RÉFÉRENCES NATIONALES EN DOSIMÉTRIE PHOTONIQUE

J.P. GUIHO*

(Manuscrit reçu le 11 mai 1971)

Dans tous les domaines, il est nécessaire, pour la science moderne, de pouvoir effectuer des mesures de plus en plus précises. Déjà, à la fin du siècle dernier, des références primaires des unités fondamentales ont été élaborées.

La métrologie de la radioactivité qui possède trois unités spéciales dérivées du système international ne possède pas de référence. Cette absence de référence, qui n'était pas préjudiciable tant que les domaines concernés en étaient au stade qualitatif ou semi-quantitatif, peut être considérée aujourd'hui comme une carence.

Ces considérations générales s'appliquent en particulier à la dosimétrie photonique. Nous n'en voulons pour preuve que les problèmes qui se posent en téléthérapie médicale, où, compte tenu de la relation quantitative très stricte qui existe entre l'effet biologique et la dose reçue, des radiobiologistes et des radiothérapeutes estiment qu'en l'état actuel des connaissances une reproductibilité inférieure à 1 % et une exactitude meilleure que 3 % sont nécessaires.

On voit donc qu'il devient important de définir des références dans le domaine dosimétrique. Ces références devront par ailleurs permettre :

- de relier entre elles les intercomparaisons nationales et internationales,
- l'étalonnage de références secondaires,
- l'étude et la comparaison de diverses techniques de mesure.

Nous disposons de trois grandeurs usuelles pour définir un champ de photons :

- la fluence énergétique,
- l'exposition,
- la dose absorbée.

Il est naturellement souhaitable de tenir compte de ces diverses façons de décrire un champ de radiations dans notre tentative d'élaboration d'un système cohérent de références.

Arrivé à ce point, on peut s'interroger sur les critères de définition d'un étalon. A notre connaissance il n'existe pas de concept officiel; on peut toutefois admettre qu'il doit :

- être immuable, directement comparable,

* Laboratoire de métrologie des rayonnements ionisants, Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay, B.P. n° 2, 91-Gif-sur-Yvette.

— constituer une référence de base non discutable dans l'état présent des connaissances scientifiques et techniques.

Nous disons donc qu'il doit satisfaire aux trois critères suivants :

- immuabilité ou, pour le moins, une certaine pérennité satisfaisante à l'échelle humaine,
- universalité,
- exactitude.

A partir des contraintes que nous venons de définir, que pouvons-nous envisager comme références ? A notre sens, elles sont de deux types possibles :

1^{re} hypothèse : les références sont des détecteurs appropriés ;

2^e hypothèse : les références sont des faisceaux de photons.

Nous allons analyser les implications de chacune de ces deux hypothèses.

LA PREMIÈRE HYPOTHÈSE ENTRAÎNE :

- la réalisation d'un jeu d'étalons couvrant chacun un domaine défini d'énergie ;
- la réalisation de détecteurs correspondant respectivement à l'une des grandeurs physiques permettant de décrire un champ de radiations ;
- la nécessité de définir des conditions très strictes quant à l'emploi de ces détecteurs de référence — par crainte, par exemple, d'un éventuel défaut de linéarité en fonction de l'énergie — et de disposer par ailleurs de méthodes physiques pour vérifier les qualités de fidélité et de reproductibilité de ces détecteurs dans le temps.

LA SECONDE HYPOTHÈSE : Les références sont des faisceaux.

Dans ce cas, la 2^e condition de l'hypothèse précédente — à savoir une référence par grandeur dosimétrique — n'apparaît plus, puisque les faisceaux seront caractérisés par toutes les grandeurs dosimétriques adéquates.

Il nous reste donc comme conditions :

- d'avoir des faisceaux répartis en énergie,
- de connaître la loi de variation de ces faisceaux s'ils ne sont pas immuables.

Cette dernière condition milite, comme sources de rayonnement, en faveur du choix de sources radioactives, dont la loi d'évolution en fonction du temps est bien connue.

En analysant les deux hypothèses de départ en fonction des contraintes imposées et des critères de choix retenus, nous aboutissons aux conclusions suivantes :

Si du point de vue de l'*universalité* les deux hypothèses sont comparables, il n'en est pas de même du point de vue de la *pérennité* ; en effet, si l'évolution dans le temps d'une source radioactive suit des lois bien définies, on ne peut pas en dire autant d'un instrument de mesure.

Toute démarche scientifique doit conduire à minimiser les erreurs systématiques. A cet égard, l'emploi d'un faisceau comme référence est très favorable,

car il permet de mettre en œuvre des techniques concurrentielles pour atteindre une même grandeur, alors qu'un instrument ne peut donner que son exactitude propre entachée bien évidemment des erreurs systématiques que l'on cherche précisément à éliminer.

Enfin d'un point de vue *évolutif* les faisceaux sont intéressants car, tout en demeurant stables, la description qui en est faite, à un moment donné, évoluera en fonction de l'amélioration des techniques qui servent à les caractériser et ainsi on pourra suivre dans le temps l'évolution de ces techniques.

Par ailleurs, chaque faisceau étant caractérisé par chacune des trois grandeurs propres à définir un champ de photons, remarquons que ce système de références permet d'établir des relations entre les diverses façons de décrire un même phénomène physique. Nous tentons de résumer les possibilités qui nous sont ainsi offertes sur le diagramme de la figure 1.

FIG. 1. — Techniques de mesure et grandeurs caractérisant un faisceau de photons.

Sur ce diagramme, les relations en trait plein symbolisent les relations directes ou primaires, entre la technique utilisée et la grandeur cherchée; les relations en trait pointillé symbolisent les relations indirectes, qui peuvent être biunivoques entre une technique et une grandeur.

Dans un premier stade, en raison de la diversité des applications, trois faisceaux d'énergies différentes ont été retenus :

^{241}Am	$E_\gamma \approx 60 \text{ keV.}$	$T_{1/2} \approx 460 \text{ ans}$
^{137}Cs	$E_\gamma \approx 660 \text{ keV.}$	$T_{1/2} \approx 30 \text{ ans}$
^{60}Co	$E_\gamma \approx 1,25 \text{ MeV.}$	$T_{1/2} \approx 5,26 \text{ ans.}$

Le cobalt 60 a été retenu, quoique sa période soit relativement courte, en raison de son importance, particulièrement en radiothérapie.

Abordons maintenant le deuxième volet de cet exposé en décrivant les faisceaux de référence cobalt 60 et césium 137.

Lorsqu'un faisceau de photons traverse un milieu matériel, il est modifié par les interactions que subit une partie des photons qui le composent. Ces interactions dégradent son spectre énergétique. Il faut naturellement chercher à minimiser cette déformation spectrale en choisissant d'une façon judicieuse les caractéristiques des sources et du collimateur. En fait, les paramètres géométriques de ces deux éléments déterminent la forme et la qualité des faisceaux.

Le rôle du collimateur est de définir le faisceau dans l'espace. Pour des conditions idéales, c'est-à-dire si le faisceau est constitué de photons issus d'une source ponctuelle, si le diaphragme du collimateur arrête tous les photons qui le frappent, nous aurons un faisceau conique parfaitement défini et la fluence dans un plan perpendiculaire à l'axe du faisceau sera uniforme et deviendra brusquement nulle à l'extérieur de l'angle solide.

En fait, dans des conditions réelles, la fluence diminue progressivement à la périphérie du champ de pleine illumination pour constituer une zone dite de pénombre. Cette zone de pénombre provenant de photons primaires qui ont subi des diffusions, on conçoit bien qu'elle est indésirable et qu'il faut s'attacher

FIG. 2. — Schéma de la salle de mesure avec l'implantation des faisceaux.

à en minimiser l'importance. La conception d'un faisceau devra donc comprendre l'étude :

- des dimensions de la source de rayonnement,
- des caractéristiques du collimateur,
- de l'environnement.

La figure 2 nous donne une vue schématique du local ayant servi à l'implantation des faisceaux. Sa longueur est de 10 mètres; afin de minimiser la diffusion sur les parois, celles-ci ont une faible épaisseur et aucun matériau à numéro atomique élevé n'entre dans leur composition. Elles sont en polyester et plusieurs épaisseurs de mousse collées en assurent l'isolation thermique avec l'extérieur.

Pour les raisons que nous venons d'exposer — réduction de la zone de pénombre et minimisation de la déformation spectrale — nous avons cherché à nous procurer des sources de rayonnement quasi ponctuelles. Ces sources se présentent sous la forme d'un cylindre :

source ^{60}Co	activité spécifique 320 Ci.g^{-1}	$\varnothing 1 \text{ mm}$	$h = 2 \text{ mm}$
source ^{137}Cs	activité spécifique 40 Ci.g^{-1}	$\varnothing 3 \text{ mm}$	$h = 3 \text{ mm}$

Une partie des photons dégradés constituant la zone de pénombre provient de photons diffusés ou transmis par le collimateur; pour une source donnée, l'importance de ce phénomène dépendra de la forme et de l'épaisseur de ce collimateur. Dans le cas d'une source quasi ponctuelle, si l'ouverture du diaphragme est un cône ayant la source pour sommet, en dehors du faisceau utile, le rayonnement traverse la totalité de l'épaisseur du collimateur; si cette épaisseur est suffisante, la participation du rayonnement transmis à la zone de pénombre devient négligeable.

Le problème à résoudre deviendrait donc relativement simple s'il suffisait de donner une épaisseur suffisante au collimateur. Malheureusement, on se heurte alors à une nouvelle difficulté : le nombre des photons diffusés croît avec l'épaisseur. L'optimisation de ces deux facteurs conduit donc à des solutions contradictoires. Un compromis réside dans l'emploi d'un matériau à numéro atomique élevé qui donnera une absorption maximale pour une épaisseur minimale.

Ces considérations générales nous ont servi à concevoir l'enceinte de collimation qui définit les faisceaux de référence ^{60}Co et ^{137}Cs .

La figure 3 nous donne une vue schématique de la coupe de cette enceinte de collimation. Le collimateur est un cône ayant la source pour sommet. Sa longueur est de 400 mm. Il est composé de 10 disques de tungstène de 15 mm d'épaisseur chacun. Cette solution de collimateur fractionné a été préférée à celle du collimateur monobloc, car chaque interstice séparant deux diaphragmes successifs doit servir de piège pour les photons diffusés par les bords des diaphragmes précédents.

L'enceinte de protection recevant le collimateur est en plomb, elle a 150 mm d'épaisseur. Sa conception a posé également un problème, étant donné l'impératif, que nous nous étions fixé au départ, de n'utiliser qu'une seule enceinte de collimation pour les deux faisceaux. Il s'agissait en effet de concevoir un dispositif offrant toute garantie quant à la parfaite reproductibilité de la position de la source par rapport à l'axe de collimation.

1. Collimateur; les diaphragmes qui le constituent ont la composition suivante :

$$W \approx 89 \% - Ni \approx 7 \% - Cu \approx 4 \%$$

2. Source.

3. Tunnel permettant de supprimer la paroi arrière de l'enceinte de protection afin de minimiser le nombre des photons rétrodiffusés pouvant passer par les diaphragmes du collimateur.

4. Système de visée optique escamotable permettant d'assurer la reproductibilité du positionnement des sources par rapport à l'axe de collimation avec une incertitude inférieure à 1/100 de mm.

5. Système de réglage de la position de la source.

6. Fenêtre en mylar de 5 microns d'épaisseur.

7. Détecteur.

8. Château de stockage.

FIG. 3. — Coupe schématique du faisceau de référence ^{60}Co - ^{137}Cs de faibles débits de fluence.

Une lunette escamotable fixée sur un bâti solide du collimateur permet de déterminer et de reproduire, avec une incertitude inférieure à 1/100 de mm, la position du centre « actif » des sources, celles-ci pouvant être translatées en coordonnées polaires par un ensemble de vis micrométriques.

Un tunnel pratiqué dans la paroi arrière de l'enceinte de protection permet de réduire le nombre des photons rétrodiffusés pouvant passer par les diaphragmes du collimateur.

Pour minimiser les diffusions sur les atomes d'air présents entre la source et un endroit donné au faisceau, l'ensemble de collimation est placé dans une enceinte étanche dans laquelle on effectue un vide de l'ordre du microbar. Un jeu de tubes de diamètre supérieur à celui du faisceau également maintenus sous vide permet, par fractions de longueur de 1 mètre, de faire varier la distance depuis 0,90 jusqu'à environ 6 mètres.

Les fenêtres qui en ferment les extrémités sont en mylar; elles ont une épaisseur de 5 microns.

Afin de juger de la qualité des faisceaux, nous avons étudié l'influence de différents paramètres géométriques du système de collimation sur la répartition spectrale des photons incidents.

Pour ces essais nous avons utilisé un spectromètre équipé d'un scintillateur NaI : Tl 3" x 3" associé à un analyseur multicanaux. Les spectres obtenus sont des spectres d'impulsions qui n'ont subi aucune correction; nous ne recherchions en effet, qu'un aspect qualitatif et non quantitatif des phénomènes.

FIG. 4. — Spectre n° 1
La source est centrée par rapport à l'axe de collimation.

Le spectre 1 de la figure 4 donne l'image de la distribution d'impulsions lorsque la source de cobalt 60 est parfaitement centrée par rapport à l'axe de collimation. La distance source-détecteur est de 1,00 m; un vide de quelques microbars est pratiqué dans le collimateur et le tube qui lui fait suite.

FIG. 5. — Spectre n° 2
Influence de la colonne d'air séparant la source du détecteur.

FIG. 6. — Spectre n° 3
Influence d'un léger décentrement de la source.

Le spectre 2 — figure 5 — illustre l'influence de la diffusion dans la colonne d'air séparant la source du détecteur. Les conditions géométriques sont identiques aux précédentes, mais le vide n'est pas fait dans le collimateur et l'enceinte qui lui fait suite.

Le spectre 3 de la figure 6 nous montre l'influence d'un décentrement de la source de 0,75 mm par rapport à l'axe de collimation. Il y a un vide d'un microbar dans le collimateur.

FIG. 7. — Spectre n° 4.
Influence du tunnel arrière de l'ensemble de collimation.

Le spectre 4 — figure 7 — permet de mettre en évidence l'intérêt d'un tunnel arrière de l'enceinte de protection. Pour ce spectre, le tunnel a été obstrué par une paroi de plomb de 150 mm d'épaisseur. On notera que la partie basse du spectre s'est accrue au détriment des hautes énergies.

Les faisceaux qui viennent d'être brièvement décrits sont caractérisés en exposition et sont en cours de l'être pour la fluence énergétique.

Il importe donc, et c'est ce qui constitue maintenant notre objectif à court terme, de définir des références en débit de dose absorbée.

Si, lorsqu'on parle d'exposition, il n'y a aucune ambiguïté, il faut, dans le cas de la dose absorbée, définir très précisément le milieu considéré, puisque en effet le transfert d'énergie est fonction de deux paramètres :

— l'un dépendant du faisceau : l'énergie transportée,

— l'autre du milieu : les coefficients d'absorption des photons pour les énergies considérées.

Il apparaît donc nécessaire de choisir un milieu de référence qui devra

— posséder toutes les qualités exigées pour les faisceaux :

- universalité,
- immuabilité;

— permettre la mesure précise d'une énergie absorbée par la technique de mesure choisie.

Comme cela apparaît sur le diagramme de la figure 1, la calorimétrie constitue la méthode privilégiée pour atteindre cette grandeur; les techniques ionométriques et chimiques sont en effet tributaires de la calorimétrie pour la détermination de certaines constantes qui leur sont nécessaires.

Le choix du milieu de référence est délicat. Certains expérimentateurs ont choisi l'eau ou un matériau « équivalent-tissu » comme milieux de référence. Ces milieux complexes ont l'inconvénient de présenter « un défaut de chaleur encore très mal connu », c'est-à-dire qu'une partie de l'énergie cédée à l'absorbeur n'est pas transformée en chaleur, mais est utilisée pour produire des réactions chimiques endothermiques. C'est pourquoi, à l'instar d'autres laboratoires, nous avons choisi le graphite — à grains fins de pureté nucléaire — comme milieu de référence.

Notre programme de travail se décomposera en deux parties :

- 1^{re} partie : définition de faisceaux de référence en débit de dose absorbée, en utilisant divers types et méthodes calorimétriques,
- 2^e partie : étude de méthodes de transfert.

Je viens d'essayer de vous donner un aperçu global des travaux que nous avons réalisés ou que nous entreprenons et de la philosophie qui guide notre action.

Tout ceci est naturellement fait en accord et avec l'aide du Bureau National de Métrologie.