

DOSIMÉTRIE DE L'IRRADIATION PAR DES PROTONS DE HAUTE ÉNERGIE PAR MESURE DU BÉRYLLIUM-7

G. LEGEAY,* L. JEANMAIRE, M. L. DABURON, N. DE BOTTON et S. BERTRAND

Département de la Protection Sanitaire
Commissariat à l'Énergie Atomique, Fontenay-aux-Roses, France

et

PH. TARDY-JOUBERT, H. DE KERVILLER

Service de Protection contre les Radiations
Commissariat à l'Énergie Atomique, Saclay, France

Résumé—L'utilisation des accélérateurs de particules à de très hautes énergies pose des problèmes de dosimétrie en cas d'irradiation accidentelle.

Au Symposium sur la "Dosimétrie Personnelle en cas d'exposition accidentelle" organisé par l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique en 1965 à Vienne, une méthode originale de mesure de la dose absorbée lors d'irradiation aux protons de haute énergie a été proposée.

L'analyse par spectrométrie γ met en évidence, aussitôt après l'irradiation, des radio-éléments de périodes très courtes, émetteurs β^+ , donnant des photons d'annihilation de 511 KeV. Après 36 heures, un pic apparaît et persiste au niveau de 479 KeV. Il traduit l'émission des gamma du béryllium-7 dont la période est de 53,6 jours.

Ce béryllium-7 est produit par des réactions de spallation provoquées par les protons de très haute énergie sur les noyaux des tissus.

L'activité rapportée au jour de l'irradiation en utilisant la période physique du ^7Be , est reliée à la dose absorbée par un coefficient de proportionnalité indépendant de l'énergie des protons utilisés dans l'intervalle 600 MeV–2,8 GeV et égal à $0,023 \pm 0,003$ pCi/g.rad, en tenant compte de la valeur la plus récente du rapport de branchement des γ du ^7Be .

La sensibilité de la méthode par spectrométrie gamma est suffisante pour que cette dosimétrie biologique soit utilisable en cas d'irradiation accidentelle partielle ou totale.

Une série d'expérimentations a été réalisée pour vérifier les possibilités de cette méthode dont l'application pratique présente des difficultés inhérentes à la répartition de la dose absorbée dans l'organisme et à la diffusion du ^7Be formé.

INTRODUCTION

L'irradiation de rats avec des protons de 600 MeV du Synchrocyclotron du CERN à Genève et avec les protons de 2,8 GeV du Synchrotron Saturne du CEN-Saclay, nous a permis d'établir le coefficient reliant l'activité correspondant au béryllium-7 formé dans les tissus à la dose absorbée.

On sait en effet que les interactions des protons de haute énergie avec les tissus sont de deux types:

—des collisions avec les électrons atomiques se traduisant par une ionisation directe:

—des interactions nucléaires de spallation qui conduisent à un éclatement du noyau en fragments de basse énergie, après émission d'un ou plusieurs nucléons de haute énergie et de mésons.

Le nombre d'éléments radio-actifs qui peuvent être formés dans le second cas est très limité pour les noyaux légers constituant les tissus vivants. L'un d'eux est le béryllium-7.

Nous rappellerons brièvement les conditions dans lesquelles nous avons établi cette relation activité-dose que nous avons exposée dans une communication à l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique à Vienne en 1965.⁽¹⁾

Nous comparerons ensuite les résultats expérimentaux à ceux prévisibles à partir des données

* Détaché par le Service Biologique et Vétérinaire des Armées.

physiques. Nous exposerons enfin les résultats d'un certain nombre d'expérimentations entreprises pour explorer les possibilités de cette méthode dans le cas d'une exposition accidentelle de l'homme aux protons de haute énergie.

I. ÉTABLISSEMENT DE LA RELATION EXPERIMENTALE ACTIVITÉ-DOSE POUR LES RATS IRRADIÉS "IN TOTO"

I. 1. Dosimétrie

Les difficultés inhérentes à la mesure de la dose absorbée lors d'une irradiation par les protons de haute énergie exigent des précisions sur la dosimétrie.

Pour les protons de 600 MeV, BAARLI plaçait des chambres d'ionisation Baldwin de 0,6 cm³ au centre des fantômes en polyéthylène, dans lesquels une variation de $\pm 4\%$ de la dose a été notée entre 1 et 11 g/cm² de profondeur. Il intégrait dans une capacité un courant proportionnel au courant d'ionisation produit dans la chambre par les protons. Le dispositif était étalonné avec une chambre en matériau équivalent au tissu de ROSSI et FAILLA et la quantité d'électricité intégrée dans la capacité correspondait à la dose en rads.

Pour les protons de 2,8 GeV, une chambre de 0,6 cm³ identique à celle utilisée à 600 MeV servait à mesurer la dose absorbée dans l'air devant l'animal irradié. Le rapport des pouvoirs d'arrêt respectifs de l'air et des tissus pour ces protons étant de 0,89, une dose de 1 rad dans une épaisseur mince de tissu correspondait à 0,89 rad mesuré dans l'air.

Ces résultats étaient comparés à ceux obtenus par activation grâce aux réactions ¹²C (p, pn) ¹¹C et ²⁷Al (p, 3pn) ²⁴Na de sections efficaces respectives 27 mb et 9,1 mb à 2,8 GeV. Sachant qu'une fluence de 3,05.10⁷ p/cm² correspond à 1 rad dans un échantillon mince, nous avons pu vérifier que l'écart entre la dose calculée à partir des fluences et la dose mesurée n'excédait pas 8%.

Le bon accord entre les résultats obtenus a permis de limiter l'erreur sur la mesure à l'erreur statistique sur l'une ou l'autre des méthodes de mesure, soit environ 10%.

I. 2. Spectrométrie γ et résultats

Les spectres d'activité recherchés sur les rats

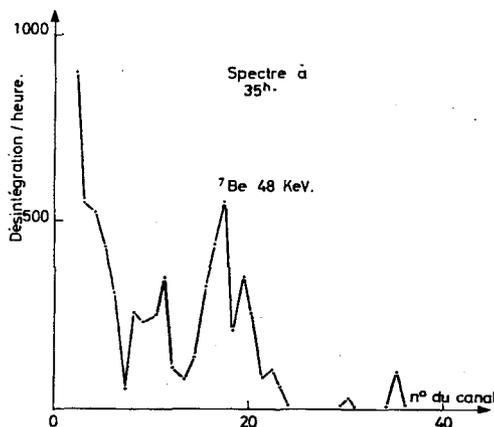
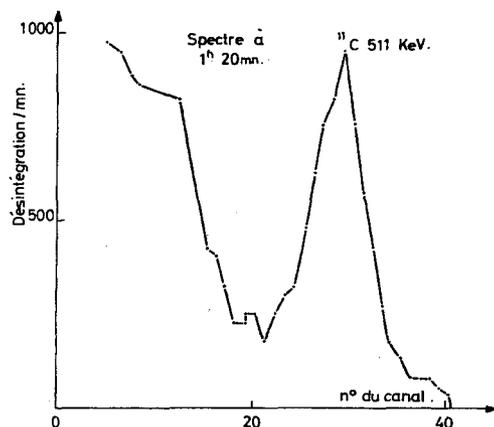


FIG. 1. Spectres de l'activité gamma, d'un rat irradié "in toto" par des protons de 2,8 GeV. Dose 1000 rads.

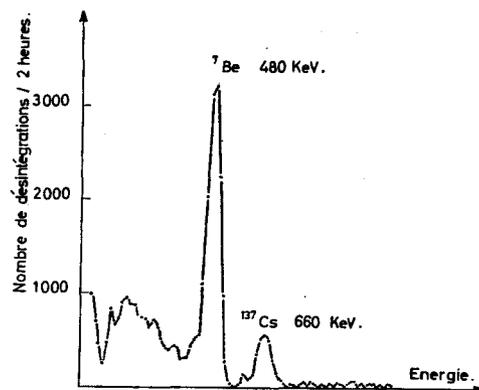


FIG. 2. Spectre de l'activité gamma de 2 rats au 5^{ème} jour, après l'irradiation aux protons de 600 MeV. Dose 800 rads. (Cristal 4' x 4').

vivants évoluent de la manière suivante en fonction du temps (figures 1 et 2).

—celui effectué 1 h 20 après l'irradiation montre l'existence d'un pic à 511 KeV. Celui-ci correspond aux gammas d'annihilation des trois émetteurs β^+ identifiés comme étant le ^{11}C , le ^{13}N et le ^{15}O .

—celui effectué 35 h après l'irradiation montre que le pic précédent a diminué considérablement. Par contre on observe un pic à 479 KeV correspondant à des gamma de transition du ^7Be dont le rapport de branchement est de 10,3% si l'on se réfère aux derniers documents publiés. (2)*

Des traces d'autres radioéléments apparaissent, notamment le ^{24}Na .

—celui effectué le 5ème jour après l'irradiation montre essentiellement un pic de ^7Be ; celui-ci peut être observé assez longtemps en raison de sa période physique de 53,6 jours.

Les mesures de l'activité γ du ^7Be furent effectuées sur les cendres de rats irradiés par des protons de 600 MeV et de 2,8 GeV à des doses de 200 à 1000 rads. Le Laboratoire de Mesures des Radio-éléments du CEN-Saclay a effectué la mesure absolue à 7% près d'un étalon d'eau bérylliée, obtenu par irradiation d'eau distillée avec des protons de 2,8 GeV.

L'activité rapportée au jour de l'irradiation en utilisant la période physique du ^7Be est reliée à la dose absorbée par un coefficient de proportionnalité indépendant de l'énergie des protons utilisés et égal à $0,023 \pm 0,003$ pCi/g. rad (tableau 2). Ce coefficient expérimental et le coefficient calculé à partir des données figurant dans la littérature ont fait l'objet de

* Cette valeur de 10,3% a été utilisée dans l'évaluation théorique (cf. II.1) et les comparaisons sont ainsi indépendantes de cette valeur.

recherches dont nous allons maintenant exposer les résultats.

II. CALCULS DES VALEURS THÉORIQUES D'ACTIVATION

II. 1. Relation activité-dose dans un échantillon mince de tissu

La dose expérimentale de $0,023 \pm 0,003$ pCi/g pour une dose absorbée au milieu du rat égale à un rad ayant été confirmée, nous avons été conduit à préciser les prévisions théoriques.

Dans notre communication à l'A.I.E.A., notre interprétation théorique de la production

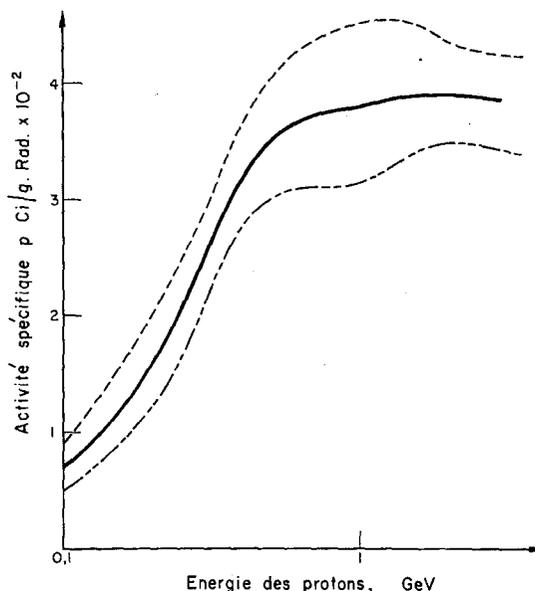


FIG. 3. Création de Be^7 par des protons de haute énergie dans un échantillon mince de tissu biologique.

Tableau 1. Données sur les réactions prévisibles

Élément	Concentration en %	Nombre d'atome-gramme par g. de tissu.	Réaction	Sections efficaces en mb.	
				$E_p = 0,6 \text{ GeV}$	$E_p = 2,8 \text{ GeV}$
C	12,3	$1,02 \cdot 10^{-2}$	$^{12}\text{C} (p, 3p, 3n) ^7\text{Be}$	$11,2 \pm 1,1$	10 ± 1
N	3,5	$0,25 \cdot 10^{-2}$	$^{14}\text{N} (p, 4p, 4n) ^7\text{Be}$	$10,4 \pm 2$	$9,9 \pm 2$
O	72,9	$4,55 \cdot 10^{-2}$	$^{16}\text{O} (p, 5p, 5n) ^7\text{Be}$	$10,4 \pm 2$	$8,7 \pm 1$

Tableau 2. Comparaison des mesures in toto et sur cendres chez le rat.
(Dose absorbée: 665 rads.)

Date de sacrifice	Activité mesurée sur les cendres* en pCi/g	Activité mesurée in toto* en pCi/g	Coefficient de proportionnalité activité-dose† en pCi/g × rad
J + 6	15,4	10,2	0,25
J + 8	15,3	9,4	0,25
J + 9	15,7	7,1	0,26
J + 12	14,6	7,6	0,25
J + 13	14,6	7,1	0,25
J + 15	11,3	7,3	0,20

* Activité rapportée au gramme de poids de l'animal sacrifié, ramenée au jour de l'irradiation, en tenant compte de la période physique du ${}^7\text{Be}$.

† Corrigé en tenant compte de la période biologique $T_b = 70 \text{ J}$.

de ${}^7\text{Be}$, à partir d'une dose absorbée par les tissus, se fondait sur des valeurs de sections efficaces connues à 20 ou 30% près. Des mesures plus récentes ont apporté des rectifications sur les trois constituants principaux (O, N, C).

Le tableau 1 donne les sections efficaces de production de ${}^7\text{Be}$ pour le carbone, l'oxygène et l'azote; la contribution des autres éléments des tissus est négligeable en raison de leur faible concentration, mais les sections efficaces de formation du ${}^7\text{Be}$ sur ces éléments sont très voisines.

Ceci nous conduit aux équivalences suivantes: $12,8 \pm 1,8 \text{ pCi/g}$ pour $10^{10} \text{ proton/cm}^2$ de 3 GeV correspondant à $0,039 \pm 0,005 \text{ pCi/g. rad}$. Sur la figure 3 est représentée la courbe de variation de cette activité en fonction de l'énergie entre 0,1 et 3 GeV, avec les limites extrêmes de précision des calculs.

L'activité ainsi calculée correspond à une dose absorbée dans un échantillon mince de tissu placé dans l'air.

II. 2. Variation de la dose et de l'activité en fonction de la profondeur

Dans toutes les expériences précédentes, la dose absorbée est mesurée dans la partie médiane ("midline dose") d'un fantôme de rat en Mix D.

Au cours de nos expériences sur les protons de haute énergie, nous avons montré que la dose absorbée varie en fonction de la pro-

fondeur.⁽³⁾ Pour le rat, nous avons déterminé le rapport entre la dose absorbée au milieu de l'animal et la dose dans un échantillon mince de tissu: la valeur moyenne déterminée à la suite de plusieurs expériences est égale à 1,4 avec un écart quadratique moyen de 0,1. La formation de ${}^7\text{Be}$ est due non seulement aux interactions produites par les protons primaires, mais aussi aux particules secondaires d'énergies supérieures au seuil de production.

Cette formation du ${}^7\text{Be}$ en fonction de la profondeur a été étudiée dans les deux expériences suivantes:

—une dose de 10.000 rads fut administrée à un cylindre de tissu mou de 30 cm de longueur sur 9 cm de diamètre dans le faisceau de protons. Fractionné de 5 cm en 5 cm, chaque morceau fut minéralisé et son activité mesurée. Celle-ci demeure sensiblement constante dans une épaisseur de 25 cm (tableau 3)

—un cylindre de Mix-D de 22,4 cm de longueur sur 6,5 cm de diamètre, constitué de 16 disques identiques, fut irradié dans les mêmes conditions. Nous avons constaté une légère augmentation de la quantité de ${}^7\text{Be}$ formée, de l'ordre de 5% pour une traversée de 14 cm de Mix-D.

En ce qui concerne la formation de ${}^7\text{Be}$ et pour les profondeurs qui nous intéressent, il semble donc qu'il se produit une compensation entre la disparition des particules primaires

Tableau 3. *Activité en ^7Be en fonction de la profondeur dans les tissus mous*

Profondeur cm	Activité en pCi/g frais
0-5	208
5-10	212
10-15	207
15-20	194
20-25	199
25-30	144

avec un libre parcours moyen de 60 g.cm^{-2} et la création de particules secondaires d'énergies supérieures au seuil de création du radio-nuclide.

II. 3. Relation activité-dose au milieu du rat

La dose absorbée au milieu du rat étant de 40% supérieure à la dose absorbée dans un échantillon mince, la valeur calculée en II. 1. peut être corrigée pour la rapporter à la dose mesurée au milieu de l'animal, ce qui donne alors $0,028 \text{ pCi/g. rad}$ à $\pm 15\%$ près.

On observe donc un bon accord entre les valeurs expérimentales et les prévisions théoriques.

III. VÉRIFICATIONS DES DONNÉES EXPÉRIMENTALES

III. 1. Contrôle des pertes de ^7Be au cours de la minéralisation

La différence constatée entre les prévisions théoriques et les résultats expérimentaux pourrait être imputable à ces pertes car nous ignorons la nature des composés du béryllium qui se forment dans les tissus.

Le composé le plus probable est l'oxyde de béryllium dont le point d'ébullition est voisin de 4.000°C sous une pression normale. La minéralisation à 800° ne doit donc pas le volatiliser. Nous l'avons vérifié en injectant 300 cm^3 d'eau distillée irradiée possédant une activité de $4,4.10^{-4} \mu\text{Ci/cm}^3$ dans une masse de viande de $2,5 \text{ kg}$ que nous avons ensuite minéralisée. 95% du béryllium injecté fut retrouvé dans les cendres ce qui permet—aux erreurs expéri-

mentales près—de considérer qu'il n'y a pas de pertes.

L'existence possible de composés plus volatils du béryllium nous a conduit à réaliser l'expérience suivante. Un rat irradié fut entièrement réduit en une pâte à l'aide d'un broyeur. L'homogénéité de celle-ci fut vérifiée sur plusieurs échantillons. Deux échantillons furent ensuite mesurés, l'un frais, l'autre minéralisé sous une géométrie identique. Le rapport des activités fut de 5,42 pour un rapport de poids de 5,56. La différence des rapports n'étant pas significative, nous devons donc admettre que la méthode de minéralisation mise en œuvre pour déterminer le coefficient reliant l'activité à la dose n'était pas une cause d'erreur.

III. 2. Mesure de l'activité γ du ^7Be sur le rat "in toto"

Nous avons effectué une comparaison entre les mesures d'activité "in toto" sur les rats, préalablement sacrifiés, et celles sur leurs cendres.

La géométrie des mesures sur les cendres correspondait à un disque de 50 millimètres de diamètre et de 10 à 12 mm d'épaisseur. Pour les mesures in toto, le rat fut placé dans une boîte cylindrique de 10 centimètres de hauteur et de 6,5 centimètres de diamètre. L'étalonnage était effectué avec une boîte analogue contenant de la gélatine irradiée avec les protons, elle-même étalonnée avec notre étalon habituel (voir I. 2.)

Les résultats de cette comparaison (tableau 2) montrent que le rendement de la mesure in toto par rapport à la mesure des cendres est de 75%. L'erreur de comptage avec la géométrie des cendres n'excède pas 5% si on admet que tout le ^7Be s'y retrouve. Elle est beaucoup plus élevée pour un comptage in toto, ce qui nécessite des corrections pour appliquer la relation activité-dose.

III. 3. Mesure de l'activité sur un singe in toto

Les caractéristiques du faisceau de protons de 2,8 GeV nous ont permis une irradiation globale d'un singe de 1,8 kg à la dose de 200 rads. Les comptages effectués 20 jours après l'irradiation avec un cristal de 20 cm de diamètre et 10 cm de hauteur ont montré que les mesures d'activité en ^7Be étaient encore possibles.

IV. DIFFUSION ET ÉLIMINATION DU ⁷Be DANS L'ORGANISME

L'irradiation locale entraînant une formation de ⁷Be tant dans les cellules que dans les milieux extra-cellulaires, il nous a semblé nécessaire d'effectuer un certain nombre d'expérimentations concernant sa diffusion. Celle-ci comporte un transfert au cours de l'irradiation par la voie sanguine, puis des échanges entre les espaces intra- et extra-cellulaires. Par ailleurs, comme tout radio-élément introduit ou formé dans l'organisme, le ⁷Be est soumis aux processus d'élimination biologique et de décroissance physique qui aboutissent à la notion de période effective.

IV. 1. Diffusion du ⁷Be de la tête vers le corps après une irradiation céphalique du lapin

L'irradiation locale étant la plus probable lors d'un accident auprès d'un accélérateur, une mesure localisée ne pourrait qu'accroître la sensibilité de la méthode. Mais, auparavant, il faut s'assurer de l'importance de la diffusion dans le temps du béryllium formé.

Compte tenu de la section du faisceau de protons dont nous disposons, la tête du lapin se prêtait le mieux à une irradiation locale.

Une première série de lapins reçut des doses allant de 900 rads à 9000 rads. La mort par hémorragies méningées qui se produisit du 2ème au 10ème jour limita nos observations. Elles montrèrent cependant une diffusion non négligeable du ⁷Be formé dans la tête vers le reste du corps.

Une deuxième série de lapins fut irradiée à des doses de 600 rads dans une section de faisceau à bordure nette permettant une limitation exacte de l'irradiation de la tête du lapin. Le tableau 4, colonne 1, montre le protocole suivi.

Cas des animaux irradiés morts. Sur les trois animaux de ce lot, le corps présentait une activité totale égale à 30% de celle de la tête. L'étude du faisceau par autoradiographie a permis de mettre en évidence l'existence d'un halo de particules autour du faisceau principal entraînant une irradiation de l'ensemble du corps à une dose moyenne égale à 3% de celle reçue

Tableau 4. Évolution de l'activité dans la tête et dans le corps en fonction du temps après irradiation

Date de sacrifice	Tête		Corps		Rapport des activités/g Tête/Corps (moyenne)	
	Poids en g à la sacrifice	Activité \bar{m} en pCi/g	Poids en g à la sacrifice	Activité \bar{m} en pCi/g		
Avant l'irradiation	190	15,6	1890	0,59	29,6	
	190	13,0	1740	0,32		
	185	15,0	1710	0,55		
Après l'irradiation	210	10,6	1670	0,69		16,3
	215	11,6	1985	0,68		
	260	7,2	2490	0,44		
	290	9,3	2855	0,67		
J + 0,5	230	10	2310	0,80	14,2	
	190	10,3	2080	0,60		
	300	11,2	2820	1,00		
J + 1	250	9,3	2430	0,62	13,2	
	275	9,1	2395	0,61		
J + 2	260	10,4	2550	0,46	22,6	
J + 5	250	9,3	2540	0,85	10,9	
J + 11	250	7,8	2130	0,56	14	
J + 15	280	7,8	2860	0,64	12,3	

par la tête. Ceci a permis d'expliquer une activité du corps qui ne pouvait résulter d'une diffusion biologique.

L'activité due au ^7Be formé dans la tête de ces lapins (tableau 4) peut être reliée à la dose grâce au coefficient déterminé expérimentalement sur le rat, ce qui s'explique du fait que les géométries d'irradiations étaient voisines.

Cas des animaux sacrifiés après l'irradiation. L'activité spécifique de la tête des lapins sacrifiés immédiatement après l'irradiation est inférieure de 30% à celle des lapins irradiés morts.

Cette décroissance rapide traduit le transfert par voie sanguine du ^7Be formé dans les espaces extra-cellulaires durant l'irradiation.

Pour les lapins sacrifiés après l'irradiation, la loi de décroissance de l'activité spécifique de la tête en fonction du temps séparant l'irradiation de la sacrifice (figure 4) — en corrigeant la mesure avec la période physique du ^7Be en vue de rapporter tous les résultats au même instant — est de caractère exponentiel, la période de diffusion biologique est $T = 32 \pm 3$ jours.

Nous avons vérifié par ailleurs, pour des doses absorbées proportionnelles entre elles, que le

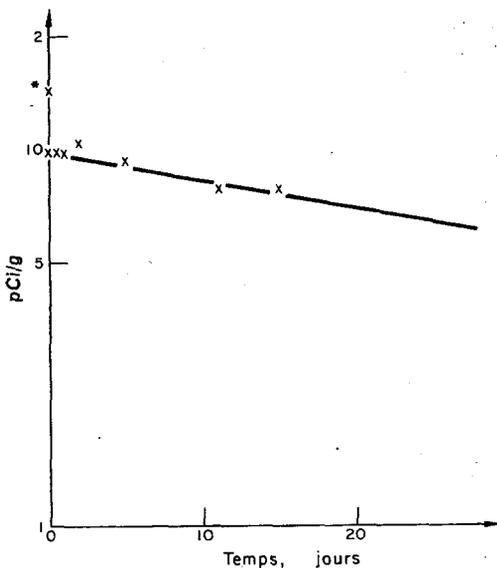


FIG. 4. Activité de la tête en ^7Be en fonction du temps après sacrifice. Recherche de la période biologique. Les activités sont ramenées au jour de l'irradiation (correction de la période physique).

* animal sacrifié avant irradiation.

même processus se produit au facteur de proportionnalité près.

IV. 2. Période effective du ^7Be pour le rat irradié in toto

La valeur 0,024 pCi/g. rad a constamment été retrouvée sur les mesures faites les premiers jours suivant l'irradiation. Pour effectuer des corrections exactes sur des mesures faites ensuite, il est nécessaire de connaître la période effective du ^7Be .

La Commission Internationale de Protection Radiologique⁽⁴⁾ indique, pour l'homme, une période effective de 41 jours, la période biologique étant de 180 jours.

Nous avons recherché, grâce aux mesures in vivo sur le rat et le singe après irradiations globales, les valeurs correspondantes.

Sur 16 rats irradiés à 400 rads, la période effective est de 30 ± 5 jours. Ceci correspond à une période biologique de 70 jours environ compte tenu de la dispersion des résultats. Utilisant cette valeur moyenne nous avons effectué sur le tableau 2 les corrections de période biologique ce qui nous a permis de retrouver le coefficient de proportionnalité de $0,025 \pm 0,003$ pCi/g. rad absorbé au jour de l'irradiation.

Pour l'unique singe irradié à 200 rads, nous avons trouvé une période effective de 35 jours, soit une période biologique de 100 jours: cette valeur est donnée à titre indicatif.

V. DISCUSSION

Nul n'ignore les difficultés que pose la détermination de la dose absorbée par un individu lors d'un accident. La dosimétrie physique est trop souvent imprécise du seul fait que le dosimètre ne se trouve pas toujours placé en indicateur de dose en surface sur le sujet irradié par rapport à la source de rayonnements.

La dosimétrie biologique par activation offre a priori l'avantage de fournir directement la dose absorbée. Celle que nous proposons pour les protons de haute énergie n'est pas sans analogie avec la méthode de dosimétrie des neutrons par activation du sodium que nous avons d'ailleurs relevé également dans nos spectres.

Le ^7Be peut se former dans tous les tissus, aussi bien dans les espaces intercellulaires que

dans les cellules. Sa période effective permet d'effectuer des mesures d'activité avec toute la liberté de temps désirable.

Nous avons déterminé le coefficient de proportionnalité entre l'activité et la dose. Il est indépendant de l'énergie des protons incidents dans l'intervalle exploré (600 MeV — 2,8 GeV) et pour les conditions de géométrie dans lesquelles nous avons expérimenté. Nous avons enfin mis en évidence une période de diffusion dans le cas d'une irradiation locale particulière.

Les possibilités actuelles de la spectrométrie permettent de détecter les photons gamma émis à des niveaux d'activité suffisants pour être d'un intérêt réel en cas d'accident.

La mesure de l'activité in toto sur un singe irradié à 200 rads permet d'estimer que sur un individu standard, absorbant une dose de 5 rads uniformément distribuée dans l'organisme, l'activité correspondante de l'ordre de $10^{-2} \mu\text{Ci}$ serait décelable.

Mais nous connaissons les difficultés que présente la mise en œuvre d'une dosimétrie biologique par activation. Pour établir l'activité en ${}^7\text{Be}$ formé dans l'organisme, nous pensons qu'il est indispensable d'effectuer, parallèlement aux mesures locales et in toto sur l'individu irradié, des mesures analogues sur fantômes contenant des taux d'activité en ${}^7\text{Be}$ connus.

La possibilité de produire celui-ci par irradiation de l'eau permet de résoudre aisément le problème de l'étalonnage. Signalons au passage la nécessité de saturer l'eau à irradier de béryllium stable afin d'éviter une concentration par adsorption du ${}^7\text{Be}$ sur les parois des récipients.

Nous estimons, par ailleurs, que si des mesures locales—notamment celles sur les gammas d'annihilation des émetteurs β^+ à vies très courtes—ont permis de préciser la région de l'organisme irradié, il peut être utile de réaliser un modèle en tissu mou de la zone atteinte. Son activation par irradiation, son utilisation pour des mesures locales et in toto dans le fantôme précédent ainsi que la détermination exacte de son activité

permettraient de compléter les bases d'information.

Les corrections à l'aide de la période effective pour le sujet irradié, de la période physique pour les mesures du fantôme, l'introduction du facteur de diffusion qu'il est possible de préciser par des mesures d'activité relatives locales, doivent permettre d'établir la dose absorbée avec une approximation relativement bonne.

CONCLUSION

L'irradiation de la matière vivante par les protons de haute énergie offre donc la possibilité de réaliser une dosimétrie biologique.

Celle-ci est possible pendant un temps relativement long du fait de la période effective du ${}^7\text{Be}$; la relation entre l'activité et la dose est simple dans l'intervalle 0,6–2,8 GeV; la sensibilité de la méthode par spectrométrie gamma est suffisante pour que cette dosimétrie biologique soit utilisable en cas d'irradiation accidentelle partielle ou totale.

Comme pour toutes les méthodes de dosimétrie biologique, l'application pratique présente des difficultés inhérentes à la répartition de la dose absorbée dans l'organisme et à la diffusion du ${}^7\text{Be}$ formé. Ce sont ces difficultés que nous avons explorées dans cette étude.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier Messieurs Guenet, Tulasne, Dupin, Desavire du Groupe de Radiopathologie Générale et Messieurs Quéchon, Pagès et Brochen du Groupe de Radioprotection de Saturne pour l'aide qu'ils nous ont apportée au cours de nos expérimentations auprès du Synchrotron Saturne.

RÉFÉRENCES

1. G. LEGEAY, L. COURT, L. PRAT, L. JEANMAIRE, M. L. DABURON, H. DE KERVILLER et PH. TARDY-JOUBERT. *Personnel dosimetry for radiation accidents*. IAEA (Vienne), pp. 507–523 (1965).
2. J. B. CUMMING. *Ann. Rev. Nucl. Sci.* **13**, 261 (1965).
3. G. LEGEAY, PH. TARDY-JOUBERT et N. DE BOTTON. *Congrès Health Physics*, Houston (Juin 1966).
4. I.C.R.P. Publication 2 (1959).