

# IRRADIATIONS HOMOGENES DANS UN FAISCEAU DE PROTONS DE HAUTE ENERGIE ETUDE DE LA DOSE EN PROFONDEUR AU MOYEN DE FANTOMES

H. de KERVILER\*

*(manuscrit reçu le 20 décembre 1967)*

## INTRODUCTION

La principale difficulté que l'on rencontre lorsque l'on cherche à irradier de façon homogène dans un faisceau de particules de haute énergie un échantillon dont les dimensions ne sont pas très petites, est la répartition généralement très inhomogène de la fluence des particules dans le faisceau, ce qui conduit à une distribution également inhomogène de la dose sur la face avant de l'échantillon, donc dans son volume.

Deux méthodes peuvent être adoptées pour améliorer l'homogénéité de la distribution de la dose; la première qui est exposée dans [1] pour des protons de 500 MeV, consiste à interposer, avant l'objet à irradier, des écrans épais qui assurent une diffusion des particules. Cependant cette méthode est plus difficile à utiliser avec des particules de plus haute énergie, en raison d'une part de la plus grande quantité de secondaires produits dont la contribution à la dose devient importante et la dosimétrie difficile, et d'autre part de la moins bonne efficacité obtenue en ce qui concerne la diffusion des particules primaires. Les angles de diffusion sont en effet plus faibles à haute énergie, et il n'est généralement pas possible d'effectuer l'irradiation très loin en arrière de l'écran, en raison de la nécessité de placer des blindages importants autour du passage du faisceau.

L'autre méthode que nous avons déjà utilisée dans des travaux précédents [2], [3], consiste à défocaliser le faisceau au moyen de lentilles électromagnétiques quadripolaires classiques, l'étalement produit conduisant à une variation plus lente de la dose dans la section droite du faisceau. Cette méthode est décrite ci-dessous et la détermination de l'emplacement de l'irradiation est étudiée théoriquement.

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

## I - IRRADIATION HOMOGÈNE DANS UN FAISCEAU DE PROTONS DE HAUTE ÉNERGIE

### I.1. ÉTUDE GÉNÉRALE DES FAISCEAUX

Dans une section droite de faisceau, la fluence présente généralement un ou plusieurs maximums à partir desquels elle décroît plus ou moins rapidement lorsque l'on s'éloigne vers les bords. Ces maximums étant presque toujours de surface très faible, il n'est pas possible d'y placer l'échantillon à irradier dont les bords reçoivent alors une fluence nettement inférieure à celle reçue au centre. Il est donc nécessaire d'étudier l'allure générale des faisceaux afin de chercher s'il existe une méthode permettant d'obtenir une irradiation homogène.

L'étude des tracés des courbes isoflux ou isodoses peut être menée au moyen de plaques radiographiques de sensibilité appropriée au débit de dose fourni par le faisceau. Ainsi pour les expériences d'irradiations biologiques dans le faisceau de protons de 3 GeV extrait du Synchrotron Saturne, nous utilisons des plaques Kodak type M qui ne sont pas saturées en deçà d'une cinquantaine de rads. L'examen au densitomètre permet de tracer des courbes d'isodensité optique relativement au noircissement maximal dans la tache.

On sait par ailleurs comment varie le degré de noircissement de la plaque avec la dose absorbée reçue. En prenant soin de ne pas atteindre la zone de saturation de la couche sensible, la relation est linéaire et les courbes d'isodensité tracées sont des courbes isodoses. Dans la région où commence la saturation, il est difficile d'effectuer une correction, la valeur absolue du noircissement étant en effet fonction de la dose mais aussi du temps et de la température de développement, deux plaques différentes peuvent être saturées en un point avec des valeurs de noircissement différentes. Cette correction n'est possible que si l'on a mesuré la dose en un point précis de la plaque, au moyen d'un détecteur placé à cet endroit pendant l'irradiation de la photo. En règle générale nous préférons maintenir l'exposition de la plaque inférieure à celle où débute la saturation, soit une cinquantaine de rads.

En étudiant les photos obtenues pour diverses valeurs des courants dans les quadrupôles successifs, on a remarqué qu'il était relativement facile d'obtenir dans une région délimitée de la section du faisceau des courbes isodoses ayant l'allure de droites parallèles; c'est-à-dire que la fluence est constante suivant la direction de ces droites, mais elle varie de façon quelconque suivant une perpendiculaire.

### I.2. CHOIX D'UN EMPLACEMENT POUR L'IRRADIATION DES ÉCHANTILLONS

On a tout de suite pensé à placer l'échantillon dans la zone à isodoses parallèles, et à l'animer d'un mouvement de rotation lente autour d'un axe parallèle à celui du faisceau de manière à obtenir une compensation, donc une dose intégrée pendant l'irradiation qui soit finalement homogène.

Cependant il faut encore déterminer comment centrer l'échantillon dans cette zone et vérifier si l'on obtient effectivement une irradiation homogène.

Pour cela, on trace la courbe de variation de la dose le long d'une direction perpendiculaire aux isodoses, soit  $D(y)$  cette courbe.

Soient  $(x_0, y_0)$  les coordonnées du centre de l'échantillon (intersection de son axe de rotation avec sa face avant) dans le système d'axes  $(x, y)$ , la direction  $o_x$  étant parallèle aux isodoses.

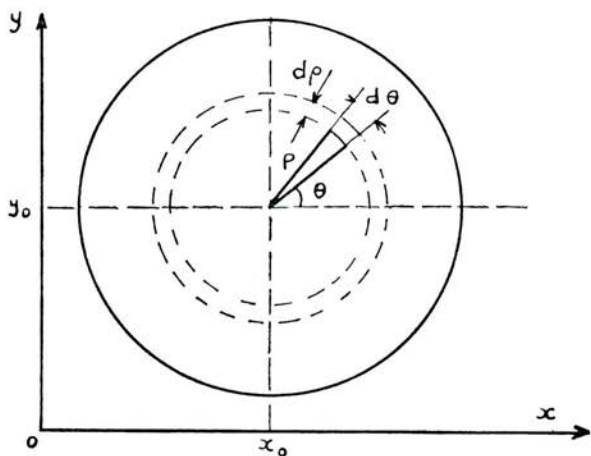


FIG. 1.

La dose sur la surface élémentaire  $\rho \, d\rho \, d\theta$  à la distance  $\rho$  du centre est :

$$\begin{aligned} D(y) \cdot ds &= D(\rho \sin \theta + y_0) \cdot \rho \cdot d\rho \cdot d\theta \\ &= f(\rho \cdot \sin \theta) \cdot \rho \cdot d\rho \cdot d\theta \end{aligned}$$

et la dose moyenne sur la couronne comprise entre les cercles de rayons  $\rho$  et  $\rho + d\rho$  est :

$$\begin{aligned} \bar{D}(\rho) &= \frac{\int_0^{2\pi} f(\rho \sin \theta) \rho \cdot d\rho \cdot d\theta}{\int_0^{2\pi} \rho \cdot d\rho \cdot d\theta} \\ \bar{D}(\rho) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\rho \sin \theta) d\theta. \end{aligned}$$

Pour que l'irradiation soit homogène il faut que cette intégrale soit indépendante de la distance au centre  $\rho$ .

Quelle que soit la fonction  $f(\rho \sin \theta)$  on peut la développer en série. Or les intégrales des puissances impaires de  $\sin \theta$  sont nulles entre 0 et  $2\pi$  tandis que celles des puissances paires ne le sont pas.

Pour que l'intégrale remplisse la condition ci-dessus il suffit donc que  $D(y)$  soit de la forme :

$$D(y) = \sum_{i=0}^n a_i \cdot (\rho \sin \rho)^{2i+1} = \sum_{i=0}^n a_i \cdot (y - y_0)^{2i+1}.$$

Ceci signifie que le point d'ordonnée  $y_0$  est un centre de symétrie de la courbe de variation de la dose le long d'une direction perpendiculaire aux isodoses.

Hors le cas où tous les coefficients  $a_i$  sont nuls pour  $i > 1$ , ceci ne peut être réalisé si la courbe ne présente pas un point d'inflexion. En pratique la courbe  $D(y)$  possède rarement un point d'inflexion et ne peut presque jamais être divisée en deux parties symétriques l'une de l'autre.

Par la suite la seule possibilité est de placer l'échantillon dans une zone où la courbe  $D(y)$  est très voisine d'une droite. La position du centre de l'échantillon sera déterminée par les dimensions de la région utilisable du faisceau, tout l'échantillon devant être contenu dans la zone où  $D(y)$  remplit la condition ci-dessus.

La dose moyenne sur la face avant sera alors :

$$\bar{D} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [a_0 + a_1 \cdot \rho \sin \theta] d\theta = a_0 = D(y_0)$$

qui est la dose au centre.

Une mesure de la dose sur l'axe de l'échantillon donnera donc la dose moyenne reçue par la face avant.

### 1.3. VITESSE DE ROTATION DE L'ÉCHANTILLON

Pour que la distribution de la dose reçue pendant la durée totale de l'irradiation soit homogène, il faut, puisqu'elle l'est pour un tour de l'échantillon autour de son axe, que le nombre de tours effectués soit entier. Si ceci n'est pas réalisé, l'inhomogénéité relative de distribution de la dose sera d'autant plus faible que le nombre de tours complets effectués sera plus grand.

Il y a donc intérêt à utiliser la vitesse de rotation la plus élevée possible, la limite étant fixée par le type d'échantillon, les animaux de laboratoire, par exemple, ne pouvant être soumis à des rotations très rapides.

Cependant, si ceci est vrai dans le cas des faisceaux continus, une nouvelle limitation apparaît dans celui des faisceaux pulsés à faible fréquence de répétition, ceux à fréquence élevée pouvant pratiquement être assimilés à des faisceaux continus. Il faut alors éviter que la fréquence de rotation soit un harmonique de la fréquence de répétition de l'accélérateur ou même qu'elle en soit voisine. Dans ce cas un compromis doit donc être trouvé entre une vitesse élevée pour assurer un grand nombre de tours durant l'irradiation et une vitesse inférieure à la pulsation du faisceau.

Ainsi, lors des expérimentations biologiques effectuées dans le faisceau de protons de 3 GeV extrait du Synchrotron Saturne dont la fréquence de répétition est de 12 impulsions par minute, l'animal à irradier, rat ou souris, tourne à la vitesse de 3 tours par minute. Entre deux impulsions l'animal effectue un quart de tour, ce qui assure une bonne répartition même dans le cas d'irradiations à faible dose. En effet, l'inhomogénéité due à une révolution non terminée dépend

des valeurs extrêmes de la dose suivant un diamètre de l'animal dans la direction normale aux isodoses.

Si l'animal est petit (rat, souris, irradiés en long dans le faisceau) l'écart entre ces valeurs reste faible.

Avec des animaux de section plus importante, il faut augmenter l'étalement du faisceau pour obtenir une région à isodoses parallèles de dimensions transversales suffisantes. Cet étalement ayant pour effet de diminuer le débit de dose moyen dans le faisceau, conduit à augmenter le temps d'irradiation pour une même dose, donc le nombre de tours effectués. Par suite lorsque les valeurs extrêmes de la dose le long de la normale aux isodoses s'écartent, le nombre de révolutions de l'animal augmente et l'importance relative d'une révolution non terminée reste faible.

#### 1.4. STABILITÉ DU CHAMP DE RAYONNEMENT OBTENU

Si la position verticale des faisceaux de particules extraits des accélérateurs de haute énergie est très stable car fixée par le plan horizontal de l'orbite d'équilibre, il n'en est pas de même de la position radiale dans le plan horizontal, particulièrement difficile à maintenir fixe. Or une déviation horizontale infime du point d'impact sur la fenêtre d'éjection peut se traduire, si l'emplacement de l'irradiation est situé loin de la fenêtre, par un écart beaucoup plus grand.

Lors des expérimentations biologiques effectuées au Synchrotron Saturne, on a remarqué une oscillation de la position radiale avec une longue période (plusieurs heures) et dont l'amplitude maximale peut atteindre plusieurs centimètres. Afin d'éviter une perturbation de la distribution de la dose durant une même expérience, on choisit de défocaliser le faisceau de manière à ce que la direction des isodoses dans la zone utile soit parallèle au plan horizontal. Généralement cette zone présente une largeur dans ce plan nettement supérieure à sa hauteur, donc au diamètre de l'échantillon.

Afin de s'assurer que lors de la déviation du faisceau les limites de la zone utile ne sont pas atteintes, on place de part et d'autre d'un maximum et sur une même horizontale, deux chambres d'ionisation. Ainsi lors d'une déviation, leurs indications varient en sens inverses. On calcule, à partir des courbes isodoses, la variation maximale qui peut être autorisée au rapport de leurs indications pour que l'irradiation reste homogène. Lorsque cet écart maximal est atteint, il suffit de corriger les paramètres de l'accélération pour ramener le faisceau en position.

#### 1.5. CAS PARTICULIER DE L'IRRADIATION DES FANTÔMES

Lorsque l'on étudie la variation de la dose avec la profondeur dans un fantôme, on déplace généralement le détecteur, chambre d'ionisation par exemple, le long d'un axe normal à la face avant du fantôme. Si celui-ci est un volume de révolution autour de cet axe, il est facile de montrer qu'on obtiendra une distribution équivalente à une distribution homogène, si le fantôme est placé dans une zone du faisceau dans laquelle la dose présente un gradient nul suivant une direction et un gradient constant suivant une direction perpendiculaire (isodoses rectilignes, parallèles et équidistantes). La dose le long de l'axe est due en effet aux protons

primaires d'une part, et aux particules secondaires produites dans le volume du fantôme d'autre part. La dose sur l'axe correspondant à ces particules secondaires est la somme des contributions élémentaires des cylindres creux de rayons  $r$  et  $r + dr$ . Par suite, la distribution de la dose sur la face avant sera équivalente à une distribution homogène, si la dose moyenne sur la section avant de chaque cylindre élémentaire est constante quel que soit le rayon  $r$ . Le calcul est exactement le même que celui fait ci-dessus, la symétrie de révolution remplaçant la rotation de l'échantillon. Alors la dose moyenne sur une couronne de rayons  $r$  et  $r + dr$  est indépendante de  $r$  et égale à la dose au centre.

## II - ÉTUDE DE LA DOSE EN PROFONDEUR AU MOYEN DE FANTOMES

### 2.1. BUT DE L'ÉTUDE

L'étude des variations de la dose absorbée en profondeur dans un fantôme est particulièrement nécessaire lorsqu'au cours d'expérimentations biologiques on a choisi d'étudier non pas l'effet des particules de haute énergie sur l'ensemble de l'organisme mais un dommage spécifique d'un organe déterminé. En effet celui-ci n'est pratiquement jamais en surface, mais à une profondeur où la dose est plus élevée du fait de la contribution des particules secondaires créées au cours du développement de la cascade nucléaire.

En outre, même lors des expérimentations portant sur l'effet sur un organisme entier, il est utile de connaître la répartition de la dose à l'intérieur du corps, d'autant plus que la dose en surface n'est pas toujours une référence satisfaisante ainsi que nous le verrons plus loin. Ceci est particulièrement nécessaire lorsqu'il s'agit d'une irradiation accidentelle de personnel par un faisceau de haute énergie.

La variation de la dose avec la profondeur lors d'irradiation par des particules de haute énergie a été étudiée théoriquement et expérimentalement [1], [3], [4], [5] par divers auteurs. Les résultats des calculs faits par H. WRIGHT [6], [7] sont intéressants car il a considéré un fantôme de dimensions latérales infinies, irradié par un faisceau parallèle de protons de haute énergie jusqu'à 2 GeV. Ceci nous permettra de comparer ses résultats théoriques avec nos résultats expérimentaux, le cas examiné théoriquement étant la limite vers laquelle nous tendrons en augmentant le diamètre des fantômes.

Nous avons remarqué au cours d'expériences préliminaires que les dimensions transversales relatives du fantôme et du faisceau ont une grande influence sur l'allure de la variation de la dose avec la profondeur. La mesure de cette variation, dans un fantôme de diamètre arbitraire et avec une distribution inconnue de la dose sur la face avant, est difficile à interpréter; il est nécessaire non seulement de connaître la répartition de la dose dans la section du faisceau mais surtout de la modifier pour obtenir une distribution homogène.

### 2.2. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Afin d'obtenir une meilleure connaissance des lois de variation du facteur d'accumulation de la dose à l'intérieur d'un échantillon biologique irradié, l'étude

a été effectuée dans des fantômes cylindriques de différents diamètres irradiés dans le faisceau qui sera étudié au paragraphe suivant.

Ces fantômes devant être en matériau équivalent au tissu biologique et permettre le déplacement facile, si possible par commande à distance, d'une chambre d'ionisation, on a choisi un équivalent-tissu liquide, l'état liquide est en effet pratiquement le seul permettant de réaliser un matériau de composition identique à celle des tissus mous.

TABLEAU I  
COMPOSITION DU MÉLANGE ÉQUIVALENT-TISSU ET DES TISSUS MOUS DE L'ORGANISME

Éléments	Composition pondérale élémentaire		Composition pondérale moléculaire de l'équivalent-tissu (%)
	Tissus mous de l'organisme (%)	Equivalent-tissu (%)	
H	10,2	10,1	
C	12,3	12,2	eau ..... 65
O	72,9	74,1	glycérine ..... 27,5
N	3,5	3,5	urée ..... 7,5
Divers	1,1	—	

Le mélange utilisé, dont la composition est comparée (tableau I) à celle des tissus mous de l'organisme, est contenu dans des cylindres de plexiglass possédant, selon une génératrice, une ouverture permettant le passage de la chambre d'ionisation. Cette chambre de volume 0,6 cm<sup>3</sup> est celle fabriquée par BALDWIN pour l'appareil IONEX, mais la paroi de chambre en Tufnol a été remplacée par une paroi de 60 mg.cm.1 en mélange polyéthylène-fluorure de magnésium [8], [9] afin de réaliser une meilleure équivalence aux tissus.

Le déplacement de la chambre d'ionisation était obtenu par un dispositif pas à pas permettant, selon le réglage fait à l'avance, de commander à distance des déplacements par pas de 5 à 40 mm. Ceci avait l'avantage de ne pas nécessiter un arrêt de l'accélération pour changer la position de la chambre et de donner une bonne reproductibilité des mesures.

Une deuxième chambre de même type que la précédente mais ayant conservé sa paroi d'origine en Tufnol, était placée dans l'air à 50 cm en avant du fantôme et servait de moniteur.

### 2.3. CONDITIONS DE L'IRRADIATION - ÉTUDE DU FAISCEAU

L'emplacement de l'irradiation, imposé par les expériences déjà implantées sur le faisceau extrait du Synchrotron Saturne était situé à 18 mètres environ de la sortie de l'aimant d'éjection et à 2,20 mètres en arrière du dernier quadrupole de focalisation.

Il n'a pas été possible d'obtenir à cette courte distance du système d'éjection un faisceau de protons de 3 GeV ayant une région à isodoses parallèles de surface suffisante pour y placer un fantôme de diamètre atteignant 20 cm. Le faisceau

utilisé présentait deux maximums à une distance de 20 cm l'un de l'autre. Les courbes isodoses affectaient une forme presque rectangulaire mais la courbe de variation de la dose, suivant une perpendiculaire aux grands côtés du rectangle, présentait un maximum au centre, alors que sur la direction parallèle à celles-ci on trouvait un minimum.

Afin de vérifier si, malgré cet aspect tourmenté, ce faisceau permettait de se rapprocher des conditions de l'irradiation homogène d'un fantôme, on a tracé la courbe de variation en fonction du rayon  $\rho$ , de la dose moyenne sur une couronne de rayons  $\rho$  et  $\rho + d\rho$ , ayant même centre que le fantôme, celui-ci ayant été fixé par des considérations de symétrie dans le tracé des isodoses :

$$\bar{D}(\rho) = \frac{\int_0^{2\pi} D(\rho, \theta) \cdot \rho \cdot d\rho \cdot d\theta}{\int_0^{2\pi} \rho \cdot d\rho \cdot d\theta} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} D(\rho, \theta) \cdot d\theta.$$

La variation de  $\bar{D}(\rho)$  est représentée sur la figure 2.

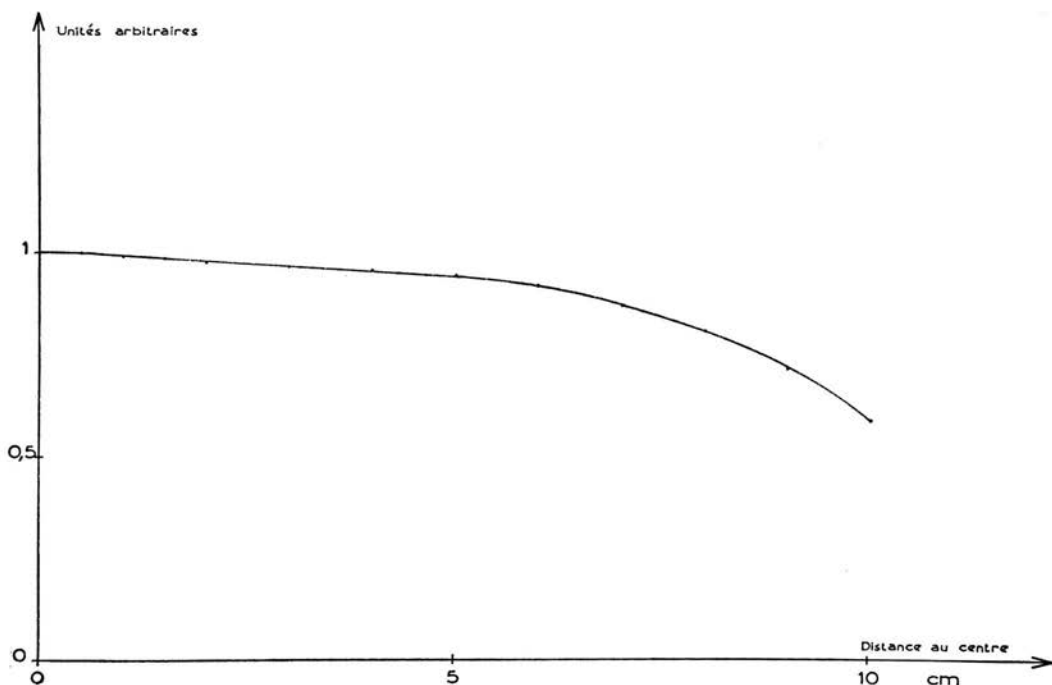


FIG. 2. — Variation de la dose absorbée moyenne le long du rayon de la face d'entrée des fantômes placés dans le faisceau de protons de 3 GeV.

Il apparaît que la dose sur les bords extérieurs des fantômes de rayons 2,5, 7,5 et 10 cm est respectivement 97 %, 84 % et 59 % de sa valeur au centre. Cependant en intégrant cette courbe, on trouve que la dose moyenne reçue par le petit fantôme et par les couronnes comprises entre les rayons 2,5 et 7,5 cm d'une part, 7,5 et 10 cm d'autre part, représente respectivement 98,5 %, 92,5 % et 73 % de la dose au centre. Cette inhomogénéité dans la distribution de la dose diminue donc la contribution à la dose sur l'axe des volumes de matière situés les plus loin de l'axe.

Un problème particulièrement important dans ce genre d'expériences est l'alignement des fantômes dans le faisceau, leurs axes devant être rigoureusement parallèles si l'on veut pouvoir invoquer la symétrie de révolution du fantôme. La méthode utilisée est extrêmement simple et conduit à un alignement très précis. Le centre de la face avant du fantôme étant placé à l'endroit déterminé par l'étude du faisceau, et le fantôme étant grossièrement aligné dans l'axe des quadripoles de focalisation, on fixe provisoirement sur les faces avant et arrière, suivant un diamètre vertical, un fil de cuivre de diamètre 1 mm environ. Une plaque sensible du type à développement instantané est placée à une distance connue en arrière du fantôme; nous avons utilisé une plaque POLAROÏD placée à 80 cm en arrière. Après irradiation pendant un temps qui dépend de la sensibilité de la plaque et du débit de dose dans le faisceau (pour la plaque Polapan type 52 il faut une dose de 10 rads environ), on obtient une image portant les ombres des deux fils de cuivre. Connaissant l'écartement des images des deux fils et les distances entre les faces du fantôme et la photo, un calcul simple donne la distance dont il faut déplacer le centre de la face arrière en faisant tourner le fantôme autour du diamètre vertical de la face avant. Le sens du déplacement est connu si l'on a identifié les deux ombres sur la photo, ce qui est facile si si les deux fils de cuivre sont par exemple de longueur différente. Une seconde photo permet de vérifier que l'alignement est bien obtenu et on peut alors enlever les fils. L'alignement dans l'autre plan est réalisé au moyen d'un niveau d'eau, le faisceau ne sortant pas du plan horizontal de l'orbite d'équilibre du synchrotron.

#### 2.4. RÉSULTATS

On a tracé, figure 3, les courbes de variation, en fonction de la profondeur, du facteur d'accumulation de la dose absorbée dans les fantômes de divers diamètres. Le facteur d'accumulation est défini comme le rapport qui existe dans un milieu donné entre la dose absorbée mesurée avec un faisceau large et celle mesurée avec un faisceau infiniment étroit. Lorsque le milieu considéré est un matériau équivalent aux tissus, il revient au même de définir ce facteur comme le rapport entre les doses absorbées dans un échantillon mince d'équivalent-tissu placé dans un fantôme, puis dans l'air, avec un même faisceau large. Ici, l'échantillon mince étant constitué par la chambre d'ionisation elle-même dont la paroi a une épaisseur de  $60 \text{ mg/cm}^2$  (soit 0,5 mm), le facteur d'accumulation est le rapport entre la dose en un point des fantômes et la dose dans l'air à l'emplacement de la face avant du fantôme en l'absence de celui-ci. Les mesures ont été faites d'abord dans le fantôme de diamètre 20 cm vide (courbe 1) afin d'étudier la variation dans le faisceau lui-même. L'extrapolation de la partie rectiligne de la courbe vers la gauche permet de connaître la dose dans l'air à l'emplacement

de la face avant du fantôme lorsque celui-ci est enlevé. L'influence de la paroi avant disparaît en effet après 2 cm environ et on peut négliger celle des parois minces situées à 10 cm de part et d'autre de la chambre. Toutes les valeurs ont ensuite été rapportées à celle de la dose dans l'air à l'emplacement de la face avant, prise égale à 1. La légère remontée observée au fond du fantôme (courbe 1) est due à la présence de la paroi arrière de celui-ci. Les courbes 2, 3 et 4 représentent les variations de la dose dans les fantômes de diamètres respectifs 20 cm, 15 cm et 5 cm, remplis de liquide équivalent-tissu.

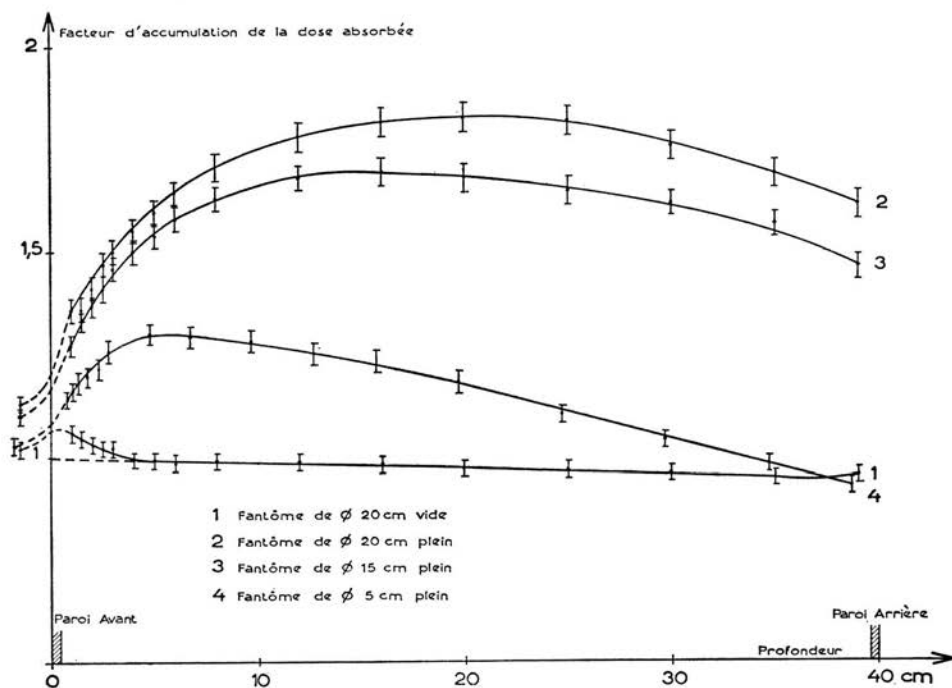


FIG. 3. — Variation du facteur d'accumulation de la dose absorbée avec la profondeur dans les fantômes placés dans le faisceau de protons de 3 GeV.

## 2.5. DISCUSSION

Il apparaît immédiatement que pour un même faisceau conduisant à une irradiation quasi homogène, l'influence du diamètre du fantôme est extrêmement importante. Le coefficient d'accumulation maximal varie en effet de 1,3 pour celui de diamètre 5 cm à 1,83 pour celui de diamètre 20 cm. Or le défaut d'homogénéité de distribution de la dose visible sur la courbe de la figure 2 n'est sensible qu'à partir d'un rayon de 6 cm; si l'irradiation avait été parfaitement homogène, la contribution des bords des fantômes de grand diamètre aurait été plus forte et le facteur d'accumulation maximal plus élevé.

H. WRIGHT et collaborateurs [6] [7] ont considéré un fantôme de composition identique à celle des tissus et de dimensions latérales infinies irradié par des

protons de 2 GeV, et calculé la dose absorbée totale dans chaque tranche de fantôme d'épaisseur unité limitée par deux plans perpendiculaires à la direction du faisceau. Le facteur d'accumulation varie depuis 1,3 environ à 0,5 cm de profondeur jusqu'à 3 à 30 cm, profondeur maximale explorée. L'allure de la courbe permet de penser que le facteur d'accumulation continue à croître très lentement après 30 cm.

Calculer la dose moyenne totale pour un proton incident dans chaque tranche d'épaisseur unité d'un fantôme de dimensions latérales infinies, revient à calculer la dose en un point quelconque de chaque tranche lorsque le fantôme est irradié par un faisceau de dimensions latérales également infinies. C'est donc la limite vers laquelle tendraient nos résultats si l'on augmentait indéfiniment le diamètre du fantôme et du faisceau. Ceci explique la différence entre les facteurs d'accumulation maximaux obtenus et montre bien également qu'avec des fantômes de diamètre supérieur la valeur expérimentale eût été supérieure.

Une remarque intéressante concerne la position du maximum du facteur d'accumulation : il apparaît en effet sur les trois courbes 2, 3 et 4 que ce maximum est situé à une profondeur égale au diamètre du fantôme. Ceci avait déjà été remarqué lors d'une expérience préliminaire avec des fantômes solides et restait vrai tant que le faisceau même produisant une irradiation assez inhomogène avait un diamètre supérieur à celui du fantôme. Cependant, dans cette expérimentation, le coefficient d'accumulation maximal trouvé était nettement inférieur, à diamètre identique, à celui obtenu dans la présente expérience.

La dose dans l'air à faible distance de la face avant des fantômes a également été mesurée au moyen d'une troisième chambre d'ionisation identique à celle utilisée comme moniteur. Connaissant le rapport des sensibilités de cette chambre et de celle placée dans le fantôme, on a pu exprimer les valeurs trouvées comme mesurées par cette dernière. Les valeurs correspondantes du coefficient d'accumulation ont été portées sur la figure 3.

Il apparaît immédiatement que ces valeurs diffèrent avec le diamètre du fantôme et qu'il est donc préférable d'exprimer le coefficient d'accumulation dans le fantôme par rapport à la dose dans l'air sans fantôme plutôt qu'avec fantôme, et ceci d'autant plus que la dose devant le fantôme varie avec la distance. En outre il n'est pas possible de faire une mesure en surface même du fantôme, la valeur trouvée variant d'ailleurs avec le diamètre de celui-ci.

### III - CONCLUSIONS

Une irradiation équivalente à une irradiation homogène peut être réalisée dans un faisceau de particules de haute énergie présentant, dans une région de dimensions suffisantes pour y placer l'échantillon ou l'organisme à irradier, un gradient de dose nul suivant une direction et constant suivant la direction perpendiculaire. L'échantillon doit en outre être animé d'une rotation autour d'un axe parallèle à celui du faisceau, de vitesse convenablement choisie. Dans le cas particulier d'irradiation de fantômes, cette rotation est inutile.

Cependant il apparaît que même dans un faisceau présentant un aspect assez différent du faisceau idéal défini ci-dessus, une irradiation presque homogène peut être obtenue. La position du centre du fantôme n'est pas quelconque et

ne peut être fixée par une étude théorique; seul un examen des courbes isodoses permet de la choisir.

Le coefficient d'accumulation maximal de la dose absorbée croît rapidement avec le diamètre du fantôme, ce qui indique que pour une même dose dans l'air, une irradiation homogène produira, à profondeur identique, une dose absorbée nettement plus importante dans un organisme de grandes dimensions que dans un petit organisme. Il est donc nécessaire à chaque fois, qu'il s'agisse d'expérimentations ou de dosimétrie consécutive à un accident d'irradiation, de mesurer la dose effectivement reçue en profondeur par l'organisme irradié.

L'auteur exprime ses remerciements à MM. J.C. BROCHEN, L. PAGÈS, H. QUECHON, pour leur participation à la préparation et la réalisation de l'expérimentation et à l'exploitation des résultats.

#### BIBLIOGRAPHIE

- [1] AFANASIEV, V.P., KEIRIM MARKUS, I.B., KUZNETZOVA, S. — Création et étude des champs de dose pour l'irradiation d'animaux de laboratoire par des protons de haute énergie. Brookhaven, 7-11 octobre 1963 - AIEA SM/44-58. Traduction CEA R. 1849.
- [2] LEGEAY, G. et Coll. — Dosimétrie des protons de haute énergie par mesure du Beryllium-7 formé dans les tissus. Symposium on personnel dosimetry for radiation accidents. AIEA, Vienne, 1965.
- [3] SKLAVENITIS, L. — Rapport CEA, R. 3376.
- [4] PHILLIPS, L.F., KING, R.J., COWAN, F.P. — *Nucléonics*, 1963, 21, n° 12, p. 55-58.
- [5] WHEELER, R.V. — *Health Physics*, 1966, 12, p. 653-61.
- [6] WRIGHT, H. et Coll. — Calculation of Radiation Dose due to high energy protons. 1<sup>er</sup> congrès de l'IRPA, Rome, septembre 1966.
- [7] WRIGHT, H. — Communication privée (correction aux résultats de [6]).
- [8] BETCHEN, G., JOFFRE, H. — Brevet d'invention n° 1360 381 du 28 mars 1963.
- [9] DE KERVILER, H., PAGÈS, L., TARDY-JOUBERT, Ph. — Rapport CEA R 2833, 1965.