Simulation Monte Carlo pour la réalisation d'un étalon primaire de la dose absorbée dans l'eau pour des faisceaux d'électrons

S. VÖRÖS¹, G. STUCKI¹

(Manuscrit reçu le 14 mai 2007, accepté le 21 septembre 2007)

RÉSUMÉ METAS réalise l'étalon primaire de la dose absorbée dans l'eau pour les faisceaux d'électrons de haute énergie entre 5 MeV et 22 MeV avec un dosimètre chimique basé sur une solution de Fricke. Cette réalisation comprend deux étapes. Tout d'abord, une expérience d'absorption totale d'un faisceau monoénergétique étroit d'énergie et de charge connues permet de déterminer la réponse de la solution de Fricke à la dose absorbée. Ensuite, l'irradiation de sachets de solution dans des faisceaux de qualités thérapeutiques assure le raccordement métrologique des étalons secondaires. Certaines corrections appliquées aux valeurs mesurées sont obtenues à l'aide de simulations Monte Carlo. Les pertes dues principalement à l'émission de Bremsstrahlung lors de l'expérience d'absorption totale dépendent de l'énergie des électrons et de la taille du récipient de solution de Fricke, et sont comprises entre 2,7 % et 8,2 % de l'énergie du faisceau incident. Les facteurs de transfert pour obtenir la dose absorbée dans l'eau à partir des mesures des sachets varient faiblement avec l'énergie entre 0,58 % et 0,80 %.

ABSTRACT Monte Carlo simulation for the realization of a primary standard for the absorbed dose to water for electron beams.

The METAS absorbed dose to water primary standard for high-energy electron beams between 5 MeV and 22 MeV is based on a chemical Fricke dosimeter. Two steps are required for its realization. First, a monoenergetic electron beam of known particle energy and beam charge is totally absorbed in a Fricke solution, allowing the determination of the response of the Fricke dosimeter. Then, some small bags filled with Fricke solution are irradiated in clinical quality beams for the calibration of the secondary standards. Some corrections applied to the measured values are obtained by Monte Carlo simulation. The amount of energy escaping the total absorption vessel, mainly due to Bremsstrahlung, depends on the electrons energy and on the size of the vessel, and varies from 2.7% to 8.2% of the incident beam energy. The transfer factors yielding the absorbed dose to water from the bag measurements vary slightly with energy between 0.58% and 0.80%.

Keywords: Monte Carlo simulation / primary standard / Fricke dosimeter / absorbed dose / electron beam

¹ Office fédéral de métrologie METAS, Lindenweg 50, 3003 Berne-Wabern, Suisse.

1. Introduction

Développé entre 1995 et 2002, le dosimètre chimique de METAS est devenu dès 2002 l'étalon primaire en Suisse pour l'étalonnage des dosimètres de référence des hôpitaux pour les faisceaux d'électrons de haute énergie (Stucki *et al.*, 2002). La réalisation de l'unité de dose absorbée dans l'eau par cette méthode fait appel à des facteurs de correction qui peuvent être déterminés grâce à des simulations Monte Carlo du montage expérimental.

Pour commencer, la réalisation expérimentale de cet étalon primaire sera présentée, puis dans une deuxième étape les simulations Monte Carlo correspondantes seront décrites.

2. La réalisation expérimentale de l'étalon primaire

Les mesures sont réalisées avec un accélérateur d'électrons de type Microtron M22 de la firme Scanditronix. Il délivre des faisceaux d'énergies entre 5,3 MeV et 22,4 MeV, réglables par pas d'environ 0,5 MeV, sous forme d'impulsions d'une durée de 3,3 μ s. Les spectres d'énergie obtenus ont typiquement des profils gaussiens de largeur à mi-hauteur 25 keV, et le profil spatial transverse du faisceau est gaussien avec une largeur de l'ordre de 0,3 cm, indépendamment de l'énergie sélectionnée. Ces valeurs ont été mesurées directement à l'aide d'un spectromètre magnétique à la sortie du tube du faisceau.

Deux types de mesures sont nécessaires à la réalisation de cet étalon. Tous d'abord, une expérience d'absorption totale du faisceau étroit délivré par l'accélérateur dans un récipient en quartz contenant une solution de Fricke servira à déterminer la réponse de celle-ci à la dose absorbée (Fig. 1). Les récipients de quartz ont la forme de deux cylindriques coaxiaux, le volume central contenant la solution de Fricke, et dans le cylindre périphérique, de l'eau à 25 °C circule afin de garantir la stabilité de la température. La taille de ces récipients augmente avec l'énergie du faisceau afin de pouvoir contenir l'ensemble de la gerbe de particules produite. Leur axe de symétrie est placé le long de l'axe du faisceau, et le cylindre contenant la solution est fermé par une membrane de polyéthylène de 50 μ m d'épaisseur. Un mélangeur magnétique assure l'homogénéité de la solution tout au long de l'irradiation, et les impulsions de l'accélérateur sont cadencées à 1 Hz seulement afin d'éviter d'avoir des doses localement élevées dans la solution.

Une tête d'irradiation fournissant des faisceaux de qualités cliniques sera ensuite utilisée pour raccorder les étalons secondaires à l'étalon primaire. Ces mesures sont réalisées dans un fantôme en Plexiglas rempli d'eau de 60 $\times$ 60 $\times$ 60 cm³ placé devant la tête d'irradiation, dans lequel le faisceau pénètre

Figure 1 – Le récipient en quartz contenant la solution de Fricke installé à la sortie du tube du faisceau.

The quartz vessel containing the Fricke solution is mounted at the exit of the beam pipe.

par une fenêtre en polystyrène de 0,26 cm d'épaisseur (Fig. 2). La distance entre la cible de la tête d'irradiation et la surface du fantôme (distance source-surface) est de 100 cm et les collimateurs sont réglés de façon à avoir un champ de $15 \times 15 \text{ cm}^2$ à cette distance. Ces paramètres sont choisis en conformité avec les recommandations de la SSRPM (2002).

2.1. L'expérience d'absorption totale

Le dosimètre chimique utilise une solution de Fricke (sulfate d'ammonium ferreux) dont la réponse à l'absorption d'une dose donnée est déterminée grâce à une expérience d'absorption totale. Celle-ci est réalisée en utilisant un faisceau d'électrons monoénergétique dont l'énergie E_{el} (J) est mesurée avec un spectromètre magnétique, et le nombre d'électrons incidents N avec un moniteur de charge. Il s'agit d'une expérience similaire à celle décrite dans (Feist, 1982) mais étendue à des énergies entre 5,3 MeV et 22,4 MeV. Ainsi la dose absorbée

Figure 2 – La tête d'irradiation pour faisceaux de qualités cliniques et le fantôme d'eau.
The treatment head for clinical beam qualities and the water phantom.

dans le récipient contenant la solution de Fricke D_F peut être calculée par

$$D_F = \frac{E_{abs}}{m} \quad (1)$$

où E_{abs} (J) est l'énergie absorbée dans la solution et m (kg) la masse de la solution, avec

$$E_{abs} = E_{el} N f_p \quad (2)$$

où f_p est un facteur de correction pour la fraction de l'énergie incidente qui n'est **pas** déposée dans la solution. Cela inclut les pertes dues à l'émission de Bremsstrahlung, la diffusion et l'absorption à l'extérieur du récipient. Ce facteur f_p sera déterminé par simulation Monte Carlo.

L'absorption de rayonnements ionisants par la solution de Fricke oxyde les ions ferreux Fe^{2+} en ions ferriques Fe^{3+} , le rendement de la réaction étant proportionnel à la dose absorbée :

$$D_F = \frac{\Delta M}{G \rho} \quad (3)$$

où ΔM (mol/m³) est la concentration de ions ferreux ayant réagi, G (mol/J) le rendement radiochimique du Fe^{3+} de la solution, et ρ (kg/m³) la densité de la

solution. ΔM est déterminée à partir de la différence de densité optique ΔA entre un échantillon de solution irradié et un échantillon non-irradié, mesurée avec un photomètre ultraviolet à une longueur d'onde $\lambda = 304$ nm. La densité optique est donnée par

$$A \equiv \log_{10}(I_0/I) \quad (4)$$

où I_0 est l'intensité lumineuse incidente sur l'échantillon et I l'intensité transmise. La loi de Beer-Lambert

$$A = \varepsilon(\lambda) l M \quad (5)$$

où $\varepsilon(\lambda)$ (m^2/mol) est le coefficient d'extinction molaire à la longueur d'onde λ (m) et l (m) la largeur de la cuvette de solution traversée par le rayonnement, permet d'écrire l'équation (3) comme

$$D_F = \frac{\Delta A}{\varepsilon G \rho l} \quad (6)$$

où ε est la différence d'absorptivité molaire du Fe^{3+} et du Fe^{2+} à $\lambda = 304$ nm.

Les équations (1) et (6) constituent deux mesures indépendantes de la dose absorbée dans le récipient, et en les combinant on obtient le coefficient d'étalonnage de la solution

$$\varepsilon G = \frac{\Delta A_T}{\rho l_T} \frac{m}{E_{el} N f_p} \quad (7)$$

où l'on a utilisé l'équation (2) pour E_{abs} . L'indice T indique des grandeurs déterminées dans le cadre de l'expérience d'absorption totale.

Les résultats des mesures indiquent que εG est indépendant de l'énergie du faisceau d'électrons incident dans la plage d'énergies considérée ici et dans la limite des incertitudes de mesure. Cette propriété est essentielle pour la réalisation de l'unité de dose à l'aide de ce dosimètre chimique.

2.2. Détermination de la dose absorbée dans l'eau à z_{ref}

Le raccordement métrologique d'un étalon secondaire (par exemple des chambres d'ionisation planes de type NACP 02) à l'étalon primaire est réalisé en le mesurant dans un faisceau de qualité clinique en alternance avec un sachet de polyéthylène de 3 mm d'épaisseur rempli de solution de Fricke (Fig. 3) à une profondeur de

$$z_{ref} = 0,6 R_{50} - 0,1 \text{ (g/cm}^2\text{)} \quad (8)$$

où R_{50} (g/cm^2) est la profondeur dans le fantôme d'eau à laquelle le débit de dose est égal à 50 % de sa valeur maximale. Les valeurs de R_{50} réalisées à METAS sont entre 1,75 g/cm^2 et 8,54 g/cm^2 .

Figure 3 – La chambre d'ionisation NACP 02 et le sachet de solution de Fricke, d'abord isolés, puis dans leurs supports en Plexiglas.

The NACP 02 ionization chamber and the small bag filled with Fricke solution, once isolated and once mounted in their PMMA sleeves.

La dose D_S absorbée dans la solution de Fricke du sachet est donnée par l'équation (6) après avoir mesuré ΔA_S à l'aide du photomètre UV. Afin de déterminer la dose absorbée dans l'eau D_e , il faut introduire un facteur de transfert $f_{e/F}$ qui est le rapport de la dose absorbée à z_{ref} dans un fantôme d'eau pure (sans autre matériau sur le trajet du faisceau) et de la dose absorbée dans la solution de Fricke du sachet de polyéthylène monté dans son support en Plexiglas :

$$D_e = D_F f_{e/F} = \frac{\Delta A_S}{\epsilon G \rho l_S} f_{e/F} \quad (9)$$

où l'indice S indique des grandeurs déterminées dans le cadre de la mesure du sachet. Ce facteur de transfert $f_{e/F}$ sera calculé avec une simulation Monte Carlo.

L'indépendance en énergie de ϵG permet de substituer l'équation (7) dans l'équation (9). En effet à z_{ref} les particules ne sont plus monoénergétiques, et une

dépendance en énergie de εG interdirait cette substitution. On obtient

$$D_e = \frac{\Delta A_S l_T E_{el} N}{\Delta A_T l_S m} f_p f_{e/F}. \quad (10)$$

Le coefficient d'étalonnage $N_{D,e,Q}$ (Gy/C) de la chambre d'ionisation pour la dose absorbée dans l'eau pour une qualité de faisceau Q (caractérisée par la valeur de R_{50}) est défini par la relation

$$D_e = N_{D,e,Q} M_Q \quad (11)$$

où M_Q (C) est la valeur indiquée par l'électromètre auquel la chambre d'ionisation est reliée, corrigée pour tenir compte de la densité de l'air, des pertes par recombinaison de charges, etc. En combinant les équations (10) et (11) on obtient pour le coefficient d'étalonnage de l'étalon secondaire

$$N_{D,e,Q} = \frac{\Delta A_S l_T}{\Delta A_T l_S M_Q} \frac{1}{m} \frac{E_{el} N}{f_p f_{e/F}}. \quad (12)$$

Ce résultat permet d'étalonner les dosimètres utilisés par les hôpitaux en dose absorbée dans l'eau, en les mesurant en parallèle avec cet étalon secondaire.

3. Simulation Monte Carlo pour l'expérience d'absorption totale

Il s'agit ici de déterminer le facteur de correction f_p (voir Éq. (2)) en calculant la fraction de l'énergie incidente du faisceau qui n'est **pas** absorbée dans le récipient contenant la solution de Fricke. La géométrie du récipient est décrite à l'aide de cylindres coaxiaux, et les caractéristiques du faisceau incident (spectre énergétique et profil transversal) sont paramétrées avec 2 distributions normales de largeurs inspirées des mesures effectuées dans le laboratoire (voir plus haut).

Le programme de simulation EGSnrc (Kawrakov et Rogers, 2000) a été utilisé pour réaliser ces calculs, et tous les processus électromagnétiques importants ont été simulés (avec effets de spin pour diffusion élastique, section efficace de Bremsstrahlung de Bethe-Heitler, relaxation atomique, diffusion Compton liée). À titre de comparaison, la même simulation a été réalisée avec le programme Geant4 version 6.2 (Geant4, 2003) avec trois modèles différents : « standard », « basse énergie » et « Pénélope ». L'accord entre ces différents modèles est assez bon (mieux que 0,2 % sur les valeurs de f_p), à l'exception de Geant4 « standard » (qui n'est pas optimal pour le domaine de la dosimétrie) qui sous-estime clairement l'énergie perdue hors du récipient. Cet écart de 0,2 %, supérieur aux incertitudes statistiques indiquées dans le tableau I, donne une estimation de l'incertitude liée aux modèles utilisés par la simulation.

TABLEAU I

Facteurs de correction pour les pertes hors du récipient de solution de Fricke. Le code utilisé est EGSnrc. Les incertitudes ne comprennent que la statistique de la simulation.

Correction factors for the energy lost outside the Fricke quartz vessel. The EGSnrc simulation program is used. Uncertainties are only statistical.

Énergie du faisceau (MeV)	Taille du récipient (cm ³)	$1 - f_p$
5,33	90,5	$0,02712 \pm 0,00002$
5,87	90,5	$0,02865 \pm 0,00002$
6,39	1268	$0,02571 \pm 0,00002$
10,10	1268	$0,03810 \pm 0,00003$
11,68	1268	$0,04417 \pm 0,00003$
14,86	1973	$0,05203 \pm 0,00003$
18,03	1973	$0,06421 \pm 0,00004$
19,62	1973	$0,07062 \pm 0,00004$
22,28	1973	$0,08164 \pm 0,00004$

Le tableau I et la figure 4 présentent les résultats obtenus avec EGSnrc. Les incertitudes indiquées ne comprennent que l'incertitude statistique de la simulation. La fraction de l'énergie non absorbée dans le récipient augmente avec l'énergie des électrons incidents de 2,7 % à 8,2 %. La figure 4 montre également la contribution des différents processus aux pertes totales. Clairement, les photons produits par Bremsstrahlung dans le récipient et qui parviennent à s'en échapper constituent les plus fortes pertes, surtout aux énergies les plus élevées. Les « sauts » après 6 MeV et après 12 MeV sont dus aux changements de la taille du récipient, les pertes étant moins importantes dans un récipient de taille supérieure.

4. Simulation Monte Carlo pour la détermination de la dose absorbée dans l'eau à z_{ref}

Le facteur de transfert $f_{e/F}$ introduit dans l'équation (9) s'obtient en calculant le rapport de la dose absorbée dans le liquide contenu dans le sachet placé à z_{ref} dans deux situations différentes : avec les matériaux originaux de l'expérience (solution de Fricke dans le sachet en polyéthylène placé dans un support rigide en Plexiglas), puis avec tous ces matériaux remplacés par de l'eau pure comme celle qui remplit le reste du fantôme.

Une simulation complète de la tête d'irradiation de l'accélérateur a été faite pour 10 énergies différentes. La cible principale ainsi que le filtre varient d'une énergie à l'autre, et la position des collimateurs peut également changer légèrement. Le programme BEAMnrc a été utilisé pour les calculs. Cette simulation permet d'obtenir des fichiers d'espace de phase contenant tous les paramètres des particules sortant de la tête d'irradiation (voir Fig. 5).

Figure 4 – Fraction de l'énergie du faisceau incident qui n'est pas absorbée dans le récipient de solution de Fricke (points noirs). La contribution des différents processus est également indiquée. Les lignes pointillées verticales indiquent les énergies à partir desquelles un récipient de taille supérieure est utilisé.

Fraction of the incident beam energy escaping the Fricke quartz vessel (black dots). Different processes contribute to the total losses and are indicated as different dashed areas. Vertical dotted lines indicate the energies at which the size of the vessel was changed.

Dans une deuxième étape, les particules ainsi obtenues sont utilisées pour la simulation du sachet dans le fantôme d'eau placé devant la tête d'irradiation. Le tableau II montre les facteurs de transfert $f_{e/F}$ obtenus dans cette simulation. Les perturbations induites par la présence de ces matériaux dépendent faiblement de l'énergie et s'élèvent de 0,58 % à 0,80 %.

5. Conclusion

Un étalon primaire pour la dose absorbée dans l'eau pour des faisceaux d'électrons entre 5 MeV et 22 MeV est utilisé au METAS depuis 2002. Il est basé sur un

Figure 5 – Distribution spectrale de la fluence par électron produite par la tête d'irradiation pour un faisceau incident de 5,33 MeV à une distance de 100 cm en aval de la cible. La courbe supérieure comprend toutes les particules issues de la tête d'irradiation. Elle est composée des 2 spectres intitulés « tous les électrons » et « photons », et le spectre des électrons comprend lui-même les « électrons primaires » (provenant du faisceau incident) et les « électrons secondaires » (issus de l'interaction des photons dans la tête d'irradiation).

Spectral fluence distribution per electron escaping the treatment head for a 5.33 MeV incident beam at SSD = 100 cm. The upper curve is for all particles together. It consists of the two spectra labelled "all electrons" and "photons", the electron spectrum itself comprising the "primary electrons" (coming from the incident beam) and the "secondary electrons" (from photon interaction in the treatment head).

dosimètre chimique contenant une solution de Fricke. Deux étapes différentes de sa réalisation exigent l'introduction de facteurs de correction qui peuvent être calculés par simulation Monte Carlo.

Une expérience d'absorption totale dans un récipient rempli de solution de Fricke permet de connaître le rendement radiochimique de celle-ci, après correction des pertes dues principalement à l'émission de Bremsstrahlung par

TABLEAU II

Facteurs de transfert pour exprimer la dose absorbée dans l'eau à partir de la dose mesurée dans un sachet de solution de Fricke. Les incertitudes ne comprennent que la statistique de la simulation.

Transfer factors to express the absorbed dose to water starting from the absorbed dose in a small bag filled with Fricke solution. The uncertainties are statistical only.

Énergie du faisceau (MeV)	R_{50} (g/cm ²)	$f_{e/F} - 1$
5,33	1,75	0,0080 ± 0,0003
5,87	1,95	0,0077 ± 0,0003
7,45	2,62	0,0070 ± 0,0003
9,03	3,31	0,0067 ± 0,0004
10,10	3,70	0,0065 ± 0,0004
11,68	4,35	0,0063 ± 0,0004
14,86	5,67	0,0058 ± 0,0004
18,03	6,90	0,0062 ± 0,0004
19,62	7,52	0,0060 ± 0,0004
22,28	8,54	0,0058 ± 0,0004

Monte Carlo. Ces pertes augmentent avec l'énergie du faisceau incident de 2,7 % à 8,2 %. Il s'avère que ce rendement radiochimique est indépendant de l'énergie des électrons incidents dans la plage d'énergies considérée et dans la limite des incertitudes de mesure.

Le raccordement métrologique d'étalons secondaires à cet étalon primaire implique une mesure de la dose absorbée dans l'eau à une profondeur $z_{ref} = 0,6 R_{50} - 0,1$ g/cm², R_{50} variant entre 1,75 g/cm² et 8,54 g/cm² suivant l'énergie du faisceau. Cette mesure exige la connaissance de facteurs de transfert $f_{e/F}$ qui donnent la valeur de la dose absorbée dans l'eau à partir de la dose absorbée dans un sachet de solution de Fricke placé dans un support en Plexiglas. Ces facteurs dépendent faiblement de l'énergie des électrons du faisceau incident et ont des valeurs comprises entre 0,58 % et 0,80 %.

RÉFÉRENCES

- Feist H. (1982) Determination of absorbed dose to water for high energy photons and electrons by total absorption of electrons in ferrous sulphate solution, *Phys. Med. Biol.* **37**, 1937–1947.
- Geant4 (2003) Physics Reference Manual.
- Kawrakow I., Rogers D.W.O. (2000) The EGSnrc Code System: Monte Carlo simulation of electron and photon transport, *Technical Report PIRS-701*, National Research Council of Canada, Ottawa, Canada.
- SSRPM (2002) Société Suisse de Radiobiologie et de Physique Médicale Dosimétrie des faisceaux d'électrons de haute énergie à l'aide de chambres d'ionisation ; <http://www.sgsm.ch/r10hie-f.pdf>.
- Stucki G., Muench W., Quintel H. (2002) The METAS Absorbed Dose to Water Calibration Service for High Energy Photon and Electron Beam Dosimetry, in *Standards and Codes of Practice in Medical Radiation Dosimetry* (Proc. International Symposium IAEA, Vienna).