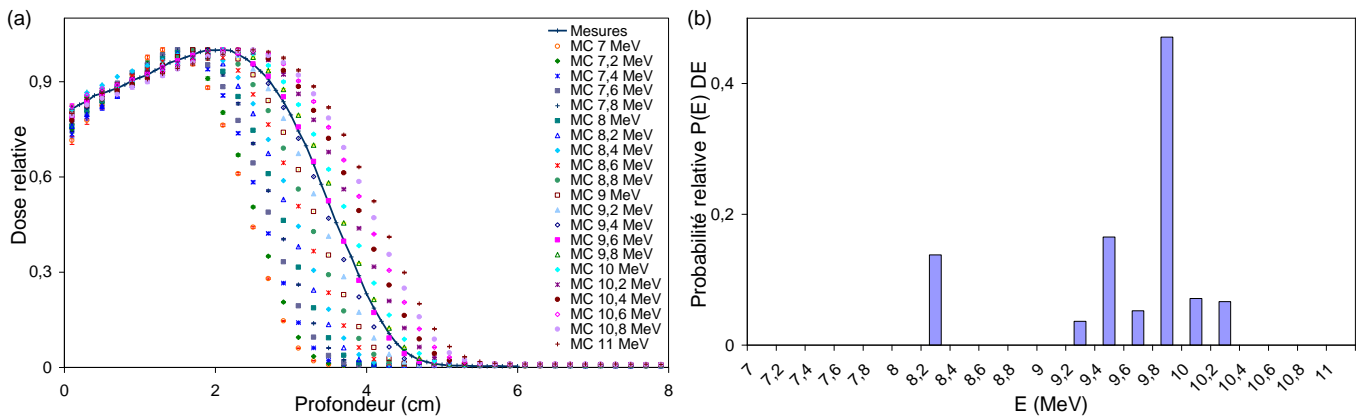


Figure 2 : (a) Rendements en profondeur mesuré et calculés pour plusieurs faisceaux d'électrons primaires monoénergétiques. (b) Représentation discrète du spectre en énergie des électrons primaires du mode électrons 9MeV.

3.2. Distributions de dose

La Figure 3 présente la comparaison entre les distributions de dose mesurées et calculées à partir du spectre en énergie initial déterminé précédemment, pour le faisceau d'électrons de 9MeV de champ $10 \times 10 \text{ cm}^2$. Les résultats du test de l'index gamma sont représentés sur la Figure 4.

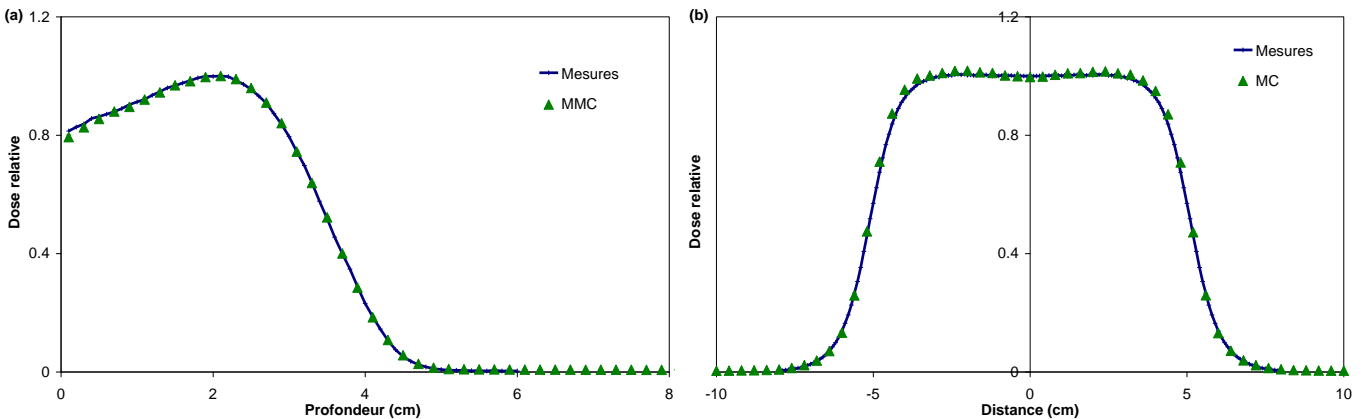


Figure 3 : Rendements en profondeur (a) et profils de dose (b) mesurés et calculés dans l'eau (champ $10 \times 10 \text{ cm}^2$).

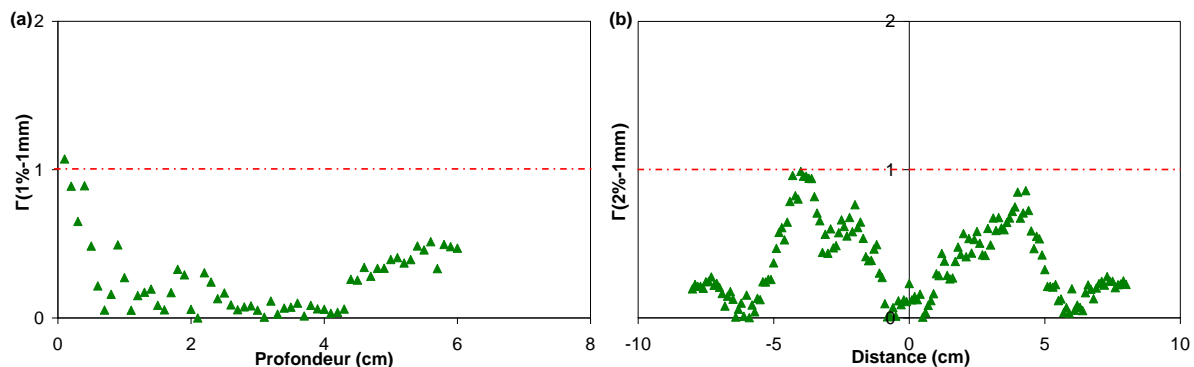


Figure 4 : Résultats du test de l'index gamma pour les rendements en profondeur (a) et les profils de dose (b) (champ $10 \times 10 \text{ cm}^2$).

Ces résultats mettent en évidence un bon accord entre les distributions de dose mesurées et calculées. Toutefois, il est important de préciser que le test de l'index gamma est rejeté pour le premier point du

rendement en profondeur (profondeur de 1mm, Figure 4a). Cette profondeur est située dans la zone de mise en équilibre électronique, le rejet en ce point n'est donc pas rédhibitoire.

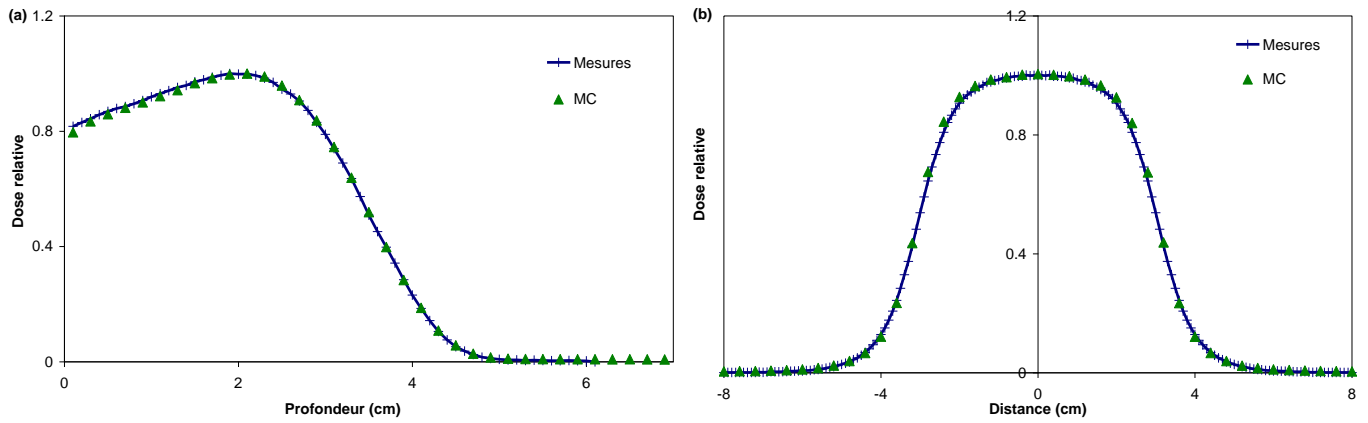


Figure 5 : Rendements en profondeur (a) et profils de dose (b) mesurés et calculés dans l'eau (champ $6\times 6\text{cm}^2$).

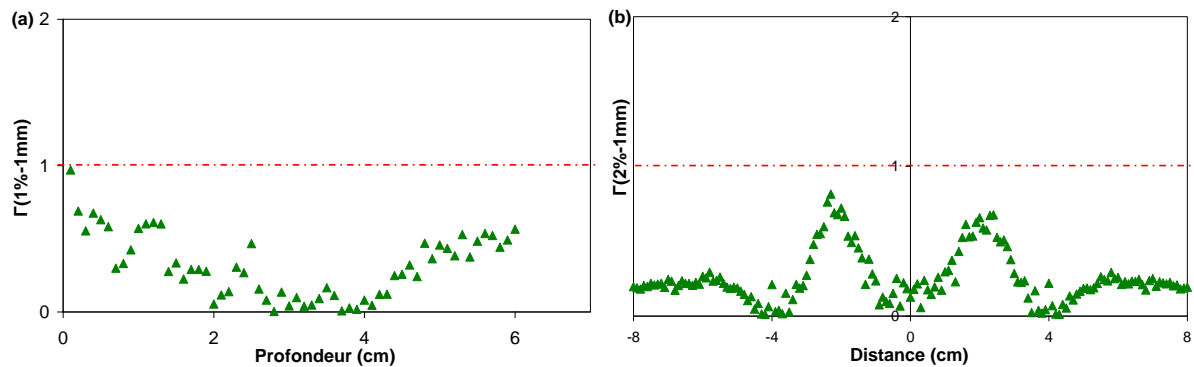


Figure 6 : Résultats du test de l'index gamma pour les rendements en profondeur (a) et les profils de dose (b) (champ $6\times 6\text{cm}^2$).

La même distribution énergétique initiale déterminée pour le champ $10\times 10\text{cm}^2$ a servi pour la simulation des deux autres champs étudiés. Les faisceaux d'électrons de 9MeV de champs d'irradiation 6×6 et $20\times 20\text{cm}^2$ ont été simulés avec le code MC PENELOPE. La Figure 5 présente la comparaison des distributions de dose mesurés et simulés pour le petit champ $6\times 6\text{cm}^2$. Les résultats du test de l'index gamma sont représentés en Figure 6. Les mêmes comparaisons sont illustrées en Figures 7 et 8 pour le grand champ $20\times 20\text{cm}^2$.

Les résultats du test de l'index gamma montrent un bon accord entre les rendements en profondeur et les profils de dose mesurés et calculés pour les champs 6×6 et $20\times 20\text{cm}^2$. Il est important de préciser que dans le cas du grand faisceau, le test de l'index gamma est rejeté dans la zone des épaulements du profil de dose (à une distance latérale de 8,5cm de part et d'autre de l'axe du faisceau, Figure 8b). A ces distances présentant un fort gradient de dose, l'écart entre la mesure et la simulation ne dépasse pas tout de même 1,5mm.

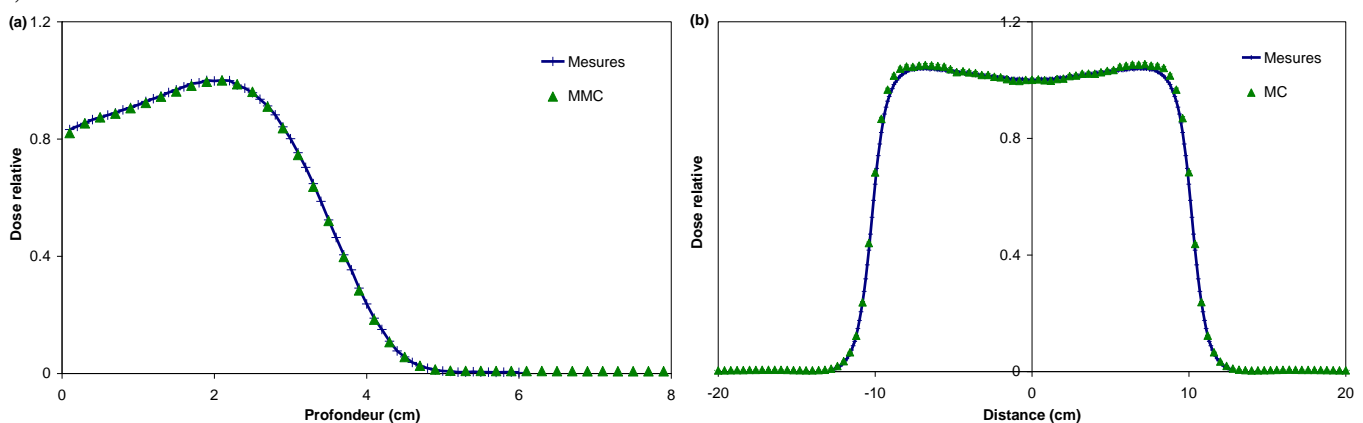


Figure 7 : Rendements en profondeur (a) et profils de dose (b) mesurés et calculés dans l'eau (champ $20\times 20\text{cm}^2$).

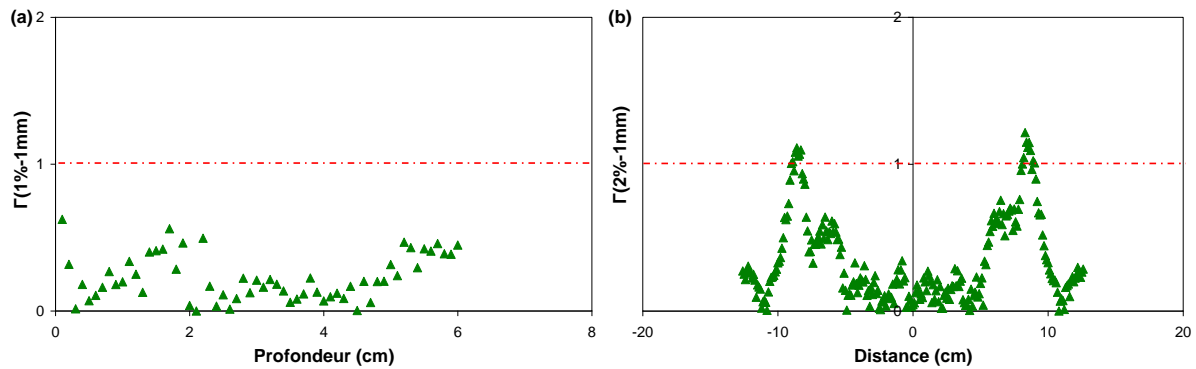


Figure 8 : Résultats du test de l'index gamma pour les rendements en profondeur (a) et les profils de dose (b) (champ $20 \times 20 \text{ cm}^2$).

Les résultats présentés en Figures 5-8 valident la modélisation géométrique ainsi que la caractérisation du faisceau initial pour les trois tailles de champs du mode électron 9MeV.

4. Conclusions

Ce papier a présenté une nouvelle méthode de représentation du spectre en énergie des électrons primaires d'un accélérateur linéaire en ajustant, par le principe des moindres carrés avec la contrainte de non-négativité, les rendements en profondeur calculés à partir de faisceaux initiaux monoénergétiques à celui mesuré. L'application de cette méthode à la caractérisation des faisceaux initiaux de l'accélérateur Primus a mis en évidence les constatations suivantes :

- Premièrement, la simplicité de mise en œuvre et la rapidité de cette méthode. En effet, cette méthode ne distingue qu'un seul degré de liberté qui prend en compte l'énergie moyenne, la distribution en énergie (incluant l'asymétrie du spectre) et la fenêtre en énergie des électrons primaires.
- Deuxièmement, la validation de cette méthode pour la détermination d'une représentation du spectre énergétique des électrons primaires pour toutes les tailles de champs. Elle permet, en effet, de déterminer la « meilleure » représentation spectrale au sens des moindres carrés si la gamme d'énergie des rendements en profondeur simulés est choisie convenablement (un nombre suffisant de faisceaux monoénergétiques simulés avec un pas en énergie suffisamment faible pour tenir compte de la sensibilité de la dose à l'énergie).

Remerciements

Les auteurs remercient la société DOSIsoft, en particulier M. E.FRANCHISSEUR, pour avoir fourni les données géométriques de l'accélérateur linéaire.

Références

- [1] Salvat F, Fernández-Varea JM, Sempau J. PENELOPE-2006, A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport. OECD ISBN 92-64-02301-1, Barcelona, Spain 2006.
- [2] Lawson CL and Hanson RJ. Solving Least Squares Problems. CIAM (15). Prentice-Hall, Englewood, New Jersey, 1974.
- [3] The MathWorks 2005. MATLAB – The language of technical computing, version 7.
- [4] International Atomic Energy Agency (IAEA). Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy. Technical Reports Series n° 398, 2000.
- [5] Venselaar J, Welleweerd H, Mijnheer B. Tolerances for the accuracy of photon beam dose calculations of treatment planning systems. Radiother. Oncol. 2001; 60: 191-201.