

# DETERMINATION AUTOMATIQUE DES PARAMETRES DU FAISCEAU D'ELECTRONS PRIMAIRES DANS LES SIMULATIONS MONTE-CARLO D'ACCELERATEURS LINEAIRES EN RADIOTHERAPIE

Delphine LAZARO<sup>1</sup>, Eric BARAT<sup>1</sup>, Thomas DAUTREMER<sup>1</sup>, Thierry MONTAGU<sup>1</sup>,  
Isabelle CHABERT<sup>1</sup>, Lucie GUERIN<sup>2</sup>, Alain BATALLA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CEA-LIST, Centre de Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette

<sup>2</sup>Service de Physique Médicale, Centre François Baclesse, 14076 Caen Cedex

## 1. Contexte et objectifs

En radiothérapie, la maîtrise de la dose délivrée lors d'un traitement est cruciale pour assurer la réussite de celui-ci. Grâce à la méthode de Monte Carlo (MC), une précision de l'ordre de 2-3% sur le calcul de dose lors de la planification du traitement est possible, à condition que le modèle MC de l'accélérateur linéaire (linac) reproduise fidèlement les caractéristiques physiques du faisceau d'irradiation. Pour cela, les paramètres décrivant les distributions spatiale et énergétique du faisceau primaire d'électrons doivent être réglés finement. La détermination de ces paramètres s'effectue généralement lors d'un processus par essai/erreur, qui consiste à modifier les valeurs de ces paramètres jusqu'à ce que les simulations reproduisent aux mieux les mesures expérimentales. Ce processus s'avère fastidieux, chronophage, et ne garantit pas que la combinaison optimale de paramètres a été retenue. De plus, le modèle du faisceau est souvent simplifié en faisant des hypothèses qui peuvent être fausses (distribution en énergie mono-énergétique, distribution spatiales symétrique). Nous présentons ici une nouvelle méthode de détermination automatique des paramètres du faisceau primaire d'électrons, qui permet d'adapter complètement le modèle aux données expérimentales.

## 2. Matériel et méthodes

La méthode développée se décompose en trois étapes principales.

### 2.1 Base de données de dose simulée

La première étape consiste à constituer une base de données comprenant des distributions de dose 3D dans une cuve à eau, calculées par simulation MC pour un linac donné et pour différents paramétrages du faisceau d'électrons. Dans cette première phase, le faisceau simulé est considéré monodirectionnel, mono-énergétique d'énergie  $E_0$  et issu d'une tâche focale circulaire de rayon  $r$ . Les valeurs de  $E_0$  et  $r$  sont choisies suivant un plan d'expériences numériques prédéfini de type hypercube latin ou factoriel. Un champ de 30x30 cm<sup>2</sup> a été simulé en raison de sa plus grande sensibilité aux variations de  $E_0$  et  $r$ . La méthode d'ajustement automatique est ensuite basée sur 2 phases distinctes.

### 2.2 Meta-modèle

On établit d'abord un modèle continu « 5D » de la dose (3 dimensions spatiales, énergie  $E_0$  et rayon  $r$ ), obtenu par une technique de régression non paramétrique similaire à celle proposée dans [1], mais étendue notamment aux variables  $E_0$  et  $r$  dont on cherche la distribution. L'objectif de ce modèle continu est de calculer rapidement la valeur de dose en un point quelconque de la cuve, pour des valeurs quelconques de  $E_0$  et  $r$ , éventuellement

situées en dehors de la grille de paramètres initialement proposée pour le calcul de la base de données. L'algorithme permet également de débruiter la dose 3D.

### 2.3 Résolution du problème inverse

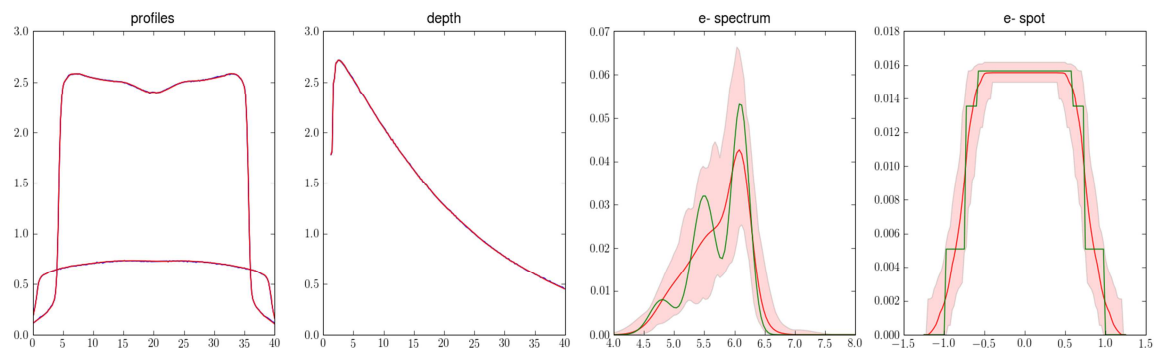
Il faut ensuite résoudre le problème inverse, i.e. déterminer la distribution en énergie et rayon de la source permettant d'ajuster au mieux les données expérimentales. Celles-ci se composent de profils de dose latéraux et de rendements en profondeur, mesurés dans une cuve à eau à l'aide d'une chambre d'ionisation. Il s'agit d'un problème inverse *sévèrement mal posé* car l'inversion de la réponse pour des mesures très proches peut donner lieu à des estimations de paramètres très différents. Cette situation requiert une *régularisation* obtenue ici par une approche bayésienne. Par ailleurs, nous suggérons un modèle non paramétrique de source afin de conserver une grande flexibilité sur la nature du spectre en énergie. Le modèle résultant proposé (dit bayésien non-paramétrique) est *un mélange par processus de Dirichlet* (MDP) [2] qui peut être vu comme une somme potentiellement infinie de composantes, chacune étant constituée d'une source de rayon  $r_i$  et d'un spectre de forme gaussienne (de moyenne  $E_i$  et d'écart-type  $\sigma_i$ ). La régularisation induite par la modélisation bayésienne revêt deux aspects. Le modèle MDP apporte simultanément un *a priori* de douceur sur le spectre ainsi qu'un effet de parcimonie en tempérant le nombre de composantes gaussiennes.

La procédure d'inférence suit une approche MC par Chaîne de Markov (MCMC) et permet de reconstruire la distribution statistique de la distribution du faisceau d'électrons en énergie et rayon et donne ainsi accès aux *intervalles crédibles*. Cette caractérisation de l'incertitude, sur le spectre estimé comme sur la dose reconstruite, nous semble appropriée vu la nature mal posée du problème. Dans cette étape de la méthode, le modèle continu permet donc d'évaluer rapidement et avec la précision de la simulation MC la réponse en dose 3D pour toute énergie et rayon du processus de Dirichlet au cours des itérations MCMC.

## 3. Résultats et conclusions

### 3.1 Evaluation sur données synthétiques

Les performances de la méthode d'ajustement automatique ont été d'abord évaluées en générant des profils et rendements synthétiques à partir du modèle continu issu des simulations MC et pour un choix de paramètres de sources donné, auxquels nous ajoutons du bruit gaussien d'observation (cf Figure 1).



**Figure 1** : Distributions d'énergie et de rayon du faisceau reconstruites à partir de données synthétiques. De gauche à droite : profils observés (bleu) et reconstruits (rouge) à  $z=5$  cm et 30 cm; rendement en profondeur observé (bleu) et reconstruit (rouge); spectre du faisceau (vert: référence, rouge: estimée, rose: intervalle crédible 95%); tâche focale du faisceau (vert: référence, rouge: estimée, rose: intervalle crédible 95%).

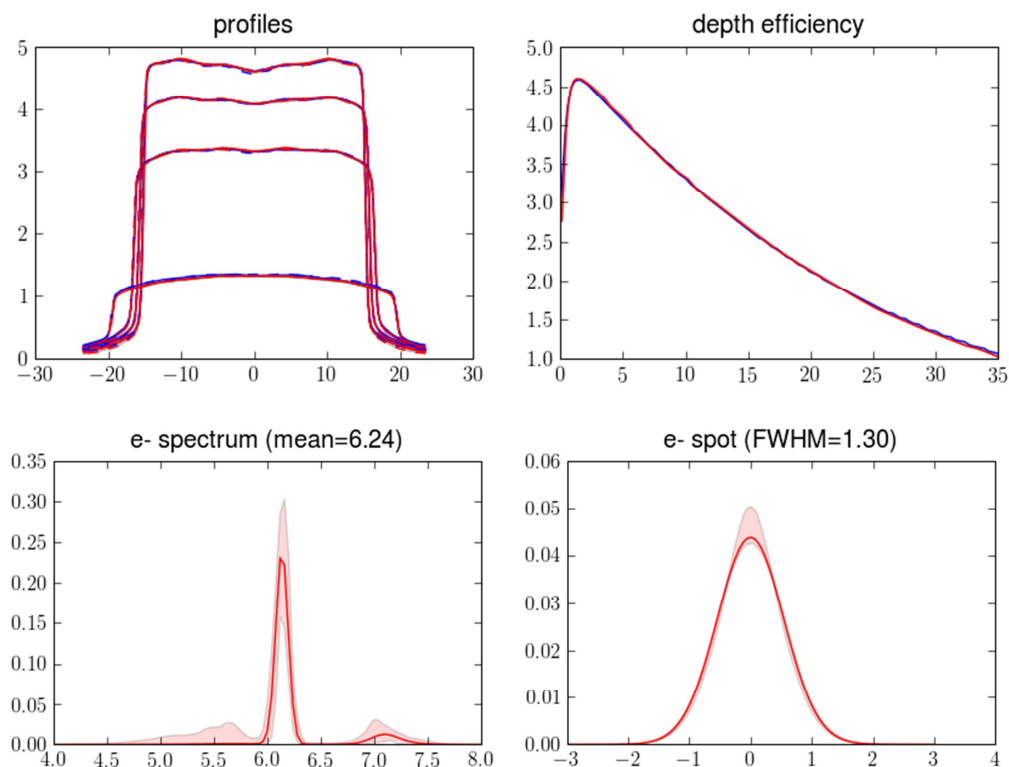
Cette situation est idéalisée dans la mesure où elle est exempte d'erreurs de modélisation. La Figure 1 montre que la méthode développée permet de reconstruire un spectre poly-énergétique (en rouge) de forme équivalente à celui considéré pour générer les données synthétiques (en vert). On reconstruit également une distribution spatiale pour le faisceau. Les intervalles 95% (en rose) couvrent les paramètres de référence mais montrent aussi que le problème inverse permet de déterminer plusieurs combinaisons énergie/tâche focale possibles, soulignant ainsi la nature sévèrement mal posée du problème.

### 3.2 Evaluation sur données synthétiques

La méthode a ensuite été appliquée à la recherche des paramètres du modèle MC d'un linac ARTISTE (Siemens) et d'un linac SYNERGY (Elekta) à 6 MV.

Pour l'ARTISTE, elle permet de déduire une énergie moyenne du faisceau d'électrons de 6,25 MeV et un rayon de la tâche focale de 1 mm, en accord avec les valeurs préconisées par le constructeur. Ainsi paramétré, le modèle MC du linac conduit à un très bon accord des profils de dose et des rendements en profondeur simulés avec les mesures expérimentales (gamma-index de 2%/2 mm et 1% pour les profils et les rendements en profondeur, respectivement). Cependant, les imperfections de reconstruction mettent ici en évidence l'importance d'une modélisation fine du linac ainsi que du dispositif de mesure et notamment la géométrie de la chambre d'ionisation.

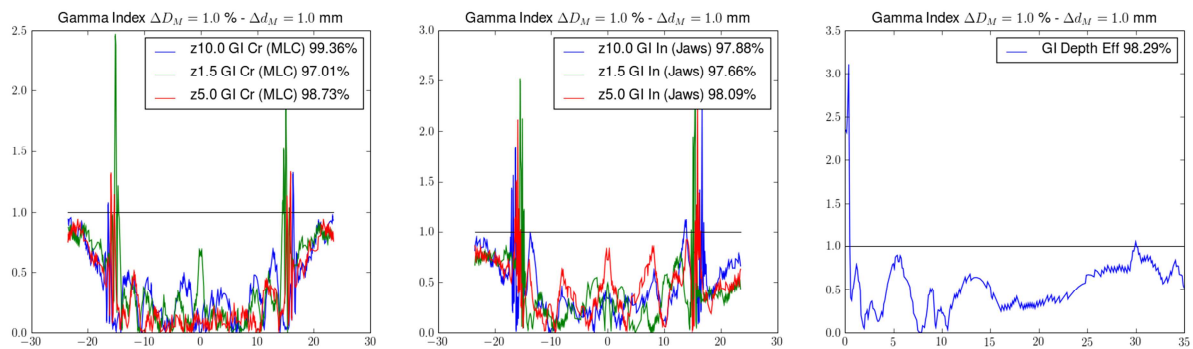
La Figure 2 présente les résultats obtenus pour le linac SYNERGY.



**Figure 2** : Distributions d'énergie et de rayon du faisceau reconstruites à partir de données expérimentales issues du linac SYNERGY. De gauche à droite : profils mesurés (bleu) et reconstruits (rouge) à  $z=5$  cm et 30 cm; rendement en profondeur mesuré (bleu) et reconstruit (rouge); spectre du faisceau (rouge: estimé, rose: intervalle crédible 95%); tâche focale du faisceau (rouge: estimée, rose: intervalle crédible 95%).

On reconstruit un spectre en énergie ayant une énergie moyenne de 6,24 MeV et un rayon de tâche focale de 1,3 mm. Ces données sont elles aussi en très bon accord avec les valeurs préconisées par le constructeur.

Afin d'évaluer la pertinence des paramètres de faisceau estimés, le spectre bivarié (énergie-rayon de tâche focale) a été réinjecté en entrée d'un calcul de dose par simulation MC. La dose simulée obtenue a ensuite été débruitée par la technique décrite en [1], puis un calcul de gamma-index a été effectué sur les profils latéraux et rendements en profondeur (1%/1mm et 1% respectivement) utilisés pour estimer les caractéristiques du spectre d'électrons. Nous présentons les résultats en Figure 3 pour des profils situés à des profondeurs 15, 50 et 100 mm ainsi que pour le rendement en profondeur dans l'axe. Tous les gamma-index sont supérieurs à 97%.



**Figure 3** : Gamma-Index calculés à partir de données expérimentales issues du linac SYNERGY et de la dose calculée par simulation MC puis débruitée pour les paramètres de faisceau estimés. De gauche à droite : gamma-Index pour les profils dans les directions crossline et inline ( $z=1,5, 5$  et  $10$  cm) et rendement en profondeur suivant l'axe.

La sensibilité de la méthode ainsi que sa robustesse au bruit de simulation et d'observation sont actuellement testées sur des données expérimentales provenant de deux linac SYNERGY différents.

## Références

- [1] Lazaro D L *et al* 2013 Denoising techniques combined to Monte Carlo simulations for the prediction of high resolution portal images in radiotherapy treatment verification, *Phys. Med. Biol.* **58** 3433–3459.
- [2] Hjort N L *et al* 2010 Bayesian Nonparametrics (Cambridge Series in Statistical and Probabilistic Mathematics) (New York: Cambridge University Press)