UTILISATION D'UN FANTÔME ÉQUIVALENT-TISSUS POUR L'ESTIMATION DE LA CONTAMINATION RADIOACTIVE ET DE LA DOSE ABSORBÉE AU NIVEAU DE CERTAINS ORGANES

Groupe de Travail « Dosimétrie Interne » (*)

(manuscrit reçu le 23 mars 1970)

I - INTRODUCTION

Dans le but de préciser les conditions de mise en œuvre de la spectrométrie gamma humaine et de donner une base expérimentale aux évaluations dosimétriques qui en sont le complément, une étude a été entreprise par le Département de la Protection Sanitaire du C.E.A., en association avec le Laboratoire des Radio-isotopes de la Fondation Curie, dans le cadre d'un groupe de travail pluridisciplinaire. L'étude repose principalement sur l'emploi d'un fantôme équivalent-tissus original, à géométrie de corps humain, avec squelette incorporé et à organes amovibles. La partie spectrométrie de l'étude explore les possibilités de détection d'une installation à partir de la charge connue d'un organe du fantôme en un radionucléide donné. Elle étudie parallèlement l'influence de la localisation de l'élément sur le taux de comptage et permet de définir la géométrie la mieux adaptée au diagnostic. La partie dosimétrie de l'étude porte sur l'adaptation d'un certain type de dosimétrie physique à la détermination de la répartition de la dose absorbée dans un organe contaminé de manière uniforme ou non. L'estimation de la dose moyenne délivrée à l'organe à partir des mesures physiques est obtenue par le calcul. Le résultat est confronté à celui obtenu par des méthodes théoriques.

II - LES MOYENS

II.1 - LE FANTÔME (photos 1 et 2)

Il s'agit d'un fantôme complet de fabrication américaine reproduisant fidèlement les caractéristiques anatomiques d'un sujet, dont il utilise le squelette inclus à sa place exacte. La partie tête et tronc est constituée par un empilement de 35 tranches de matière équivalent-tissus vis-à-vis des rayonnements électromagnétiques, solidarisées entre elles par des tiges en plastique disposées de manière à éviter les principaux organes. Les segments de membre, articulés entre eux, ne sont pas divisés en tranches. Les organes, amovibles, sont inclus dans l'épaisseur des tranches, s'étagant sur un certain nombre d'entre elles. Le fantôme contient : cerveau, thyroïde, poumons, cœur, foie, rate, reins, cadre colique, masse de l'intestin grêle et vessie. La matière équivalent-tissus a une composition lui permettant de s'adapter à la structure particulière de l'organe considéré. C'est le cas des poumons, réalisés avec un matériau polymérisé de telle sorte qu'il reproduise la structure d'un poumon en état intermédiaire entre l'inspiration et l'expiration.

(*) Commissariat à l'Energie Atomique, Département de la Protection Sanitaire, Centre d'Etudes Nucléaires de Fontenay-aux-Roses.

Membres du Groupe de Travail : M. AVARGUES (Président), M. BEAU, Mme DABURON, M. GONGORA (Fondation Curie), M. LE GRAND, M. NENOT, M. NIKPAY (stagiaire étranger au C.E.A.), Mme PARMENTIER.

Rédacteurs de la note : P.G. BEAU, J. LE GRAND.

Cette aptitude de la matière équivalent-tissus à reproduire certaines caractéristiques physiques des tissus mous se traduit du point de vue de l'absorption des rayonnements électromagnétiques par un comportement véritablement « équivalent », comme en témoigne la radiographie du thorax du fantôme (photo 3).

Le tableau ci-dessous apporte quelques précisions supplémentaires en donnant pour l'eau, le muscle et la matière équivalent-tissus les valeurs de la densité, du nombre d'électrons par gramme, du numéro atomique effectif correspondant à l'effet photo-électrique et à la création de paires :

	Masse volumique	Nombre d'électrons/g (Effet Compton)	Numéro atomique effectif	
			Effet photo-électrique	Production de paires
Eau	1	$3,34 \times 10^{23}$	7,42	6,6
Muscle	1	$3,32 \times 10^{23}$	7,50	6,54
Matière équivalent-tissus	0,995	$3,30 \times 10^{23}$	7,43	5,96

Il est possible de substituer aux organes inactifs du fantôme des organes « actifs » obtenus par contamination du mélange constitutif de la matière équivalent-tissus avant polymérisation de celle-ci dans un moule de forme appropriée.

II.2 - DÉTECTION EXTERNE

Deux installations de spectrométrie gamma humaine sont utilisées pour l'étude envisagée :

- La première est celle du Laboratoire des Radio-isotopes de la Fondation Curie. Elle comprend :

- une enceinte blindée de grandes dimensions (longueur 3,43 m, largeur 2,54 m, hauteur 2 m) : les parois verticales et le plafond de cette enceinte sont constitués de briques de plomb de 10 cm d'épaisseur et de faible activité (2.10^{-6} à 5.10^{-6} $\mu\text{Ci/g}$), tandis que le sol consiste en une plaque d'acier sans cobalt de 14 cm d'épaisseur. Le revêtement intérieur est constitué de panneaux de contre-plaqué latté de 9 mm, recouvert de feuilles d'acier inoxydable inactif de 5/10 mm d'épaisseur qui exerce une protection vis-à-vis du rayonnement spécifique du plomb et dont la surface lisse et homogène facilite une éventuelle décontamination.

- un système de détection : il comporte deux sondes mono-cristal de NaI (Tl) cylindrique et de grand diamètre (20 cm). La hauteur du cristal est pour la première des sondes, destinée aux hautes énergies, de 10 cm; pour la seconde, destinée aux faibles énergies, de 1,5 cm. La première est équipée de 3 photo-multiplicateurs, la seconde de 4 photo-multiplicateurs. Ces sondes, qui possèdent un système de collimation amovible, peuvent être déplacées dans le sens vertical avec une course de 300 mm. Elles peuvent également être déplacées dans le sens longitudinal sur une longueur de 2,40 m, par le jeu de deux chariots indépendants qui les portent et qui sont montés sur des rails fixés au plafond de la cellule. Ces chariots peuvent être mobilisés, soit manuellement, soit par télécommande, indépendamment ou après solidarisation.

Les impulsions sont dirigées sur un analyseur à 400 canaux et une spectrométrie est réalisée.

Les résultats sortent, soit sous forme d'image du spectre au moyen d'un oscilloscope incorporé à l'analyseur, soit sous forme numérique par bande perforée ou magnétique au moyen d'un calculateur intermédiaire, soit encore sous forme de tracé fourni par un enregistreur.

- La seconde installation est celle du Laboratoire d'Analyses et d'Examens Radiologiques de la Section de Contrôle Sanitaire du D.P.S. Elle comprend :

- une enceinte blindée dont les parois, épaisses de 20 cm, sont constituées de plaques de fer, et dont le revêtement intérieur est formé de plaques de plomb de 2 mm d'épaisseur.

Les matériaux ont été sélectionnés pour obtenir un faible bruit de fond (780 chocs par minute dans la bande de 0,1 à 2 MeV).

Les dimensions de l'enceinte sont : longueur 2,5 m, largeur 2 m, hauteur 2 m.

— deux types de détecteurs :

1° un détecteur à scintillation : il s'agit d'une sonde comportant un premier cristal de NaI (TI) cylindrique de grand diamètre (20 cm), de hauteur 10 cm, et un second cristal de NaI pur, cylindrique, de même diamètre et de 7,5 cm d'épaisseur servant de guide de lumière (ensemble Scintiflex bas bruit de fond de Quartz et Silice). Ils sont couplés à 3 photomultiplicateurs EMI 9531. L'appareil n'est pas collimaté. Il peut être déplacé manuellement dans un plan horizontal.

2° un compteur proportionnel Plutonix 180 spécialement conçu pour la détection *in vivo* des émissions γ ou X de basses énergies. Ce compteur a une grande surface de détection : la fenêtre, en beryllium, a un diamètre utile de 180 mm. Il est rempli de façon permanente d'un mélange de Xe et de CH_4 (90 % et 10 %) à la pression atmosphérique. Son domaine d'utilisation va de 3 keV à 100 keV. Il possède la particularité de renfermer un dispositif interne d'anticoincidence qui permet de réduire le bruit de fond.

Ce compteur, comme le précédent, est muni d'une électronique de base permettant la sortie des impulsions sur un analyseur à 400 canaux avec mémoire et visualisation des spectres sur écran cathodique, avec possibilité d'enregistrement photographique. L'information peut encore être traduite en résultats numériques présentés sous forme de bande perforée.

II.3 - DOSIMÉTRIE

La technique dosimétrique retenue pour obtenir une distribution de la dose à l'intérieur de l'organe contaminé s'appuie sur un grand nombre de points de mesures.

Des dosimètres thermoluminescents au fluorure de lithium ont été utilisés. Ils sont constitués de petits cylindres de polyéthylène, mesurant 25 mm de hauteur et 5 mm de diamètre, et contenant 120 mg de cristaux de LiF.

Le fluorure de lithium présente les avantages suivants :

- faible encombrement,
- indépendance en fonction de l'énergie des rayonnements électromagnétiques. Il est, en effet, indépendant entre 100 keV et 30 MeV, mais surestime la dose de 20 % environ pour les rayonnements d'énergie inférieure à 100 keV. Il est cependant possible de corriger cette surestimation par des facteurs déterminés dans un faisceau étalonné.

La réponse en fonction de la dose n'est pas linéaire sur toute la gamme entre 100 mrad et 500 rads, ce qui implique un étalonnage soigneux et des corrections de supralinéarité. Les dosimètres sont lus au moyen d'un appareil Conrad modifié. Pour l'étalonnage, comme pour les mesures après expérimentation, la poudre est lue par échantillon de 30 mg. Le lecteur est réglé pour avoir un rad ou un mrad par « digit ». Dans ces conditions, la précision est de 5 %. L'étalonnage est fait par comparaison avec une chambre d'ionisation placée à 30 cm de profondeur dans une cuve d'eau de 30 cm $\times$ 30 cm et avec une solution de sulfate ferreux, irradiée dans les mêmes conditions. Les lectures sont exprimées en énergie absorbée en tenant compte du rapport des coefficients d'absorption énergétiques comparés de l'air et du LiF pour un rayonnement γ de 1,25 MeV dans le cas de la chambre.

III - LES PROTOCOLES EXPÉRIMENTAUX

III.1 - DÉTECTION EXTERNE

a) Fabrication d'organes contaminés :

Un des intérêts majeurs du fantôme est la possibilité qu'il offre d'y incorporer des organes contaminés. Les organes sont obtenus par mélange intime du contaminant radioactif et de la matière équivalent-tissus.

L'opération de fabrication est assez délicate : elle nécessite un dégazage sous vide et un brassage pour assurer au moulage une densité convenable et une contamination homogène. Le processus permettant de donner une activité déterminée à l'organe est le suivant :

A partir d'une solution-mère de radioélément d'activité spécifique connue, une ou plusieurs dilutions avec des solutions de concentration connue, conduisent à une solution active dont un certain volume contient l'activité recherchée. Un contrôle de l'activité de la solution est effectué par comptage de parties aliquotes de la dilution. Cette vérification faite, le volume de solution nécessaire à la contamination du matériau est prélevé et mélangé à ce dernier qui est ensuite versé dans les moules. L'excès de matériau, le moulage effectué, permet de contrôler l'homogénéité de la contamination en faisant une mesure d'activité de 3 échantillons pris au hasard. L'activité réelle du moulage est obtenue en multipliant l'activité mélangée par le rapport des poids du mélange initial et de l'organe moulé.

La méthode s'avère d'une bonne précision. Les activités données aux organes vont de 2,5 à une dizaine de microcuries.

Le programme expérimental en cours de réalisation, porte, pour commencer, sur la contamination des poumons et du foie par l'Américium-241, le Plutonium-239 et le Protactinium-233.

b) Techniques de mesures :

Les radionucléides choisis sont des émetteurs de photons γ ou X de faible énergie. Avec les activités données aux organes, les taux d'émission photonique sont suffisants pour avoir un bon rendement de détection; cependant, il est intéressant de voir quel détecteur est le mieux adapté aux caractéristiques des rayonnements de l'isotope considéré.

Les mesures de la charge des organes poumons du fantôme ont été effectuées; ce dernier en position allongée sur un cadre rigide en decubitus dorsal, mais aussi en decubitus ventral pour mettre en évidence les différences d'autoabsorption des tissus.

— Pour ^{241}Am , avec l'installation de la Section de Contrôle Sanitaire, les mesures ont été faites avec la sonde à scintillation et le compteur proportionnel sur le pic γ de 60 keV. Dans les deux cas, une série de mesures au contact sur le mode stationnaire est pratiquée (distance fenêtre du détecteur - surface du fantôme de 3 cm) en déplaçant le détecteur de l'épaisseur (2,5 cm) d'une tranche du fantôme, au niveau de la ligne médiane de ce dernier.

Les mesures pratiquées à la Fondation Curie avec la sonde à cristal de faible épaisseur ont été faites sur le mode fixe et en balayage continu, au contact et à une distance de 35 cm.

— Pour le ^{239}Pu , deux types de mesures ont été faites : au D.P.S. avec le compteur proportionnel uniquement, dans les conditions de géométrie précédentes, à la Fondation Curie avec la sonde à scintillation destinée aux faibles énergies également sur le mode fixe avec des repères correspondant aux plans de séparation des tranches.

Le compteur proportionnel assure la détection des raies X_L de ^{235}U associé à la désintégration α de ^{239}Pu , raies dont les énergies sont respectivement de 13,6 keV, 17,2 keV et 20,2 keV. Placé dans la chambre blindée, le compteur donne un bruit de fond de 12 chocs/minute environ dans la bande d'énergie des raies X_L précédentes.

— Le ^{233}Pa donne naissance, comme le ^{239}Pu , à un spectre de raies X d'un Uranium (^{233}U). Les spectres X étant qualitativement semblables, il est possible d'utiliser le ^{233}Pa *in vivo* comme étalon interne du ^{239}Pu . Successivement, avec le fantôme, ont été réalisées dans cette optique, à la Section de Contrôle Sanitaire, une mesure sur le pic γ de 310 keV du ^{233}Pa avec le cristal NaI, à une distance (50 cm) telle que l'on puisse éliminer les modifications dues à de faibles variations de localisation du radioélément, puis une série de mesures avec le compteur proportionnel dans les mêmes conditions de géométrie que pour ^{241}Am .

L'énergie relativement élevée du γ de 310 keV du ^{233}Pa a permis d'utiliser le balayage continu avec le détecteur de la Fondation Curie.

III.2 - DOSIMÉTRIE

a) *Physique* : Dans ce domaine, l'élaboration du protocole expérimental est précédée de deux opérations :

— la détermination, par un calcul rapide, de la charge de l'organe et du temps d'exposition nécessaire pour que l'ordre de grandeur de la dose aux différents points de l'organe soit compris entre 0,1 et 500 rads;

— la définition d'un quadrillage permettant d'explorer le volume de l'organe contaminé et de définir l'implantation des dosimètres.

La méthode employée pour la fabrication des organes est semblable à celle exposée précédemment pour la détection externe. Cependant, les activités nécessaires ici sont beaucoup plus importantes et imposent le travail en boîte à gants. Ceci a posé quelques problèmes techniques concernant le temps de manipulation (fabrication et brassage du mélange, coulage dans les moules) avant polymérisation du matériau équivalent-tissus.

L'épaisseur des tranches étant égale à la longueur des dosimètres, ceux-ci sont placés à l'intérieur de la tranche, perpendiculairement aux plans de séparation. Chaque tranche de l'organe contaminé est percée de trous suivant le quadrillage précédemment défini (photo 4).

L'organe contaminé, muni des dosimètres, est alors placé dans une cuve remplie d'eau. Après exposition, les dosimètres sont lus suivant le protocole décrit plus haut.

b) *Théorique* : La dosimétrie théorique utilise, d'une part, les méthodes de calcul classiques en la matière, et, d'autre part, un modèle mathématique s'adaptant aux caractéristiques anatomiques du fantôme utilisé.

Les calculs sont effectués sur ordinateur.

La mise en œuvre simultanée des méthodes de dosimétrie physique et de dosimétrie théorique permet une utile comparaison et la vérification réciproque indispensable.

PHOTO 1 — Fantôme complet sous le détecteur.

PHOTO 2. — Vue partielle du tronc du fantôme démonté, montrant en place les deux poumons et la partie supérieure du foie.

PHOTO 3. — Radiographie thoracique du fantôme.

PHOTO 4. — Radiographie d'une tranche au niveau de la colonne vertébrale dorsale.