Étude des dépôts d'énergie d'un faisceau de particules alpha de 600 MeV dans les tissus

C. JACQUOT (*)

(Manuscrit reçu le 23 septembre 1976)

RÉSUMÉ

Ce travail concerne la propagation complète, simulée sur ordinateur, d'un faisceau de particules α dans les tissus. Les données nécessaires, paramètres d'absorption élastique et inélastique, sont mesurées dans une expérience utilisant des gélatines et des plaques nucléaires.

ABSTRACT

The complete propagation of an alpha-particle beam in tissues was simulated on computer. The elastic and inelastic absorption parameters were determined by an experiment using gelatine and nuclear plates.

I. — INTRODUCTION

PROBLÈMES DE LA MICRODOSIMÉTRIE DANS LES FAISCEAUX LOURDS IONISANTS THÉRAPEUTIQUES

Afin de prévoir et de comprendre l'action d'un faisceau de particules ionisantes sur des tissus, il est nécessaire de connaître, en tout point des tissus irradiés et dans leur voisinage, la distribution des énergies communiquées aux

---

(*) Université Louis-Pasteur, Strasbourg, Service d'Application des Détecteurs visuels, Centre de Recherches nucléaires, 67037 Strasbourg Cedex.

cellules, noyaux, sous-noyaux (équivalent ADN) en fonction de la position de ces cellules dans le faisceau, ces énergies étant déposées par les particules du faisceau primaire et les produits des réactions nucléaires.

Les réactions nucléaires sont, en effet, essentielles dans certains faisceaux; ainsi, dans un faisceau de particules alpha de 600 MeV incident, si l'on considère une section efficace totale de l'ordre du barn, on obtient que sur 10 particules incidentes, 8 feront une réaction nucléaire. Ceci produit donc une perte de fluence du faisceau et un dépôt différent de l'énergie; ainsi, un choc élastique alpha sur ^{16}O à 500 MeV peut produire un recul d'oxygène 8 fois ionisé de faible énergie et de très grand LET, c'est-à-dire que cette énergie est ensuite déposée sur quelques microns, donc entre quelques cellules seulement en un lieu où le faisceau lui-même est considéré comme peu ionisant.

Pour résoudre aussi correctement que possible le problème posé, nous avons recours à une technique et à une simulation très détaillées. En effet, la technique des émulsions et des gélatines, qui ont une composition très proche des tissus et permettent de donner les sections efficaces élastiques et inélastiques totales, voie par voie, conjuguée à la technique de simulation sur ordinateur, rend possible la prévision des distributions spatiales des énergies déposées dans des cellules en vraie grandeur.

Il est proposé ici de reconstituer complètement la progression du faisceau initial donné dans les tissus de composition donnée en tenant compte de :

- a) la perte d'énergie par ionisation due au faisceau;
- b) du contour initial du faisceau;
- c) de la distribution statistique du faisceau;
- d) des sections efficaces élastiques;
- e) des sections efficaces inélastiques;
- f) la perte du faisceau;
- g) la perte d'énergie par ionisation des fragments des réactions qui sont suivis jusqu'à leur arrêt complet;
- h) de la multiple diffusion;
- i) de la taille et de la constitution chimique des cellules.

II. — DESCRIPTION DES EXPÉRIENCES

Les expériences sont de deux types : la détermination, pour le milieu considéré, de l'absorption élastique totale et inélastique totale ainsi que la détermination des sections efficaces inélastiques détaillées par canaux pour quelques valeurs de l'énergie et pour les noyaux constituant du milieu.

DÉTERMINATION DES ABSORPTIONS ÉLASTIQUE ET INÉLASTIQUE EN FONCTION DE LA PROFONDEUR

Cette expérience a consisté à exposer au faisceau α de 600 MeV une barre de gélatine dont la densité est voisine de celle des tissus, c'est-à-dire dont l'humidité

est contrôlée. Cette barre est entrecoupée à intervalles réguliers, perpendiculairement à l'axe du faisceau, par des émulsions diluées en gélatine. Après exposition, les plaques sont développées par la méthode des températures et un comptage des traces du faisceau dans chacune des émulsions est effectué. Les traces du faisceau se distinguent des secondaires par leur direction qui est parfaitement perpendiculaire au plan d'observation. La différence des nombres ainsi comptés

FIG. 1. — Perte des faisceaux en fonction de l'épaisseur traversée.

dans 2 émulsions est fonction de l'absorption totale moyenne à l'endroit du bloc de gélatine qui les sépare. On obtient ainsi la variation en fonction de l'énergie ou de la profondeur de l'absorption totale dans la gélatine. Le nombre des étoiles relevées dans les émulsions normales et diluées permet, compte tenu du flux mesuré dans chaque plaque, d'extraire l'absorption inélastique. Ceci donne la variation en fonction de l'énergie de l'absorption inélastique dans la gélatine. L'absorption élastique est obtenue par différence de l'absorption totale et de l'inélastique.

La figure 1 représente les résultats obtenus de cette façon dans une irradiation faite au faisceau α de Saturne à 600 MeV. La courbe A donne la variation du nombre de particules du faisceau en fonction de l'épaisseur de gélatine traversée rapportée à de l'eau. Il est à noter qu'en raison de l'importance croissante de la multiple diffusion en fonction de l'épaisseur traversée, le critère de parallélisme des traces en fin de parcours, c'est-à-dire sur les derniers

millimètres, est de moins en moins valable, ce qui explique que sur les derniers millimètres le comptage ait pu inclure des secondaires comme l'indique la présence d'une queue avec rupture de pente (B) dans la courbe (A). L'interprétation de cette expérience faite verticalement par rapport au plan des

FIG. 2. — Absorption totale et absorption inélastique de faisceau.

plaques a pu être contrôlée par une expérience plus ancienne faite horizontalement dans des émulsions K 5 à Berkeley avec des particules α de 800 MeV.

La figure 2 représente l'absorption du faisceau incident dN/Ndx . La courbe A représente l'absorption totale en fonction de l'épaisseur traversée, cette courbe a été obtenue par différenciation de la courbe A de la figure 1. La courbe B de la figure 2 décrit l'absorption du faisceau par réactions inélastiques en fonction de l'épaisseur traversée et a été obtenue en comptant le nombre d'étoiles relevées dans les émulsions diluées. La différence de la courbe B à la courbe A rend compte de l'absorption élastique totale.

DÉTERMINATION DES SECTIONS EFFICACES INÉLASTIQUES TOTALES DES DIFFÉRENTS CANAUX

Des empilements d'émulsions nucléaires sont exposés au faisceau et présentent donc les cibles H, C, N, O. Une interaction nucléaire observée dans une émulsion après développement se présente au microscope comme un

FIG. 3 a. — Photographie d'un événement à 5 branches dans l'émulsion.

FIG. 3b. — Identification par l'ordinateur de la réaction dont l'étoile est photographiée sur la figure 3a.

ensemble de segments concourants : la trace incidente, les traces des ions sortant de la réaction. La figure 3 b montre un événement tel qu'il se présente dans l'émulsion.

Les mesures de section efficace à une énergie donnée consistent à relever tous les événements et à les mesurer dans la bande d'émulsion correspondant à la bande d'énergie donnée. Pour chaque événement, toutes les traces (la longueur et la direction) sont soigneusement mesurées. Ces mesures sont effectuées sur un microscope dont l'espace observé est digitalisé selon les 3 dimensions à raison de

15 digits par micron. La connaissance d'une étoile demande de nombreuses mesures; en effet, par trace, 8 pointés sont nécessaires; ces mesures doivent être contrôlées et leur suite logique doit être rigoureuse. Pour ces raisons, l'appareil est en ligne sur un ordinateur CDC 1700 qui, travaillant en temps réel, est utilisé

FIG. 4. — Les deux installations « Trico » en fonctionnement.

Deux installations « Trico » de mesures semi-automatiques à trois coordonnées de mesure des interactions nucléaires dans l'émulsion. L'ensemble est en ligne sur CDC 1700 pour la conduite l'intermédiaire de l'écran de visualisation (milieu de la figure) simultanément aux deux installations.

Sur les moniteurs TV, deux interactions ^4He sur noyaux légers à 100 MeV.

en conduite de processus, contrôle la vraisemblance et la dispersion des mesures et effectue le pré-traitement de la géométrie. La figure 4 présente une vue de ces instruments en fonction.

Chaque événement est ensuite identifié sur l'ordinateur qui, par une analyse combinatoire complète, tenant compte de toutes les cibles possibles, fait toutes les hypothèses de charges et de masses possibles. Les parcours sont alors convertis en énergies et le contrôle des conservations de masses, charges, énergies et quantités de mouvement est effectué pour chaque combinaison. Les programmes utilisés à cette identification sont adaptés de THRESH et GRIND du C.E.R.N. Lorsque plusieurs solutions sont compatibles, des ajustements cinématiques sont entrepris et des poids statistiques donnés en fonction de la difficulté de ces ajustements. La figure 3 *b* représente l'identification proposée par l'ordinateur en même temps que deux reconstitutions géométriques vues à 90° . La numération de chaque canal par bande d'énergie dépouillée donne la section efficace inélastique totale du canal. Ainsi, pour des particules α incidentes de 50, 100, 300 et 800 MeV, des dépouillements ont été partiellement publiés et le tableau I présente, à titre d'exemple, les sections efficaces totales α sur ^{12}C à 90 MeV.

TABLEAU I

EXEMPLE DE TABLEAU DE SECTION EFFICACE
OBTENUE PAR LA TECHNIQUE DES ÉMULSIONS

ALPHA ^{12}C (90 MeV)

REACTIONS	mb	REACTIONS	mb
$\alpha \alpha \alpha \alpha$	$44,0 \pm 6,1$	$t \text{ } ^6\text{Li} \text{ } ^7\text{Be}$	$0,75 \pm 0,39$
$n p \alpha \alpha \text{ } ^6\text{Li}$	$21,6 \pm 3,4$	$p d \text{ } ^{11}\text{B}$	$0,75 \pm 0,39$
$p t \alpha \alpha \alpha$	$20,7 \pm 3,2$	$^3\text{He} \text{ } ^6\text{He} \text{ } ^7\text{Be}$	$0,75 \pm 0,39$
$n p d \alpha \alpha \alpha$	$18,8 \pm 3,0$	$p d \text{ } ^6\text{He} \text{ } ^7\text{Be}$	$0,56 \pm 0,33$
$p \alpha \alpha \text{ } ^7\text{Li}$	$12,5 \pm 2,2$	$p p \text{ } ^7\text{Li} \text{ } ^7\text{Li}$	$0,56 \pm 0,33$
$d d \alpha \alpha \alpha$	$11,0 \pm 2,0$	$n \text{ } ^3\text{He} \text{ } ^6\text{Li} \text{ } ^6\text{Li}$	$0,56 \pm 0,33$
$n \alpha \alpha \text{ } ^7\text{Be}$	$10,6 \pm 1,9$	$p d t \text{ } ^{10}\text{B}$	$0,56 \pm 0,33$
$n \alpha \alpha \alpha \text{ } ^3\text{He}$	$10,4 \pm 1,9$	$p \text{ } ^3\text{He} \text{ } ^{12}\text{B}$	$0,56 \pm 0,33$
$d \alpha \alpha \text{ } ^6\text{Li}$	$9,7 \pm 1,8$	$^3\text{He} \text{ } ^6\text{Li} \text{ } ^7\text{Li}$	$0,56 \pm 0,33$
$n p p \alpha \text{ } ^9\text{Be}$	$7,3 \pm 1,5$	$d \text{ } ^7\text{Li} \text{ } ^7\text{Be}$	$0,56 \pm 0,33$
$n p \alpha \text{ } ^{10}\text{B}$	$7,1 \pm 1,4$	$p t \text{ } ^3\text{He} \text{ } ^9\text{Be}$	$0,37 \pm 0,27$
$d \alpha \text{ } ^{10}\text{B}$	$5,0 \pm 1,1$	$n p p d \text{ } ^{11}\text{B}$	$0,37 \pm 0,27$
$p \alpha \text{ } ^{11}\text{B}$	$4,7 \pm 1,1$	$p d \text{ } ^{13}\text{C}$	$0,37 \pm 0,27$
$p p \alpha \alpha \text{ } ^6\text{He}$	$4,5 \pm 1,1$	$t t \text{ } ^{10}\text{C}$	$0,37 \pm 0,27$
$n p d \text{ } ^{12}\text{C}$	$4,3 \pm 1,0$	$^3\text{He} \text{ } ^3\text{He} \text{ } ^{10}\text{Be}$	$0,37 \pm 0,27$
$p d \alpha \text{ } ^9\text{Be}$	$3,5 \pm 0,9$	$p \text{ } ^3\text{He} \text{ } ^6\text{He} \text{ } ^6\text{Li}$	$0,37 \pm 0,27$
$n p \text{ } ^3\text{He} \text{ } ^{11}\text{B}$	$3,2 \pm 0,9$	$p p d \text{ } ^{12}\text{B}$	$0,37 \pm 0,27$
$^3\text{He} \alpha \text{ } ^9\text{Be}$	$2,8 \pm 0,8$	$p p p \alpha \text{ } ^9\text{Li}$	$0,19 \pm 0,19$
$p p t \alpha \text{ } ^7\text{Li}$	$2,6 \pm 0,7$	$p t \text{ } ^6\text{Li} \text{ } ^6\text{Li}$	$0,19 \pm 0,19$
$p p t \text{ } ^{11}\text{B}$	$2,4 \pm 0,7$	$p d \text{ } ^6\text{Li} \text{ } ^7\text{Li}$	$0,19 \pm 0,19$
$\alpha \text{ } ^6\text{Li} \text{ } ^6\text{Li}$	$2,1 \pm 0,7$	$n d \text{ } ^6\text{Li} \text{ } ^7\text{Be}$	$0,19 \pm 0,19$
$d \alpha \text{ } ^3\text{He} \text{ } ^7\text{Li}$	$1,5 \pm 0,6$	$n \text{ } ^3\text{He} \text{ } ^3\text{He} \text{ } ^9\text{Be}$	$0,19 \pm 0,19$
$n p p \text{ } ^{13}\text{C}$	$1,3 \pm 0,5$	$n d \text{ } ^3\text{He} \text{ } ^{10}\text{B}$	$0,19 \pm 0,19$
$d t \text{ } ^{11}\text{C}$	$1,3 \pm 0,5$	$n p p p \text{ } ^{12}\text{B}$	$0,19 \pm 0,19$
$d \text{ } ^3\text{He} \text{ } ^{11}\text{B}$	$1,1 \pm 0,5$	$p p d \text{ } ^6\text{He} \text{ } ^6\text{Li}$	$0,19 \pm 0,19$
$p t \text{ } ^{12}\text{C}$	$1,1 \pm 0,5$	$n p t \alpha \text{ } ^7\text{Be}$	$0,19 \pm 0,19$
$d t \alpha \text{ } ^7\text{Be}$	$1,1 \pm 0,5$	$n p p \text{ } ^3\text{He} \alpha \text{ } ^6\text{He}$	$0,19 \pm 0,19$
$p p \alpha \text{ } ^{10}\text{Be}$	$1,1 \pm 0,5$	$n p p \text{ } ^6\text{Li} \text{ } ^7\text{Li}$	$0,19 \pm 0,19$
$n p \text{ } ^3\text{He} \alpha \text{ } ^7\text{Li}$	$0,93 \pm 0,43$	$p d d \alpha \text{ } ^7\text{Li}$	$0,19 \pm 0,19$
$n p t \text{ } ^{11}\text{C}$	$0,93 \pm 0,43$	$n d d \text{ } ^{11}\text{C}$	$0,19 \pm 0,19$
$t \text{ } ^3\text{He} \alpha \text{ } ^6\text{Li}$	$0,93 \pm 0,43$	$n p p t \text{ } ^{10}\text{B}$	$0,19 \pm 0,19$
$n p \text{ } ^7\text{Li} \text{ } ^7\text{Be}$	$0,93 \pm 0,43$	$p p p t t \text{ } ^7\text{Li}$	$0,19 \pm 0,19$
$t \text{ } ^3\text{He} \text{ } ^{10}\text{B}$	$0,93 \pm 0,43$	$d d \text{ } ^{12}\text{C}$	$0,19 \pm 0,19$
$p \text{ } ^6\text{Li} \text{ } ^7\text{Be}$	$0,93 \pm 0,43$		

III. — PRÉVISION DES DISTRIBUTIONS SPATIALES D'ÉNERGIE PAR CELLULE, NOYAU, SOUS-NOYAU

PRINCIPE DE LA RECONSTITUTION DE LA PROPAGATION DU FAISCEAU

On considère, sur ordinateur, un faisceau progressant dans la direction Ox par progressions élémentaires dx . Soit en x_k un nombre N_k de particules incidentes, dans une progression élémentaire dx ; l'absorption élastique et l'absorption inélastique nous donnent les nombres dN_{e_k} et dN_{i_k} , nombres de réactions respectivement élastiques et inélastiques à prévoir sur cet intervalle dx . Les nombres de réactions inélastiques à prévoir dans les différentes voies de sortie sont proportionnels aux sections efficaces inélastiques totales et leur somme sur l'ensemble des voies égales à dN_{i_k} . La perte de faisceau est ainsi $dN_k = dN_{e_k} + dN_{i_k}$ et dans la progression élémentaire suivante, le nombre de particules incidentes devient $N_{k+1} = N_k - dN_k$, ainsi de suite, compte tenu de la perte d'énergie par ionisation du faisceau.

PRINCIPE DE GÉNÉRATION DES RÉACTIONS NUCLÉAIRES

Soit à générer entre les abscisses x_k et x_{k+1} une réaction particulière. La position du noyau cible est tirée au hasard dans l'élément de volume $S(x_{k+1} - x_k)$ où S est la section droite du faisceau. La génération de l'événement est confiée au sous-programme FOWL du C.E.R.N., programme de génération d'espace de phase qui produit tout événement d'équation particulière donnée en respectant l'ensemble des lois de conservation de la cinématique.

ENREGISTREMENT DES DÉPÔTS D'ÉNERGIE

On définit quelques plans P_p de référence perpendiculaires au faisceau sur lesquels on définit une monocouche de cellules. Chacune de ces cellules est définie par ses coordonnées et par son volume.

Soit un fragment i d'une réaction générée R . Ce fragment a une charge Z_i , une masse A_i , une énergie E_i et une direction $\vec{V}_i$. La conversion de l'énergie E_i en parcours R_i , compte tenu des coordonnées du centre de la réaction X_R, Y_R, Z_R , donne les coordonnées du point d'arrêt X_i, Y_i, Z_i de ce fragment. Les relations de parcours énergie utilisées sont celles de BARKAS-BENTON programmées. Les coordonnées des intersections de la trace i avec un des plans de référence P_p désignent l'objet touché (cellule, noyau, ADN). Le dépôt d'énergie dans cet objet est calculé compte tenu de l'énergie résiduelle de l'ion en ce point, du point d'impact et de la longueur de traversée. L'énergie déposée par cet ion dans l'objet est additionnée à la quantité d'énergie déjà précédemment reçue par cet objet.

SORTIE DES RÉSULTATS

Lorsque la progression du faisceau, par suite des interactions et de la perte complète de l'énergie par ionisation, arrive à son terme, le contenu de chaque

plan de référence (plan de coupe) est imprimé sous forme de diagramme à deux dimensions représentant la distribution spatiale et quantitative des énergies totales reçues par les objets considérés. Dans ces diagrammes, sont également visibles, aux différents plans de référence, les déformations des contours du faisceau dues aux multiples diffusions et aux secondaires. Ici, dans l'étude d'un faisceau de densité uniforme et de section infinie, ces diagrammes spatiaux présentent moins d'intérêt et ne sont donc pas présentés. Ces diagrammes sont, cependant, absolument indispensables dans le cas de traitements très localisés, en neurologie par exemple. D'autres représentations consistent à présenter pour chaque plan référence, soit l'histogramme du nombre des objets (cellules noyaux, etc.) en fonction des énergies reçues et cumulées, soit l'histogramme du nombre des dépôts d'énergie au coup par coup en fonction de l'énergie déposée dans ces coups. C'est par ces deux types de distribution que nous présentons les résultats de ce calcul dans la figure 5.

IV. — RÉSULTATS

La figure 5 représente en dix plans de coupe la situation dosimétrique d'un faisceau α de 600 MeV, de 10^6 particules par centimètre carré, de dimensions transversales infinies se propageant dans des tissus de densité 1 et constitué de cellules simulées de $1 \mu\text{m}^3$ dont la composition en nombre d'atome est de 1 oxygène pour 2 hydrogène, spécifications définies par le Professeur Dutreix. Chaque plan de coupe est repéré par sa distance au plan d'entrée et pour chaque plan, la dosimétrie est faite sur 16 000 cellules. Toutes les représentations sont données en coordonnées logarithmiques et en kiloélectrons-volts.

La partie gauche représente la distribution des nombres de particules en fonction de l'énergie déposée dans une cellule simulée, particule par particule. Ainsi, dans la première distribution gauche, on peut voir le pic du faisceau culminant à 15 400 particules. La différence de ce pic à 16 000 (nombre de particules incidentes initiales) est égale au nombre de collisions produites dans le milieu compris entre ce plan et la face d'entrée. Ces collisions sont à l'origine des émissions de fragments secondaires dont l'action dans le plan considéré est donnée par tout le reste du spectre.

La partie droite de la figure 5 représente la distribution du nombre de cellules simulées en fonction de l'énergie accumulée par celles-ci. Ainsi, dans la première de ces distributions, nous pouvons voir que sur les 16 000 cellules que contient le plan, 5 902 cellules n'ont pas été touchées, ni par primaire, ni par secondaire (1^{er} pic), 5 668 ont été touchées une fois par le faisceau (2^e pic), 2 693 ont été touchées deux fois (3^e pic), 878 l'ont été trois fois (4^e pic), 215 l'ont été 4 fois (5^e pic). Le reste du spectre est dû à l'accumulation des énergies déposées par les fragments secondaires. Ces commentaires sont seulement indicatifs, étant donné que les cellules peuvent être évidemment touchées par primaire et secondaire à la fois. Le faisceau primaire considéré s'arrêtant après un parcours de 15.9 cm, il faut noter que les deux dernières distributions correspondent à des plans de cellules situées au-delà du traditionnel pic de Bragg.

FIG. 5. — Distribution des énergies déposées coup par coup et par cellule en fonction de la situation de la coupe.

La figure 6 reprend des distributions de droite de la figure 5, les cellules absolument non touchées (énergie 0) en fonction de la distance au plan d'entrée.

La figure 7 représente la sommation totale des dépôts d'énergie par plan. Cette sommation normalisée et représentée en trait plein est comparée aux résultats expérimentaux obtenus par mesures dosimétriques globales d'un faisceau identique par A. BRIDIER et P. FACHE [11].

FIG. 6. — Distribution, en fonction de la profondeur de coupe, des cellules absolument pas touchées (courbe A), des cellules touchées par le faisceau primaire 1 fois, 2 fois et 3 fois (courbes respectives B, C, D).

Les relatives grandes erreurs des points reportés sur la figure 7 sont dues au fait que pour seulement 16 000 particules incidentes les fluctuations statistiques par plan sur les quelques ions de grand TEL sont importantes comparées à l'énergie totale laissée dans ces plans. A ce sujet, la comparaison dans la figure 6 des distributions des grands TEL à 9,1 et 12,8 cm avec la position des points correspondants sur la figure 7 est particulièrement significative.

Dans le cadre des possibilités de vérifier globalement ce genre de simulation, outre les résultats dosimétriques que représente la figure 7, nous voyons deux possibilités : d'une part une simulation du compteur proportionnel de Rossi qui peut être comparée aux résultats expérimentaux correspondants, d'autre part la comparaison de la simulation et des résultats des plaques nucléaires quant au nombre de secondaires et leur distribution angulaire.

Sur le plan de la dosimétrie globale, le programme est très bien vérifié par l'expérience de A. BRIDIER et P. FACHE [11]; l'apport de la présente étude est la distribution des cellules simulées en fonction des énergies déposées et la distribution des fragments en fonction de l'énergie déposée. On peut voir, en effet, que si l'énergie globale déposée varie relativement peu (*fig. 7*), la façon dont cette énergie est répartie sur les cellules varie considérablement d'un plan à l'autre comme en témoigne la figure 6 malgré l'écrasement apparent dû aux échelles logarithmiques.

On a pu tester que la sensibilité de ce calcul à des fluctuations arbitraires des sections efficaces partielles est très faible; par contre, des fluctuations de l'absorption totale ont immédiatement des conséquences visibles sur l'énergie totale déposée par plan.

FIG. 7. — Comparaison de cette approche avec les mesures antérieures de A. BRIDIER et P. FACHE dans la dosimétrie globale.

Il est clair que de cette progression de faisceau on peut extraire une quantité d'autres informations, les distributions angulaires par exemple. Dans ce but, il a été créé, à l'exécution de ce programme, une bande magnétique qui donne la position de toutes les étoiles et tous les paramètres des fragments, nature, énergie, direction, et nous allons essayer de définir les études et améliorations possibles ayant pour base cette bande magnétique ou ce programme.

V. — EXTENSIONS

Il semble bien que cette technique de simulation soit appelée à être fréquemment utilisée en raison notamment de sa facilité d'emploi; en effet, une fois le programme construit et testé, il est possible de répondre à toutes autres conditions initiales; particule, flux, cellule, faisceau. L'exemple traité, par ses conditions exceptionnelles de simplicité, flux homogène, section droite de faisceau infinie, milieu réduit, cellule, n'est pas limitatif et l'on peut avoir, en un temps ne dépassant pas 5 minutes, la réponse à un flux non homogène de section quelconque et d'autres tailles de cellules.

La description macroscopique du porteur de cellules peut être, pour la propagation du faisceau, considérée dans toute sa complexité avec ses structures

osseuses, cavité respiratoire, etc. Il ne s'agit là, en fait, que d'analyse géométrique et il n'est pas impossible, par exemple, d'introduire dans ce calcul un des programmes de description morphologique de la N.A.S.A.

Les théories les plus élaborées sur l'action des particules ionisantes peuvent être introduites; par exemple, l'action de toutes les particules du faisceau incident et des particules secondaires pourrait être considérée en terme de la théorie du Professeur KATZ [3] plutôt qu'en simple dépôt d'énergie.

La cellule a été ici décrite assez succinctement et l'on pourrait tenir compte, par cellule, de plusieurs volumes d'efficacité biologique différente et corrélérer ensuite, ou simplement sommer par cellule, les dégradations biologiques des différentes parties, ADN, noyau, corps de cellule.

Il est possible que la réparation cellulaire puisse être abordée grossièrement, dans la situation actuelle, par l'introduction du temps et l'attribution aux cellules de différentes constantes de temps. Ces constantes permettraient de programmer, en première approximation, une réparation des effets probablement en fonction du temps, des doses absorbées elles-mêmes, et du débit de dose; ces constantes pourraient être aussi fonction de l'état de la cellule saine ou non, fonction également de traitements chimiques préalables modifiant la résistance à l'action des particules ionisantes. L'étude réelle de l'évolution de populations de cellules, comme le prévoit le Professeur DELATTRE [10], comparée à des simulations pourrait permettre, dans un début, d'ajuster ce genre de paramètres.

Enfin, on peut signaler que cette technique pourrait être utilisée pour d'autres faisceaux tels protons, π , neutrons et ions lourds.

Cette étude a été réalisée, à l'initiative de MM. Thevenet et Hamel du Département Saturne du C.E.A., au Service d'Application des Détecteurs visuels du Centre de Recherches nucléaires de Strasbourg, dirigé par M. François, et avec les encouragements du Professeur Dutreix. M^{mes} L. Girardin et C. Heilmann ont accepté de participer à l'expérience, M^{lle} M. Masson et M. D. Karamanoukian ont effectué les mesures et suivi les calculs qui ont été faits au Centre de Calcul de Strasbourg.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] KELLERER A. M., ROSSI H. H. The theory of dual radiation action. *Curr. Top. Radiat. Res.*, 1972, **8**, 85-158.
- [2] TOBIAS C. A., LYMAN J. T., LAWRENCE J. H. Some consideration of physical and biological factors in radiotherapy with high LET-radiation, including heavy particles, π mesons and fast neutron. *Progr. Atom. Med.*, (J. H. Lawrence, Ed.) New York, Grune and Stratton, 1971, **3**, 167-218.
- [3] KATZ R., SHARMA S. C. Response of cells to fast neutrons, stopped pions and heavy ion beams. *Nucl. Instr. Methods*, 1973, **111**, 83-116.
- [4] FAIN J., MONNIN M., MONTRET M. Spatial energy distribution around heavy-ion path. *Rad. Res.*, 1974, **57**, 379-389.

- [5] JACQUOT C. Mise en évidence par les réactions induites par des particules α de 70 et 90 MeV sur ^{12}C et ^{14}N de phénomènes de sous-structure permettant d'aborder l'étude de réactions d'éjections directes, l'étude du spin et de la parité des niveaux du ^{12}C dans les réactions et certains aspects spectroscopiques des noyaux de masse 4 produits dans ces réactions. Thèse n° 664, Université Louis-Pasteur, Strasbourg, 1971.
- [6] DUTREIX J. Les ions lourds et leur perspective d'application en biologie. *Ann. Phys. Biol. Méd.*, 1974, **8**, 187-220.
- [7] BARENDSEN G. W., WALTER H. M. D., FOWLER J. F., BEWLEY D. K. Effects of different ionizing radiation on human cells in tissue culture. 3 Experiments with Cyclotron-accelerated alpha-particles and deuterons. *Rad. Res.*, 1963, **18**, 106-119.
- [8] BLANC D., DUTREIX A., MATHIEU J. Physique de la radiothérapie, Paris, Presses Universitaires de France, 1974.
- [9] DELATTRE P. Systèmes de transformation à caractéristique temporelle et théorie des populations, Note DB/GEERSM, n° 48, 1974.
- [10] DELATTRE P. Systems approach of theoretical models in radiobiology and radiotherapy. *Int. J. Gen. Systems*, 1974, **1**, 105-117.
- [11] BRIDIER A., FACHE P. Étude dosimétrique et microdosimétrique de faisceaux de particules à transfert linéique d'énergie élevée, Rapport CEA-R-4655, 1975.