CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE L'IMPORTANCE DE LA DIFFUSION DANS L'ÉTALONNAGE DES APPAREILS DE MESURE DES FLUENCES ET DES ÉQUIVALENTS DE DOSE DE NEUTRONS

H. VIALETTES, J.M. CARIOU, M. DUFFAR *

(Manuscrit reçu le 24 juin 1970)

RÉSUMÉ

L'étude de la détermination des corrections dues à la diffusion des neutrons dans les étalonnages des appareils destinés à la mesure des fluences et des équivalents de dose a été effectuée avec des sources (α, n) américium-lithium ($\bar{E} = 0,44$ MeV), américium-fluor ($\bar{E} = 1,4$ MeV) et américium-béryllium ($\bar{E} = 4,4$ MeV) dans des salles dont le volume est compris entre 100 et 2 000 m³. On montre que, dans certains cas, la correction de l'étalonnage à partir de sources étalons peut atteindre un facteur 4 en fluence et un facteur 2 en équivalent de dose.

On voit de plus, que le pourcentage de fluence diffusée peut être considéré comme constant en fonction de l'énergie des neutrons et varie d'une salle à l'autre comme $V^{-2/3}$, en désignant par V le volume de la salle. Pour l'équivalent de dose par contre, le volume n'intervient pratiquement pas, et le pourcentage d'équivalent de dose diffusé varie en $\left(\frac{d}{R}\right)^{2,17}$ où d est la distance entre la source et le détecteur, et R la demi-largeur de la salle. Enfin, le dépouillement des résultats a montré qu'il n'était pas possible de trouver une relation simple entre la fluence ou l'équivalent de dose diffusé, ou même le pourcentage de diffusion, et des paramètres simples tels que la distance source-détecteur ou la hauteur de la source par rapport au sol, ou le rapport des deux.

ABSTRACT

The determination of corrections due to the neutrons scattering in calibrating fluxmeters and dosimeters has been studied with (α, n) neutrons sources Am-Li ($\bar{E} = 0,44$ MeV), Am-F ($\bar{E} = 1,4$ MeV) and Am-Be ($\bar{E} = 4,4$ MeV) in experimental rooms with volume ranging from 100 to 2 000 m³.

It is shown that in some cases, the correcting factor can reach a factor 4 for fluence measurement and a factor 2 for dose-equivalent measurement. The percentage of scattering-fluence may be considered as constant versus neutron energy and varying as $V^{-2/3}$ (V = volume of the room). On the other hand, the dose equivalent does not vary significantly with the volume and the scattering percentage varies as $\left(\frac{d}{R}\right)^{2,17}$ (d = source to detector distance, R = half-width of the room).

Finally, from the examination of the results, it is impossible to find simple relation between fluence or dose-equivalent, scattering percentage, and source to detector distance, source to floor distance, or the ratio of these two parameters.

* Service de Protection contre les Radiations, Groupe de Radioprotection des Accélérateurs, Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay, B.P. n° 2, 91 - Gif-sur-Yvette.

INTRODUCTION

Il est évident que tout étalonnage sérieux d'un détecteur de neutrons (flux-mètre ou dosimètre) doit être effectué dans des conditions telles que les risques de diffusion de neutrons soient réduits au minimum. Pour ce faire, certains centres nucléaires disposent d'aires d'irradiation en plein air équipées de supports permettant de disposer la source et le détecteur à une distance très grande du sol, de sorte que seule intervienne la diffusion par l'air. Celle-ci n'est pas très importante, et de plus, elle peut être déterminée, expérimentalement ou par le calcul, de façon assez aisée, de sorte que les étalonnages ainsi réalisés peuvent être considérés comme absolus. Ces conditions de travail sont pratiquement réservées à ceux qui étudient les détecteurs, car les agents qui assurent la radio-protection directe d'une installation importante n'ont ni le temps ni les moyens matériels de les utiliser; ils essaient alors, dans la mesure du possible, d'étalonner leurs détecteurs sur une pelouse aussi éloignée que possible des bâtiments, mais sont souvent obligés en fin de compte, ne serait-ce que pour des raisons météorologiques, de travailler dans une salle expérimentale. C'est pour aider ces agents à déterminer la surestimation de leur étalonnage due à la diffusion que ce travail a été entrepris. Pour avoir une gamme assez complète de résultats, les mesures ont été effectuées dans différentes salles expérimentales dont les volumes étaient compris entre 100 et 2 000 m³; les sources de neutrons étaient des sources américium-béryllium, américium-fluor et américium-lithium choisies en raison de leur utilisation courante pour les étalonnages de détecteurs.

I - MATÉRIEL UTILISÉ

I.1. SOURCES DE NEUTRONS

Trois sources (α, n) différentes ont été utilisées : américium-fluor, américium-lithium et américium-béryllium; elles se présentent sous la forme de cylindre et leurs caractéristiques principales sont données dans le tableau I.

TABLEAU I
CARACTÉRISTIQUES DES SOURCES UTILISÉES

Type de source	Dimensions en cm		Emission globale n/s dans 4π stéradians	Energie moyenne (MeV)
	$\varnothing$	h		
Am-Li	4	6	$4,3 \cdot 10^5$	0,44
Am-F	3	3	$4 \cdot 10^5$	1,4
Am-Be	3	3	$1,05 \cdot 10^6$	4,4

I.2. APPAREIL MESURANT LE DÉBIT DE FLUENCE

L'appareil utilisé est constitué par un compteur à BF₃ du type 1,25 NE 3 placé au centre d'une sphère modératrice en paraffine recouverte de cadmium

(épaisseur de modérateur : 6,5 cm). La réponse de ce détecteur en débit de fluence est indépendante de l'énergie des neutrons incidents entre 10 keV et 10 MeV. Un bon accord a été trouvé entre les résultats donnés par ce détecteur et la détermination du débit de fluence par la méthode des multisphères proposée par NACHTIGALL [1]; par contre, l'accord était moins bon avec les résultats obtenus à l'aide des multisphères en appliquant la méthode préconisée par ZABOROWSKI [2]. Ce résultat était d'ailleurs prévisible d'après les conclusions mêmes de ZABOROWSKI qui indique une hypersensibilité importante pour les neutrons intermédiaires, et une limite supérieure en énergie de 7 MeV.

I.3. APPAREIL MESURANT LE DÉBIT D'ÉQUIVALENT DE DOSE

Le dosimètre utilisé est du type « rem counter » décrit par ANDERSON et BRAUN [3], et fabriqué par la société 20th Century. C'est actuellement le dosimètre de neutrons le plus couramment utilisé.

II - CONDITIONS EXPÉRIMENTALES

II.1. SALLES DE MESURES

Le volume des salles de mesures utilisées est compris entre 100 et 2 000 m³. Il s'agit de salles expérimentales dont la protection n'est pas toujours homogène, mais dont l'épaisseur est au moins égale à 25 cm de béton léger. Ces salles sont absolument vides de tout matériel autre que celui utilisé pour ces mesures, et leur forme géométrique est simple.

Leurs dimensions sont données dans le tableau II.

TABLEAU II

Désignation des salles	Longueur m	Largeur m	Hauteur m
Salle 100 m ³	4,70	4,35	4,65
Salle 180 m ³	6,60	5,60	4,80
Salle 250 m ³	7,80	6,90	4,65
Salle 1 500 m ³	20	11	7

II.2. CONDITIONS DE MESURES

La source est placée au centre de la salle; elle est à la même hauteur par rapport au sol que le détecteur. Pour une hauteur donnée, la distance entre la source et le détecteur varie entre 50 cm et la demi-largeur de la salle. Les mesures ont été effectuées pour plusieurs hauteurs comprises entre 50 cm et 2 m au-dessus du sol.

Dans tout le texte on désignera par

- d la distance entre le centre de la source et le centre du détecteur,
- R la demi-largeur de la salle, c'est-à-dire la distance entre la source et le mur le plus proche,
- b la hauteur de la source au-dessus du sol,
- H la demi-hauteur de la salle.

III - RÉSULTATS OBTENUS

On a déterminé à chaque point de mesure la valeur du débit de fluence et du débit d'équivalent de dose que l'on appelle débit de fluence expérimental

FIG. 1. — Rapport de la fluence diffusée à la fluence directe pour une source Am-Be placée dans des salles dont le volume est compris entre 100 et 2 000 m³.

et débit d'équivalent de dose expérimental. Cette valeur expérimentale est égale à la somme de la valeur théorique, calculée à partir de l'émission de la source et de la loi de l'inverse du carré de la distance, et de la valeur du débit de fluence ou du débit d'équivalent de dose diffusé.

L'interprétation des résultats a montré que la façon la plus claire de les présenter consistait à tracer le pourcentage de diffusion, c'est-à-dire le rapport :

$$\frac{\text{valeur expérimentale} - \text{valeur théorique}}{\text{valeur théorique}} \text{ en fonction du rapport } \frac{d}{R}$$

III.1. MESURE EN DÉBIT DE FLUENCE

Les figures 1 et 2 donnent le pourcentage de diffusion du débit de fluence en fonction de $\frac{d}{R}$ pour différentes valeurs du rapport $\frac{b}{H}$ en utilisant respective-

FIG. 2. — Rapport de la fluence diffusée à la fluence directe pour une source Am-Li placée dans la salle de 250 m³.

ment la source d'américium-béryllium et la source d'américium-lithium, et en travaillant dans des salles carrées (longueur = largeur). Ces figures montrent que le pourcentage de diffusion augmente très vite lorsque l'on approche le détecteur du mur, et d'autre part, que ce pourcentage est pratiquement le même lorsque le détecteur est contre le mur quelles que soient les dimensions de la salle; la correction à apporter à un étalonnage en débit de fluence au point de mesure, effectué dans ces conditions, atteint un facteur 4 dans les deux cas. On voit que les meilleures conditions sont réunies lorsque la source est au centre de la salle ($\frac{b}{H} = 1$) et que le détecteur est le plus près possible de la source.

Dans le cas d'une salle rectangulaire, l'expérience montre que les résultats des figures 1 et 2 demeurent valables lorsque le déplacement du détecteur, par rapport à la source, s'effectue dans le sens de la longueur, à condition que $\frac{d}{R}$ soit inférieur à 0,5. Lorsque $\frac{d}{R}$ devient supérieur à 0,5, le pourcentage de diffusion mesuré est inférieur à celui donné par les courbes, et l'erreur entre la valeur mesurée et la valeur donnée par la courbe est de 30 % pour $\frac{d}{R} = 1$. Ceci est bien mis en évidence par le tableau III qui donne les pourcentages de diffusion obtenus pour différentes valeurs de d prises dans le sens de la longueur, puis dans le sens de la largeur, à l'intérieur d'une salle de dimensions $20 \times 11 \times 7$ mètres, la source et le détecteur étant à 75 cm au-dessus du sol.

TABLEAU III

COMPARAISON DES POURCENTAGES DE DIFFUSION OBTENUS DANS UNE SALLE RECTANGULAIRE POUR UN DÉPLACEMENT DU DÉTECTEUR DANS LE SENS DE LA LONGUEUR ET DANS LE SENS DE LA LARGEUR

d mètres	Pourcentage de diffusion		Erreur relative commise en assimilant la salle à une salle carrée
	sens de la longueur	sens de la largeur	
1	50	50	0,00
2	65	70	0,08
3	125	140	0,12
4	190	220	0,15
6	300	400	0,33
8	400		

On notera d'autre part, que les résultats de la figure 1 sont valables pour toutes les salles du tableau I alors que ceux de la figure 2 ne sont valables que pour la salle de 250 m³. Pour obtenir, à partir de cette figure, des résultats valables pour les autres salles, il est nécessaire d'utiliser le facteur de correction donné à la figure 3.

L'exploitation des résultats montre d'autre part, que pour une salle donnée, le débit de fluence diffusé est constant en fonction de $\frac{d}{R}$ à condition que $\frac{b}{H}$ soit

FIG. 3. — Facteur de correction à apporter aux résultats de la figure 2 en fonction du volume de la salle.

compris entre 0,5 et 1 et que $\frac{d}{R}$ soit supérieur à 0,3. Sur la figure 4 on a porté le débit de fluence diffusé correspondant à une émission de 1 neutron par seconde par la source, en fonction du volume de la salle pour les trois sources décrites au paragraphe I.1. L'étude des courbes obtenues montre que le débit de fluence diffusé varie comme $V^{-2/3}$; l'équation de ces courbes peut s'écrire :

pour la source Am-Be : $\Phi = 10^{-4} V^{-2/3}$

pour la source Am-F : $\Phi = 8,75 \cdot 10^{-5} V^{-2/3}$

pour la source Am-Li : $\Phi = 7 \cdot 10^{-5} V^{-2/3}$

où Φ est exprimé en $n/cm^2.s$, V en m^3 pour 1 n/s émis par la source.

Il est intéressant de noter que cette variation en $V^{-2/3}$ a déjà été mise en évidence par OTSTAVNOV [4] pour des neutrons dont l'énergie est comprise entre 600 keV et 14 MeV. Par contre, ces résultats ne peuvent être comparés à ceux

FIG. 4. — Débit de fluence diffusé en fonction du volume de la salle pour $\frac{d}{R} > 0,3$, $\frac{h}{H}$ voisin de 1, pour 1 n/s émis par la source.

de WHITE [5] car celui-ci n'a travaillé qu'avec des neutrons d'énergie comprise entre 20 keV et 140 keV.

III.2. MESURES EN DÉBIT D'ÉQUIVALENT DE DOSE

Après les mesures en débit de fluence, des mesures identiques ont été effectuées en débit d'équivalent de dose. On a porté sur la figure 5 les valeurs du rapport de l'équivalent de dose diffusé à l'équivalent de dose théorique déterminé à partir de la loi en $\frac{1}{d^2}$ et de la courbe d'équivalence de SNYDER [6] :

$$\frac{D_{\text{exp}} - D_{\text{th}}}{D_{\text{th}}}, \text{ en fonction de } \frac{d}{R}$$

pour toutes les salles et les trois sources. On remarque que pour une salle donnée, le pourcentage de diffusion ne varie pas de façon sensible avec l'énergie; de plus,

Fig. 5. — Rapport de l'équivalent de dose diffusé à l'équivalent de dose direct pour les sources Am-Li, Am-F, Am-Be, placées dans des salles de

la pente des courbes obtenues est la même quel que soit le volume de la salle intéressée. Une expression analytique pour ces courbes peut s'écrire :

$$\text{Pourcentage de diffusion} = \frac{D_{\text{exp}} - D_{\text{th}}}{D_{\text{th}}} = 110 \left(\frac{d}{R} \right)^{2,17}$$

c'est-à-dire que le rapport de l'équivalent de dose diffusé à l'équivalent de dose théorique vaut : $1,1 \left(\frac{d}{R} \right)^{2,17}$.

Si l'on veut connaître l'équivalent de dose diffusé en n'importe quel point de la salle sans être chaque fois obligé de recalculer la dose théorique, on peut modifier l'expression ci-dessus en introduisant l'expression de l'équivalent de dose théorique :

$$D_{\text{th}} = \frac{S}{4 \pi d^2 \alpha}$$

où S est l'émission globale de la source en neutrons par seconde dans 4π stéradians, et α un coefficient de correspondance entre le débit de fluence et le débit d'équivalent de dose.

Il vient alors :

$$D_{\text{diff}} = 1,1 \left(\frac{d}{R} \right)^{2,17} \cdot \frac{S}{4 \pi d^2 \alpha} = 1,1 \left(\frac{d}{R} \right)^{0,17} \cdot \frac{S}{4 \pi R^2 \alpha}$$

FIG. 6. — Réponse du dosimètre de ANDERSSON et BRAUN en fonction de l'énergie des neutrons (d'après [8])

On remarque que $\frac{S}{4\pi R^2 \alpha}$ n'est autre que l'équivalent de dose théorique au niveau du mur, et l'on a bien, pour une salle et une source données, une expression de l'équivalent de dose diffusé qui ne dépend que de $\frac{d}{R}$

$$D_{\text{diff}} = 1,1 (D_{\text{th}})_{\text{mur}} \left(\frac{d}{R} \right)^{0,17}$$

Il semble donc que l'équivalent de dose diffusé ait tendance à augmenter quand on s'approche du mur alors qu'on aurait pu s'attendre à ce qu'il soit constant, puisque le débit de fluence diffusé l'est et que l'énergie moyenne n'augmente certainement pas. En fait, l'augmentation que l'on observe à partir de $\frac{d}{R} = 0,3$ n'est que de 20 % et peut certainement être imputée à l'ypersensibilité du compteur de ANDERSSON et BRAUN; celle-ci a déjà été mise en évidence expérimentalement par plusieurs auteurs [3], [7] et apparaît clairement sur la figure 6 d'après [8].

CONCLUSIONS

Pour les étalonnages de détecteurs, en salle, les meilleures conditions expérimentales sont réunies lorsque la source est au centre de la salle et que le détecteur est le plus près possible de la source, à condition évidemment que la distance source-détecteur soit suffisante pour ne pas introduire d'erreur de géométrie. L'exploitation des résultats de ce travail montre qu'il n'est pas possible de trouver une loi simple reliant le débit de fluence ou le débit d'équivalent de dose aux autres paramètres que ceux utilisés dans le texte; en particulier, le pourcentage de diffusion ne peut s'exprimer ni en fonction de $\frac{d}{b}$, ni en fonction de d . Pour une source donnée, le débit de fluence diffusée est constant dans la salle lorsque $\frac{b}{H}$ est supérieur à 0,5 et $\frac{d}{R}$ supérieur à 0,3; de plus, il varie en fonction du volume de la salle comme $V^{-2/3}$.

La diffusion pour le débit d'équivalent de dose est moins marquée que pour le débit de fluence, ce qui est normal, compte tenu de ce que la diffusion donne des neutrons d'énergie dégradée qui contribuent moins au débit d'équivalent de dose. Quel que soit le volume de la salle, le pourcentage de diffusion en débit d'équivalent de dose ne varie pas de façon sensible en fonction de l'énergie; on montre, de plus, que pour une source donnée, le débit d'équivalent de dose diffusé ne dépend que de $\frac{d}{R}$. Ce résultat ne confirme pas les prévisions faites à partir des résultats obtenus pour le débit de fluence, certainement à cause du fait que la réponse en fonction de l'énergie du dosimètre utilisé n'est pas parfaite; il ne peut donc être utilisé en toute rigueur que pour le compteur de ANDERSSON et BRAUN.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] NACHTIGALL D., ROHLOFF F. Verfahren zur Messung der Flussdichten und Dosileistung-äquivalente von Neutronen im Energiesbereich zwischen thermischer Energie und 50 MeV. *Nucl. Instr. and Met.*, 50 (1967), p. 137-140.
- [2] ZABOROWSKI H. La technique multisphères. Rapport CEA R 2772 (1965).
- [3] ANDERSSON, BRAUN. A neutron rem counter. Neutron dosimetry - AIEA Vienne - Vol. 2 (1963).
- [4] OTSTAVNOV P.S. Fluxes of fast and slowed down neutrons in rooms. - *Energie Atomique*. Vol. 16, n° 2, février 1964, p. 154-155.
- [5] WHITE P.H. The room scattered background produced by a neutron source in a laboratory with concrete walls. *Nucl. Instr. and Met.* 39 (1966), p. 256-260.
- [6] SNYDER W. N.B.S. Handbook 75, p. 62.
- [7] LEAKE J.W., SMITH J.W. Calibration of a neutron rem counter. AERE report R 4524 (1964)
- [8] LEAKE J.W. An improved spherical dose equivalent neutron detector. AERE report R 5131 (1968).