Application de différentes méthodes de calcul pour évaluer la dose due aux photons de ^{241}Am , en cas de contamination du foie

P. NIKPAY-ASLIE (*), J. LE GRAND (**), N. PARMENTIER (**)

(Manuscrit reçu le 17 septembre 1975)

RÉSUMÉ

En cas de contamination interne de l'organisme, l'estimation des doses absorbées dues aux photons au niveau des différents organes pose des problèmes difficiles à résoudre. De nombreuses méthodes de calcul reposant sur des hypothèses simplificatrices sont utilisées. Dans ce travail, nous comparons les résultats obtenus en appliquant ces méthodes classiques à ceux auxquels conduit un calcul fondé sur l'assimilation de l'organe à un nuage de points jouant à la fois le rôle d'émetteurs et de cibles. Cette dernière méthode permet d'obtenir non seulement la dose moyenne à l'organe mais aussi la dose en certains points de celui-ci.

L'exemple choisi traite le cas d'un foie uniformément contaminé par de l'américium 241. Les doses, dues aux photons de ce radionucléide, calculées par les différentes méthodes sont comparées aux mesures de dose γ faites dans un foie contaminé mis en place dans un fantôme équivalent-tissu.

Les doses calculées à l'aide de la méthode de Monte-Carlo et de la méthode par assimilation à un nuage de points sont en bon accord avec les résultats expérimentaux.

ABSTRACT

In case of internal contamination, organ photon dose estimation is rather difficult. Many calculations can be made with different assumptions. In this work, comparisons were made between the results obtained with different classical methods and an original one. This method simulated the organ by a cloud of points considered both as emitting points and targets simultaneously. Thus not only the mean dose to the organ but also the dose to some selected points were obtained. The case of liver uniformly contaminated by americium 241 was chosen as an example.

(*) Centre d'Études nucléaires de l'Université de Téhéran, B.P. n° 2989, Téhéran (Iran).

(**) Commissariat à l'Énergie atomique, Département de Protection, SPS. Laboratoire de Dosimétrie sanitaire, B.P. n° 6, 92260, Fontenay-aux-Roses.

Doses calculated by the different methods were compared to doses measured in a contaminated liver included in a tissue equivalent phantom. The doses obtained by Monte-Carlo method and points cloud method were in good agreement with experimental results.

INTRODUCTION

Le plutonium et la plupart des transplutoniens connus comme émetteurs α donnent aussi naissance à des photons lors de leur désintégration. En cas de contamination interne de l'organisme par ces radionucléides, l'estimation des doses absorbées dues aux photons, au niveau de différents organes comme le poumon, le foie, l'os..., pose des problèmes difficiles à résoudre. De nombreuses méthodes de calcul, reposant sur des hypothèses simplificatrices plus ou moins grossières, sont généralement utilisées. Dans ce travail, nous nous proposons de comparer les résultats obtenus en appliquant ces méthodes classiques à ceux auxquels conduit un calcul fondé sur l'assimilation à un nuage de points jouant à la fois le rôle d'émetteurs et de cibles. Ces valeurs sont confrontées aux résultats de mesures de dose γ effectuées dans l'organe correspondant d'un fantôme équivalent-tissu. L'organe choisi pour cette étude est le foie, et le radionucléide est l'américium 241 dont le schéma de désintégration (tableau I) présente plusieurs raies γ et X de faible énergie.

1. MÉTHODE DE CALCUL

Parmi les différentes méthodes de calcul qui permettent d'évaluer les doses à l'intérieur d'un organe contaminé par un émetteur γ , certaines procèdent par calcul de la dose point par point en réduisant la forme de l'organe à un volume simple; d'autres procèdent directement au calcul de la dose moyenne. On trouvera ici un rappel de ces méthodes avant que ne soit exposée la méthode moins classique mais plus précise qui assimile l'organe à un nuage de points émetteurs-cibles.

Les photons sont émis par le radioélément contaminant suivant un spectre discret de raies; à chaque raie i est associée une énergie moyenne E_i .

On a admis dans les calculs que les tissus mous avaient la composition donnée dans le tableau 2-10 de la référence [4].

1.1. MÉTHODES CLASSIQUES

1.1.1. Méthodes de calcul de la dose en un point de l'organe

Pour faciliter les calculs, on est contraint d'assimiler l'organe à une forme géométrique simple, soit une sphère, soit un cylindre, uniformément contaminé.

La dose absorbée « ponctuelle » est alors calculée en des points situés :

- au centre et sur la surface d'une sphère;
- au milieu de l'axe et au centre d'une base du cylindre.

Dans tous les cas, le calcul est fait pour chaque voie d'énergie E_i donnée par le schéma de désintégration.

La dose absorbée « ponctuelle » est donnée par

$$D = D_1 + D_2 + \dots + D_i + \dots + D_n \quad (\text{rad}),$$

où :

D_i est la dose absorbée « ponctuelle » due aux photons de la raie i (rad);

n est le nombre de raies γ ou X de l'élément contaminant.

Les éléments contaminants considérés ont une période très longue, aussi les doses absorbées pour chaque raie γ ou X sont-elles calculées par la formule

$$D_i = t \cdot d_i,$$

où :

t est le temps d'exposition considéré (h);

d_i est le débit de dose absorbée au point considéré dû aux photons de la raie i ($\text{rad} \cdot \text{h}^{-1}$).

Le débit de dose absorbée d_i au point considéré est donné par

$$d_i = K \psi_i \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_i \quad (\text{rad} \cdot \text{h}^{-1}),$$

où :

$K = 1,6 \cdot 10^{-8} \times 3\,600$ est un coefficient de conversion d'unité permettant d'exprimer d_i en $\text{rad} \cdot \text{h}^{-1}$;

ψ_i est le débit de fluence énergétique des photons de la raie i ($\text{MeV} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) au point considéré;

$(\mu_{en}/\rho)_i$ est le coefficient d'absorption massique des tissus pour la i -ième raie ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$).

Les débits de fluence énergétiques sont donnés par

$$\psi_i = \varphi_i E_i,$$

où :

φ_i est le débit de fluence de photons de la raie i au point considéré ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$);

E_i est l'énergie des photons de la raie i (MeV).

Les débits de fluence de photons φ_i sont calculés à l'aide des formules classiques rappelées ci-après, pour les sources sphériques et cylindriques [6].

1.1.1.1. Cas de la sphère

a) au centre de la sphère le débit de fluence φ_i est donné par

$$\varphi_i = 3,7 \cdot 10^{10} \frac{C_v f_i}{(\mu/\rho)_i} B(1 - e^{-\mu_i R_0}) \quad (\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$$

où :

$3,7 \cdot 10^{10}$ est le nombre de désintégrations par seconde et par curie de l'élément contaminant;

C_v est l'activité massique ou volumique ($\rho = 1$) de l'élément contaminant (Ci.g^{-1});

f_i est la proportion de photons de la raie i émis par désintégration de l'élément contaminant;

$\mu_i, (\mu/\rho)_i$ sont les coefficients d'atténuation linéique ou massique de la i -ième raie γ ou X dans les tissus ($\text{cm}^{-1}, \text{cm}^2.\text{g}^{-1}$);

R_0 est le rayon de la sphère (cm);

B est le facteur de build-up.

b) en un point de la surface de la sphère, le débit de fluence est donné par

$$\varphi_i = 3,7 \cdot 10^{10} \frac{C_v f_i}{2(\mu/\rho)_i} B \left(1 - \frac{1}{2\mu_i R_0} + \frac{e^{-2\mu_i R_0}}{2\mu_i R_0} \right) \quad (\text{cm}^{-2}.\text{s}^{-1}).$$

1.1.1.2. Cas du cylindre

En un point de l'axe du cylindre, le débit de fluence est donné par

$$\varphi_i = 3,7 \cdot 10^{10} \frac{C_v f_i}{2(\mu/\rho)_i} B(G(\mu_i h_1, \mu_i R_0) + G(\mu_i h_2, \mu_i R_0)) \quad (\text{cm}^{-2}.\text{s}^{-1}).$$

où :

h_1 et h_2 sont des distances du point considéré sur l'axe aux bases du cylindre; $h = h_1 + h_2$ est la longueur du cylindre;

R_0 est le rayon du cylindre.

Le terme entre parenthèses représente le facteur géométrique qui tient compte des dimensions de la source et de la position du point où l'on veut calculer le débit de fluence. Pour le point milieu de l'axe, ce facteur est égal à

$$2G\left(\mu_i \frac{h}{2}, \mu_i R_0\right)$$

et pour le point situé au centre d'une des bases, il est égal à

$$G(\mu_i h, \mu_i R_0).$$

Remarque : La fonction G est de la forme suivante :

$$G(\mu_i h_1, \mu_i R_0) = \int_0^{\mu_i R_0} \int_0^{\theta_1} e^{-b'/\cos \theta'} d\theta' db'$$

avec

$$b' = \mu_i r,$$

$$\theta_1 = \text{Arctg}\left(\frac{h_1}{r}\right) \quad (\text{voir fig. 1}).$$

FIG. 1. — Schéma définissant les paramètres géométriques de la fonction G .

1.1.2. Méthode de calcul de la dose moyenne à l'organe

1.1.2.1. Méthodes CIPR

Cette méthode utilise des paramètres définis dans la publication 2 de la Commission internationale de Protection radiologique (CIPR) [3] :

- le rayon effectif x d'un organe calculé pour que l'énergie communiquée à la sphère correspondante soit la même que celle communiquée à l'organe de même masse et ayant la même charge radioactive;
- l'énergie effective par désintégration de l'élément contaminant qui est l'énergie communiquée en moyenne à l'organe par désintégration

$$\bar{E} = \sum_{i=1}^n E_i f_i (1 - e^{-\mu_{en}^i x}),$$

où :

E_i est l'énergie des photons de la i -ième raie γ ou X (MeV);

f_i est la proportion par désintégration de la raie i ;

μ_{en}^i est le coefficient d'absorption des photons de la raie i (cm^{-1}).

La dose moyenne dans l'organe est donnée par

$$D_I = K_1 \frac{\bar{E}A}{M} t,$$

où :

$K_1 = 1,6 \cdot 10^{-8} \times 3,7 \cdot 10^{10} \times 3600$ est un coefficient de conversion d'unité permettant d'exprimer la dose en rad;

A est l'activité totale dans l'organe (Ci);

M est la masse de l'organe (g);

t est le temps d'exposition (h).

1.1.2.2. Méthode de Monte-Carlo avec le fantôme de SNYDER

Les auteurs ont conçu un modèle théorique d'organisme humain, au sein duquel les différents organes sont également représentés pour des modèles géométriques simples aussi proches que possible de l'anatomie réelle de l'organe [7, 8].

Pour un organe uniformément contaminé, on détermine à l'aide d'une méthode de Monte-Carlo les fractions d'énergie des photons communiquées à l'organisme.

La dose absorbée moyenne à l'organe s'exprime donc par la formule

$$D_S = K_1 \frac{A}{M} \left(\sum_{i=1}^n (AF)_i f_i E_i \right) t \quad (\text{rad}),$$

où :

$(AF)_i$ est la fraction de l'énergie d'un photon de la raie i communiquée à l'organe.

1.2. MÉTHODE ASSIMILANT L'ORGANE A UN NUAGE DE POINTS

Cette méthode que nous avons tenté de mettre au point permet de calculer la dose ponctuelle et la dose moyenne, en étudiant la fonction de répartition des distances d'un point à un autre de l'organe. Pour la tester nous avons repris le modèle sphérique défini en 1.1.1.1., puis nous l'avons appliqué à la forme géométrique réelle du foie.

L'organe est assimilé à une multitude de points contenus dans l'enveloppe géométrique et répartis d'une manière uniforme.

A partir d'un système de référence choisi dans l'organe, on construit un quadrillage de l'espace selon un pas donné. Le modèle est composé des points d'intersection du quadrillage situés à l'intérieur de la surface externe de l'organe et l'activité d'un cube élémentaire est supposée concentrée en son centre.

Le débit de dose sur un point cible C dû aux photons émis par un point source S est donné par

$$d(x) = K_1 \alpha B \sum_{i=1}^n f_i E_i \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_i \frac{e^{-\mu_i x}}{4\pi x^2} \quad (\text{rad} \cdot \text{h}^{-1}),$$

où :

- K_1 est une constante définie en 1.1.2;
 $\alpha = A/N$ est l'activité d'un point source (Ci);
 A est l'activité totale dans l'organe (Ci);
 N est le nombre de points du modèle;
 f_i est la proportion de photons de la raie i émis par désintégration;
 n est le nombre de raies γ ou X;
 E_i est l'énergie du photon de la raie i (MeV);
 $(\mu_{en}/\rho)_i$ est le coefficient d'absorption massique du photon de la raie i ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$);
 μ_i est le coefficient d'atténuation linéique du photon de la raie i (cm^{-1});
 x est la distance entre les points cible et source (cm);
 B est le facteur de build-up.

Comme dans les paragraphes précédents, la dose absorbée est obtenue par

$$D(x) = d(x) \cdot t \quad (\text{rad}).$$

Pour calculer la dose en un point quelconque de l'organe, on détermine la distribution des distances de ce point à l'ensemble des points du modèle. On définit ainsi des classes de distances telles que les points appartenant à la k -ième classe vérifient

$$(k-1)d < x \leq kd,$$

où :

- x est la distance des points du modèle au point cible;
 k est le numéro de la classe;
 d est la largeur de la classe.

Le débit de dose au point cible est alors

$$D = \sum_{k=1}^{N_c} D(x_k) n_k,$$

où :

- N_c est le nombre de classes de la distribution;
 n_k est le nombre de points du modèle dans la classe k ;
 x_k est la distance associée à la classe k . x_k correspond à la classe définie par $(k-1)d < x \leq kd$ et est égal à $[(k-1)d + kd]/2$.

Les débits de dose sont calculés en un nombre N de points cibles représentatifs de l'ensemble de l'organe. Une estimation du débit de dose moyen dans l'organe est donnée par

$$\bar{D} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N D_j,$$

D_j étant le débit de dose au point cible j .

Dans le cas de la sphère, le quadrillage est construit à partir de trois axes perpendiculaires dont le point d'intersection est situé au centre de la sphère.

On calcule les débits de dose absorbée $D_1, D_2, \dots, D_j, \dots, D_{N_0}$ aux points du modèle situés sur un rayon de la sphère se trouvant sur l'un des trois axes définissant le quadrillage, D_1 étant le débit de dose au centre de la sphère.

On a

$$D_j = \sum_{k=1}^{N_{cj}} D(x_k) n_{kj} \quad (j = 1, N_0),$$

où :

N_{cj} est le nombre de classes de la distribution des distances du point j aux points du modèle;

n_{kj} est le nombre de points du modèle dans la classe k , lorsque le point cible est j ;

x_k est la distance associée à la classe k ;

N_0 est le nombre de points cibles sur le rayon de la sphère.

Le débit de dose moyen dans la sphère est alors donné par la formule

$$\bar{D} = \sum_{j=1}^{N_0} \frac{n_j}{N} D_j,$$

où :

n_j est le nombre de points du modèle dont la distance au centre de la sphère vérifie $(j-1)d < x \leq jd$;

N est le nombre total de points du modèle;

D_j est le débit de dose au point j du rayon.

2. MESURE DANS UN FANTÔME

Nous avons utilisé un fantôme anthropomorphe de fabrication américaine reproduisant les caractéristiques d'un homme standard de 1,70 m et pesant 70 kg [1]. Le squelette d'un sujet de cette taille est inclus à sa place exacte. Les parties tête et tronc sont constituées par un empilement de 35 tranches de matière équivalent-tissu (pour les rayonnements électromagnétiques) de 2,5 cm d'épaisseur, solidarisées entre elles par des tiges en plastique disposées de manière à éviter les principaux organes. Les segments de membres, articulés entre eux, ne sont pas divisés en tranches. Les organes amovibles sont inclus dans l'épaisseur des tranches, s'étageant sur un certain nombre d'entre elles. Le fantôme contient comme organes amovibles : cerveau, thyroïde, poumons, cœur, foie, rate, reins, cadre colique, masse de l'intestin grêle et vessie. Le foie, organe critique choisi pour cette étude, a été contaminé par de l'américium 241 mélangé au catalyseur

servant à fabriquer le plastique solide. La répartition du radioélément a été contrôlée par échantillonnage et elle est homogène à 5 p. cent près.

Pour mesurer la dose absorbée, on a placé à l'intérieur du foie contaminé, en un nombre de points judicieusement choisis, des dosimètres thermoluminescents qui permettent une mesure aussi ponctuelle que possible de la dose absorbée. La moyenne arithmétique de ces doses ponctuelles donne une estimation de la dose moyenne.

3. RÉSULTATS

Dans l'étude expérimentale, le foie contenait 353,5 μCi d'américium 241. Les dosimètres implantés dans l'organe ont été enlevés après 92 jours d'exposition.

Pour les calculs, le schéma de désintégration de l'américium 241 a été quelque peu simplifié. Le tableau I [2, 9] indique les énergies et les valeurs de f retenues.

TABLEAU I
VALEURS DE L'ÉNERGIE ET DE f RETENUES POUR LES PHOTONS
ÉMIS PAR L'AMÉRICIUM 241

Energie des photons E_i (MeV)	0,0596	0,0332	0,02636	0,015
f_i	0,2	0,3	0,4	1,52

Le foie est assimilé à une sphère de 7 cm de rayon et à un cylindre de base circulaire, de hauteur 15 cm et de rayon 5,5 cm.

Le foie du fantôme a un volume de 1 450 cm^3 . On a admis que le facteur de build-up B était égal à l'unité.

3.1. RÉSULTATS OBTENUS EN ASSIMILANT L'ORGANE A UN VOLUME GÉOMÉTRIQUE SIMPLE

Le tableau II montre les résultats obtenus selon que l'on assimile l'organe à une sphère ou à un cylindre.

Les coefficients d'atténuation et d'absorption des photons que nous avons utilisés sont donnés par JOFFRE et PAGES [4].

3.2. RÉSULTATS OBTENUS PAR LES MÉTHODES DONNANT LA DOSE MOYENNE A L'ORGANE

3.2.1. Méthode CIPR

L'énergie communiquée à l'organe, calculée par la formule donnée au paragraphe 1.1.2.1 pour un rayon effectif de 10 cm, est $1,19 \cdot 10^{-2}$ MeV par désintégration.

TABLEAU II

DOSE ABSORBÉE PONCTUELLE EN RAD POUR UNE EXPOSITION DE 92 JOURS

Energie des photons MeV [2,9]	ORGANE ASSIMILE A UNE SPHERE		ORGANE ASSIMILE A UN CYLINDRE	
	Centre de la sphere	Point sur la peripherie de la sphere	Point milieu de l'axe du cylindre	Centre d'une base du cylindre
0,0596	2,85	1,26	2,85	1,46
0,0332	0,05	0,02	0,05	0,03
0,02636	0,45	0,20	0,45	0,22
0,015	5,62	2,68	5,64	2,82
TOTAL	8,97	4,16	8,99	4,53

TABLEAU III

DISTRIBUTION DE LA DOSE EN FONCTION DE LA DISTANCE AU CENTRE DE LA SPHERE

Distance du point au centre de la sphere (cm)	Dose en 92 jours (rads)
0	7,78
0,5	7,77
1	7,76
1,5	7,74
2	7,71
2,5	7,67
3	7,62
3,5	7,55
4	7,46
4,5	7,35
5	7,18
5,5	6,94
6	6,47
6,5	5,50
7	2,81

Pour un foie contaminé uniformément par 353,5 μCi d'américium 241 et pesant 1 700 g [3], la dose moyenne est de 11,6 rads pour un temps d'exposition de 92 jours.

3.2.2. Méthode de Monte-Carlo avec le fantôme de Snyder [8]

Les valeurs des fractions d'énergie communiquée pour chaque raie γ ou X est obtenue par interpolation entre les valeurs d'énergie tabulées par SNYDER [7].

Les valeurs des $(AF)_i$ données par SNYDER correspondent à un foie de masse égale à 1 800 g et la dose est alors de 9,91 rads pour un temps d'exposition de 92 jours.

FIG. 2. — Foie, tranche 17 (vue de dessus).

3.3. RÉSULTATS OBTENUS EN ASSIMILANT L'ORGANE A UN NUAGE DE POINTS

3.3.1. Application à la simulation géométrique par une sphère

Nous avons calculé la distribution des distances des points de la sphère au centre en appliquant les formules données en 1.2. Nous avons ensuite calculé les fonctions de distribution et les doses, compte tenu des différentes énergies de photons en différents points du rayon ($R_0 = 7$ cm). Les résultats sont présentés dans le tableau III.

L'erreur systématique imputable à la méthode de calcul appliquée à la sphère a été évaluée pour la dose au centre de cette sphère; elle est de $\pm 10\%$. Pour les autres points, elle ne devrait pas dépasser $\pm 20\%$.

La pondération en fonction de la distribution des distances des points de la sphère au centre (n_j/N , $j = 1, 14$ - voir 1.2) conduit à la dose moyenne absorbée au niveau de l'organe de 5,96 rads en 92 jours.

3.3.2. Application du modèle au foie du fantôme

L'application rigoureuse de la méthode nécessiterait la connaissance des équations mathématiques définissant la surface extérieure du foie;

FIG. 3. — Foie, tranche 18 (vue de dessus).

FIG. 4. — Foie, tranche 19 (vue de dessus).

ceci est difficilement réalisable en pratique. Mais le foie du fantôme est décomposé en six tranches de 2,5 cm d'épaisseur, qui s'étalent sur les tranches

FIG. 5. — Foie, tranche 20 (vue de dessus).

FIG. 6. — Foie, tranche 21 (vue de dessus).

numérotées de 17 à 22 du fantôme (voir *fig. 2 à 7*). Nous avons assimilé chaque tranche de foie à un volume cylindrique dont la directrice est le contour de la face inférieure de la tranche. La méthode est alors appliquée au volume du cylindre ainsi défini, en conservant le pas de 0,5 cm précédemment fixé.

Les doses ponctuelles ont été calculées aux points où la dose a été mesurée expérimentalement, au niveau du point central du dosimètre. Pour

FIG. 7. — Foie, tranche 22 (vue de dessus).

chacun de ces points, le calcul de la dose absorbée en 92 jours est fait en tenant compte des différentes énergies de photons et de la distribution des distances du dosimètre aux points du modèle, selon la méthode décrite précédemment.

TABLEAU IV

DOSE CALCULÉE EN ASSIMILANT LE FOIE UNIFORMÉMENT CONTAMINÉ
A UN NUAGE DE POINTS

Numéro de la tranche	Numéros des cavités verticales dans lesquelles ont été placés les dosimètres										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
17			9,2	9,1							
18			10	9,9			9,7	9,4		8,5	7
19	8,4	8,1	10,2	10	9,4		9,5	9,7	8,1	8,9	
20	8,7	8,6	9,9	9,5	9,2	8,8					
21	8,2	8,1									
22	7,6										

Le tableau IV montre les résultats aux différents points; la dose est exprimée en rad.

Ici, l'erreur systématique imputable à la méthode de calcul est certainement supérieure à celle qui a été calculée pour le centre de la sphère. Il n'a

pas été possible de faire un calcul précis; on peut, cependant, avancer la valeur de $\pm 20\%$ pour les points périphériques; au centre de l'organe, la précision est certainement meilleure.

La moyenne arithmétique des doses ainsi calculées a été considérée comme représentative de la dose moyenne à l'organe. Elle est de 9 rads pour 92 jours.

3.4. RÉSULTATS DES MESURES

Comme nous l'avons vu, le matériau contaminé qui constitue le foie a été moulé tranche par tranche. Le foie occupe six tranches dont les numéros vont de 17 à 22, chaque tranche ayant un volume différent.

TABLEAU V

FACTEURS DE CORRECTION EN FONCTION DE L'ÉNERGIE DES PHOTONS

Energie (en keV)	8	16	25	43	58	1 250 (^{60}Co)
F	0,53	0,94	1,24	1,11	1,06	1

Les dosimètres thermoluminescents ont été placés au niveau de chaque tranche en les introduisant dans des cavités verticales creusées dans l'organe (fig. 2 à 7).

Une fois les dosimètres placés, le foie contaminé reconstitué a été mis en place dans le fantôme.

Pour que les lectures soient suffisamment précises, il a été nécessaire de laisser les dosimètres en place pendant 92 jours (3 mois).

La lecture du fluorure de lithium a été faite sur cinq échantillons de poudre, donnant ainsi une précision de $\pm 5\%$.

Le tableau V indique les facteurs F de correction utilisés pour corriger la réponse en fonction de l'énergie [5].

Ces facteurs ont été mesurés expérimentalement pour des dosimètres de géométrie identique à celle des dosimètres de notre expérience. Ces facteurs, pondérés de la fraction f des photons d'énergie E émis par l'américium 241, sont appliqués aux lectures et conduisent aux valeurs suivantes (tableau VI).

Le dosimètre 18-3 a été éliminé, sa lecture augmentant au cours du temps, ce qui indiquait une légère contamination du conteneur en plastique.

La dose moyenne expérimentale pour l'ensemble de l'organe est la moyenne arithmétique de toutes les valeurs du tableau VI et est égale à 9,9 rads.

TABLEAU VI

DOSE ABSORBÉE MESURÉE AU NIVEAU DES DIFFÉRENTS POINTS DE MESURE
APRÈS 92 JOURS D'EXPOSITION

Numéro de la tranche	Numéros des cavités verticales dans lesquelles ont été placés les dosimètres										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
17			10,8	8,4							
18				9,7			11,3	10,8		9,5	7,1
19	7,9	9,4	14,4	11,4	9,8		8,1	6,8	5,7	8,7	
20	9,4	11,4	11,1	17,4	11,0	9,7					
21	10,2	10,0									
22	7,0										

4. CONFRONTATION DES RÉSULTATS

4.1. COMPARAISON DES DOSES ABSORBÉES PONCTUELLES

La comparaison des doses obtenues par le calcul fondé sur des approximations géométriques et des doses obtenues par assimilation à un nuage de points ou expérimentalement est difficile, les points n'étant pas définis de la même manière.

Nous avons choisi de comparer (tableau VII) :

— la dose au centre de la sphère, la dose au centre géométrique du cylindre, la dose expérimentale mesurée par le dosimètre 19-4, placé approximativement au centre et la dose calculée en ce même endroit par assimilation à un nuage de points;

— la dose à la périphérie de la sphère, la dose au centre de la base du cylindre, la dose expérimentale mesurée par le dosimètre 22-1 et la dose calculée en ce même endroit par assimilation à un nuage de points.

Nous constatons que :

— les doses calculées en assimilant l'organe à une sphère ou à un cylindre sont inférieures aux autres résultats;

— la méthode du nuage de points appliquée à la sphère donne des résultats inférieurs à ceux obtenus par la méthode des fluences. Ceci est dû, en grande partie, à la valeur du pas choisi (0,5 cm). En effet, la contribution à la dose des photons de 15 keV est très importante et la valeur du pas choisi surestime leur atténuation;

— la méthode du nuage de points appliquée au foie donne un résultat proche de la valeur mesurée.

TABLEAU VII

COMPARAISON DES DOSES PONCTUELLES
OBTENUES PAR LES DIFFÉRENTES MÉTHODES DE CALCUL ET PAR LA MESURE

Dose calculée au <i>centre de la sphère</i> :	
Par la méthode des fluences.....	9,0 rads
Par assimilation à un nuage de points.....	7,8 rads
Dose calculée au <i>centre géométrique du cylindre</i> :	
Par la méthode des fluences.....	9,0 rads
Dose calculée au <i>point 19-4</i> :	
Par la méthode du nuage de points.....	10 rads
Dose mesurée par le <i>dosimètre 19-4</i>	11,4 rads
Dose calculée à la <i>périphérie de la sphère</i> :	
Par la méthode des fluences.....	4,2 rads
Par assimilation à un nuage de points.....	2,8 rads
Dose calculée au <i>centre de la base du cylindre</i> :	
Par la méthode des fluences.....	4,5 rads
Dose calculée au <i>point 22-1</i> :	
Par la méthode du nuage de points.....	7,6 rads
Dose mesurée par le <i>dosimètre 22-1</i>	7 rads

La comparaison des doses mesurées et des doses calculées par assimilation à un nuage de points conduit aux indications du tableau VIII qui montre, pour chaque point où une mesure a été faite, le rapport dose calculée/dose mesurée.

TABLEAU VIII

RAPPORT DOSE CALCULÉE/DOSE MESURÉE

Numéro de la tranche	Numéros des cavités verticales dans lesquelles ont été placés les dosimètres										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
17			0,85	1,08							
18				1,02			0,86	0,87		0,89	0,98
19	1,06	0,86	0,71	0,87	0,96		1,17	1,42	1,42	1,02	
20	0,92	0,75	0,89	0,54	0,84	0,91					
21	0,80	0,81									
22	1,08										

Compte tenu des incertitudes sur les valeurs calculées et sur les résultats expérimentaux, les rapports ne sont significativement différents de 1 (à 30 % près) que pour trois points.

Ce rapport est, en règle générale, inférieur à 1; ceci est probablement dû au fait que le calcul ne tient pas compte du rayonnement diffusé. Les valeurs nettement supérieures à 1, obtenues aux points 8 et 9 de la tranche 19 ainsi que la valeur 0,54 au point 4 de la tranche 20 sont essentiellement dues à des variations importantes des valeurs mesurées provenant probablement d'une certaine hétérogénéité de la contamination de l'organe.

4.2. COMPARAISON DES DOSES MOYENNES A L'ORGANE

TABLEAU IX

COMPARAISON DES DOSES MOYENNES CALCULÉES PAR LES DIFFÉRENTES MÉTHODES
ET DE LA DOSE MOYENNE EXPÉRIMENTALE

Dose moyenne (méthode CIPR).....	11,6 rads
Dose moyenne (méthode Monte-Carlo).....	9,9 rads
Dose moyenne (assimilation à une sphère, méthode du nuage de points).....	6 rads
Dose moyenne (nuage de points).....	9 rads
Dose moyenne (expérimentale).....	9,9 rads

La dose moyenne obtenue par la méthode de calcul de la CIPR est supérieure à la valeur expérimentale. Par contre, la dose calculée par la méthode du nuage de points en assimilant l'organe à une sphère de même volume est nettement inférieure aux autres résultats, comme nous l'avons déjà constaté pour les doses ponctuelles.

Par conséquent, si le foie est assimilé à une sphère, le rayon de celle-ci doit être plus grand que celui que nous avons choisi, mais inférieur à celui de la CIPR.

Enfin, la méthode de Monte-Carlo et la méthode du nuage de points conduisent à des valeurs en bon accord avec l'expérience. Il semble qu'elles puissent être utilisées dans le cas de contamination interne pour estimer la dose absorbée.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Groupe de Travail « Dosimétrie Interne ». Utilisation d'un fantôme équivalent-tissus pour l'estimation de la contamination radioactive et de la dose absorbée au niveau de certains organes. *Radioprotection*, 1970, 5, 167-174.
- [2] HYDE E.K., PERLMAN I., SEABORG G.T. The nuclear properties of the heavy elements. Londres, Prentice Hall, 1964, II, 813.
- [3] I.C.R.P. Report of Committee II on permissible dose for internal radiation. *Health Physics*, 1960, 3.

- [4] JOFFRE H., PAGES L. Coefficients d'atténuation massique et d'absorption massique en énergie. Rapport CEA-R-3655, 1968.
- [5] PORTAL G. Sensibilité spectrale relative du LiF-PTL en rayonnement monochromatique (fluorescence), Communication personnelle, 1968.
- [6] ROCKWELL Th., Ed. Reactor shielding design manual. Princeton, Van Nostrand, 1956.
- [7] SNYDER W.S., FISHER H.L., FORD M.R., WARNER G.G. Estimates of absorbed fractions for monoenergetic photon sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom, MIRD Pamphlet n° 5. *J. Nucl. Med.*, 1969, **10**, suppl. 3.
- [8] SNYDER W.S., WARNER G.G. Dose to body organs from a source of photons in one of them. *1st European Congress on Radioprotection*, Menton, 1968.
- [9] STROMINGER D., HOLLANDER J.M., SEABORG G.T. Table of isotopes. *Rev. Mod. Phys.*, 1958, **10**, 2, Part II, 585-904.