

Le dosage du rayonnement du bétatron et l'activité induit dans les tissus

Autor(en): **Joyet, G.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin der Schweizerischen Akademie der Medizinischen Wissenschaften = Bulletin de l'Académie Suisse des Sciences Medicales = Bollettino dell' Accademia Svizzera delle Scienze Mediche**

Band (Jahr): **8 (1952)**

Heft 5-6

PDF erstellt am: **23.06.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-307111>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Institut de Radiologie de l'Université de Zurich – Prof. Dr. H. R. Schinz
 Laboratoire du Bétatron et des Isotopes – P. D. Dr. G. Joyet

Le dosage du rayonnement du bétatron et l'activité induite dans les tissus¹

Par G. Joyet

1. Introduction

Dans le noyau, protons et neutrons sont liés par une énergie moyenne de 7 à 8 MeV qui apparaît sous la forme du défaut de masse. Dès que l'énergie du rayonnement X incident s'approche ou dépasse cette valeur, des neutrons ou des protons sont expulsés et un nouveau noyau apparaît qui peut être stable, ou, très souvent, radioactif. Avec la radiation de freinage dont l'énergie maximum se situe au voisinage de 30 MeV, on doit s'attendre à ce que la plupart des éléments de l'organisme soumis à une irradiation soient activés. Les éléments actifs se désintégreront ensuite, chacun avec sa période et sa forme propre de rayonnement. Ils libéreront dans les tissus une forme d'énergie qui n'est pas mesurée par la chambre d'ionisation qui définit l'intensité momentanée du faisceau X incident. Il importe de savoir si l'énergie supplémentaire libérée par la radioactivité induite est importante ou non relativement à l'absorption principale et directe d'énergie par les tissus. On sait que cette absorption directe s'effectue par effet Compton et formation de paires. Ce sont les longues trajectoires de 5 à 15 cm de parcours dans les tissus des électrons de recul et des électrons de paires qui donnent à la courbe de transition de l'intensité du rayonnement dans le fantôme sa forme particulière (G. Joyet et W. Mauderli [1]) si favorable à la thérapie des tumeurs profondes. L'intensité du faisceau X est alors définie comme l'intensité ionisante mesurée au maximum de la courbe de transition dans un fantôme équivalent aux tissus, à une distance cible-peau bien déterminée (75 ou 100 cm).

Parmi les matériaux facilement accessibles, nous avons choisi pour le fantôme du plexiglas $(\overset{|}{\text{C}}\text{H}_2-\overset{|}{\text{C}}\text{H}_2-\overset{|}{\text{C}}\text{OOCH}_3)_n$ dont le nombre d'électrons par gramme ($3,25 \cdot 10^{23}$) dont dépend l'effet Compton est à

¹ Un résumé allemand de cette étude a paru dans *Oncologia* 5, 1-12 (1952).

2% près le même que celui des tissus mous ($3,31 \cdot 10^{23}$, *Lea* [2]). Le carré moyen du numéro atomique auquel la formation de paires est à peu près proportionnelle, est aussi voisin de celui des tissus ($\sqrt{Z^2} = 4,75$ pour l'organisme et 4,60 pour le plexiglas). Enfin, la densité de 1,18, peu différente de celle des tissus (1,05), n'entraîne qu'une faible correction de profondeur.

Une autre forme d'absorption directe et instantanée de l'énergie est celle qui apparaît sous forme cinétique au cours des effets photonucléaires. Des protons, des neutrons, des particules α et le noyau transmuté, reçoivent une certaine énergie cinétique au cours de l'effet photonucléaire, énergie cinétique qui est ensuite libérée par ionisation. La chambre d'ionisation mesure cette énergie, quand le gaz qui la remplit et ses parois ont la même composition atomique que le fantôme. L'énergie ainsi absorbée est faible et l'on peut estimer que son ordre de grandeur est voisin et un peu plus grand que celui de l'énergie libérée par radioactivité induite.

La radioactivité induite dans l'organisme par un rayonnement X de grande énergie a été mise en évidence, pour la première fois à notre connaissance, en 1949 par *W. V. Mayneord, J. H. Martin* et *D. A. Layne* [3] qui ont irradié des rats avec le rayonnement d'un synchrotron de 24 MeV avec une intensité à 100 cm de la cible de 0,6 r/min. L'activité à la surface du champ d'irradiation a été observée en fonction du temps et les auteurs ont trouvé qu'elle était la résultante de l'activité de deux radio-éléments de périodes 2,1 et 20 minutes environ qui correspondent aux périodes connues de l'oxygène 15 et du carbone 11.

En irradiant de la glace, *Mayneord* a retrouvé la période de l'oxygène 15, l'hydrogène irradié n'entraînant pas la formation d'un isotope radioactif. En variant la tension d'accélération du synchrotron de 17 à 24 MeV, les auteurs ont étudié la proportion des deux radioéléments formés. L'activité spécifique a été déterminée en fixant dans un fantôme de glace une solution étalonnée de ^{32}P . Des activités spécifiques ainsi déterminées, les auteurs concluent que l'énergie dissipée dans les tissus par l'activité induite représente une fraction 10^{-4} environ de l'énergie directe mesurée par ionisation.

2. *Activité du champ d'irradiation*

Nous avons étudié tout d'abord l'activité du champ d'entrée et du champ de sortie du faisceau, chez un patient irradié avec le rayonnement X du béta-tron de 31 MeV (*R. Widerøe* [4]) avec une distance cible-peau de 75 cm et une intensité de 20 r/min, mesurée dans le plexiglas au maximum de la courbe de transition. Le patient a reçu une dose de rayonnement de

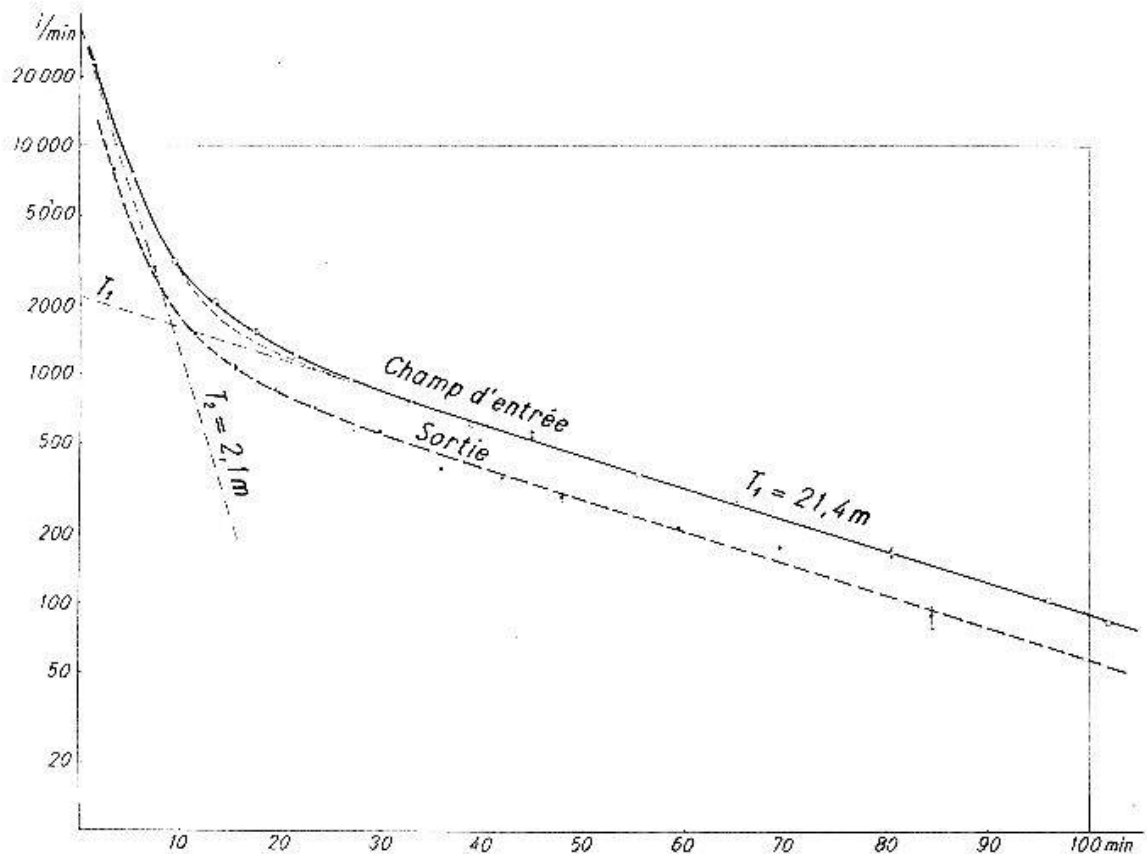


Fig. 1. Courbes de décroissance de l'activité des champs d'irradiation à l'entrée et à la sortie du faisceau.

9360 r en 33 irradiations journalières de 240 puis de 300 r. Les observations sont faites avec un compteur cloche, avec une fenêtre d'entrée de mica de 2 mg/cm^2 et de 2,8 cm d'ouverture, au contact de la peau et une minute après la fin de la dernière irradiation de 300 r, alternativement au centre des champs d'entrée et de sortie. Le champ d'entrée de $6 \times 12 \text{ cm}$ recouvre le sternum, le champ de sortie se trouve à la même hauteur au dos, traversé dans le sens de sa longueur par la colonne vertébrale. Les résultats des mesures sont donnés par la figure 1.

L'activité initiale avec 33 000 impulsions/min. apparaît comme relativement élevée, mais elle décroît rapidement et en 100 minutes elle est réduite à $2,7\%$ de sa valeur initiale. Les deux courbes d'activité des champs d'entrée et de sortie sont identiques et leur rapport d'intensité de 0,65 correspond à la diminution d'intensité du rayonnement X incident pour une épaisseur du corps de 21 à 22 cm. Comme dans les essais de *Mayneord*, cette courbe résulte assez exactement de la superposition de deux exponentielles avec des périodes de 2,1 et 21,4 m. La première correspond, selon la table de *Mattauch-Flammersfeld*, à celle de ^{15}O ($2,2 \pm 0,1 \text{ m}$), la seconde diffère un peu de celle du ^{14}C ($20,35 \pm 0,08 \text{ m}$), suggérant la présence d'un troisième isotope à vie plus longue en faible quantité. En effet, 24 heures après la fin de l'irradiation, le champ d'entrée présente

encore une activité de 23 ± 3 imp/min, le champ de sortie (colonne vertébrale) de 40 ± 4 imp/min. Cette activité ne peut plus être attribuée à ^{14}C ou ^{15}O . Enfin, la différence entre la somme des deux activités de 2,1 et 21,4 m décèle la présence en petites quantités d'un 4^{me} isotope à vie courte (courbe pointillée et courbe pleine).

Pour préciser la nature des isotopes produits, nous donnons dans le tableau suivant, la composition atomique moyenne de l'organisme humain, avec la proportion en poids des différents éléments qui y apparaissent [5]. Cette composition peut naturellement varier considérablement d'un tissu à un autre. Pour chaque élément, nous indiquons les réactions photonucléaires connues, avec le seuil de tension à partir duquel elles apparaissent.

*Composition atomique moyenne de l'organisme
et activités probables induites*

Elément	Proportion en %	Réaction	Bibliographie No	Isotope radioactif produit	Période T	E_β MeV	E_γ MeV	Seuil MeV
Oxygène	65,0	$^{16}\text{O}(\gamma, n)$	6	^{15}O	2,1 m	1,7	—	16,3
Carbone	18,0	$^{12}\text{C}(\gamma, n)$	6, 8	^{11}C	20,5 m	0,95	—	18,7
Hydrogène	10,0	—	—	—	—	—	—	—
Azote	3,0	$^{14}\text{N}(\gamma, n)$	6	^{13}N	9,9 m	1,24	—	11,1
		$^{14}\text{N}(\gamma, p2n)$	7	^{11}C	20,5 m	0,95	—	—
Calcium	1,5	$^{40}\text{Ca}(\gamma, n)$	8	^{39}Ca	1,1 s	—	—	15,9
		—	9	—	4,5 m	—	—	—
Phosphore	1,0	$^{31}\text{P}(\gamma, n)$	8	^{30}P	2,5 m	3,5	—	12,35
Potassium	0,35	$^{39}\text{K}(\gamma, n)$	8	^{38}K	7,7 m	2,5	2,15	13,2
Soufre	0,25	$^{32}\text{S}(\gamma, n)$	8	^{31}S	3,2 s	3,85	—	14,8
Sodium	0,15	—	—	—	—	—	—	—
Chlore	0,15	$^{35}\text{Cl}(\gamma, n)$	9	^{34}Cl	3,3 m	2,5	3,4	—
Magnésium	0,05	$^{24}\text{Mg}(\gamma, n)$	8	^{23}Mg	11,6 s	2,82	—	16,2
		$^{25}\text{Mg}(\gamma, p)$	8	^{24}Na	14,8 h	1,39	2,76	11,5
Fer	0,004	—	8	—	—	—	1,38	—
		$^{26}\text{Mg}(\gamma, p)$	8	^{25}Na	62 s	3,7	—	14,0
Manganèse	0,0003	$^{54}\text{Fe}(\gamma, n)$	8	^{53}Fe	8,9 m	—	—	13,8
Cuivre	0,0002	$^{65}\text{Cu}(\gamma, n)$	8	^{64}Cu	12,8 h	0,57	1,35	10,2
		—	—	—	—	0,66	—	—
Iode	0,00004	$^{63}\text{Cu}(\gamma, n)$	8	^{62}Cu	10,1 m	3,0	—	10,9
		$^{127}\text{I}(\gamma, n)$	8	^{126}I	13,3 d	1,2	0,5	9,3

Les seuils de tension ont été déterminés par les auteurs dont les références bibliographiques sont indiquées.

On voit donc que l'hydrogène, le sodium et le manganèse exceptés, tous les éléments de l'organisme sont activés. L'importance de cette activation dépendra, d'une part de la fréquence avec laquelle l'élément

se présente dans l'organisme, et d'autre part de la section efficace de l'effet photonucléaire produit.

3. Activation séparée du carbone, de l'azote, de l'oxygène, du phosphore et du calcium

Nous avons irradié séparément, sous des formes moléculaires convenables, les éléments étudiés, soit l'hydrogène, le carbone, l'azote, l'oxygène, le phosphore et le calcium, c'est-à-dire, tous les éléments qui se présentent dans l'organisme avec une concentration supérieure à 1^o/_o.

Le *carbone* a été irradié sous forme de charbon de sucre d'une pureté de 99,97%, l'*oxygène* sous forme d'eau distillée H₂O ou de Al₂O₃ pro analysis, l'*azote* sous forme de BN pro analysis, le *phosphore* sous forme de phosphore rouge et enfin le *calcium purum* sous forme métallique en copeaux grattés avant l'irradiation ou sous forme de CaO pro analysis Merck.

Les réactions jusqu'ici connues qui entrent en considération lorsqu'on irradie ces molécules par rayons X de très grande énergie sont données par le tableau suivant:

Réactions nucléaires des éléments H, B, C, N, O, Al, P, Ca irradiés par γ

Molécules irradiées: H₂O, C, BN, Al₂O₃, P, Ca, CaO

Hydrogène	${}^2\text{H} (\gamma, n) \text{H}$		
Carbone	${}^{12}\text{C} (\gamma, \alpha) {}^8\text{Be} \begin{cases} \alpha \\ \alpha \end{cases}$		
	${}^{12}\text{C} (\gamma, 2n) {}^{10}\text{C} (?)$		$T = 20 \text{ s}$
	${}^{12}\text{C} (\gamma, n) {}^{11}\text{C} \rightarrow \beta^+$	0,97 MeV	$T = 20,35 \text{ m}$
Bore	${}^{10}\text{B} (\gamma, {}^2\text{H} + {}^4\text{He} + {}^4\text{He})$		
	${}^{10}\text{B} (\gamma, {}^1\text{n} + {}^1\text{H} + 2{}^4\text{He})$		
	${}^{11}\text{B} (\gamma, {}^3\text{H} + 2{}^4\text{He})$	0,018 MeV	$T = 12,1 \text{ a}$
	${}^{11}\text{B} (\gamma, {}^1\text{H} + {}^{10}\text{Be})$		
Azote	${}^{14}\text{N} (\gamma, p 2n) {}^{11}\text{C}$		
	${}^{14}\text{N} (\gamma, n) {}^{13}\text{N} \rightarrow \beta^+$	1,24 MeV	$T = 10,13 \text{ m}$
Oxygène	${}^{16}\text{O} (\gamma, n) {}^{15}\text{O} \rightarrow \beta^+$	1,7 MeV	$T = 2,1 \text{ m}$
	${}^{16}\text{O} (\gamma, \alpha n) {}^{11}\text{C}$		
Aluminium	${}^{27}\text{Al} (\gamma, 2p n) {}^{24}\text{Na}$	1,39 MeV	$T = 14,8 \text{ h}$
	${}^{27}\text{Al} (\gamma, 2p) {}^{25}\text{Na}$	2,7-3,7 MeV	$T = 58,2 \text{ s}$
	${}^{27}\text{Al} (\gamma, n) {}^{26}\text{Al}$	2,8 MeV	$T = 6,3 \text{ s}$
Phosphore	${}^{31}\text{P} (\gamma, 2n) {}^{29}\text{P} \rightarrow \beta^+$	3,63 MeV	$T = 4,6 \text{ s}$
	${}^{31}\text{P} (\gamma, n) {}^{30}\text{P} \rightarrow \beta^+$	3,5 MeV	$T = 2,18 \text{ m}$
Calcium	${}^{40}\text{Ca} (\gamma, n) {}^{39}\text{Ca}$		$T = 1,1 \text{ s}$
			$T = 4,5 \text{ m}$

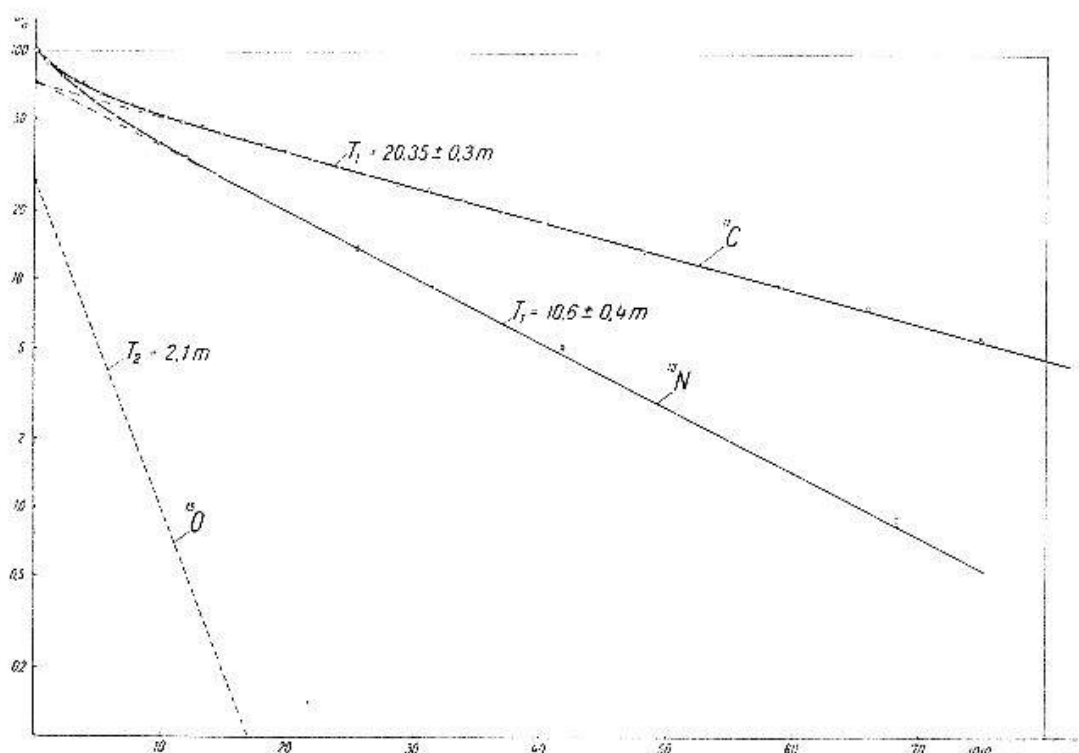


Fig. 2. Décroissances d'activité du carbone et de l'azote (la courbure à l'origine est due à l'oxygène).

La décroissance d'activité est observée 1,5, 2 ou 3 minutes après la fin de l'irradiation. Les périodes courtes, de l'ordre ou inférieures à la seconde, ne sont donc pas observées.

Toutes les irradiations sont effectuées dans le faisceau d'ouverture maximum (20 cm de diamètre à 100 cm de la cible) au centre du champ et sans filtre égalisateur (cf. R. Widerøe [4]). On obtient ainsi, pour une certaine distance à la cible, l'intensité maximum.

Le carbone (figure 2), observé 1,3 minutes après la fin d'une irradiation de 10 minutes à 75 cm donne une période principale de $20,35 \pm 0,3$ m qui correspond au ^{11}C (Mattauch-Flammersfeld $20,35 \pm 0,08$ m) produit par $^{12}\text{C}(\gamma, n)$. La période courte de 2,1 m qui apparaît au début correspond à ^{15}O . Le séchage du carbone à 300°C n'a pas éliminé complètement la vapeur d'eau. Le ^{10}C , avec une période de 19,1 s produit par effet $(\gamma, 2n)$ à 100 MeV par M. Perlman et G. Friedlander [17], n'apparaît donc pas.

L'azote (figure 2) irradié durant 20 minutes à 40 cm de la cible sous forme de nitrure de bore, présente une période principale de $10,6 \pm 0,4$ m qui correspond au ^{13}N (Mattauch-Flammersfeld $10,13 \pm 0,10$ m) produit par $^{14}\text{N}(\gamma, n)$ et une période courte de 2,1 m que nous attribuons à de l'oxygène 15, soit par présence d'oxyde de bore en traces, soit par absorption d'eau. Le séchage à 500°C n'aurait pas éliminé complètement l'eau. Le bore, selon le tableau de la page 560, n'entraîne la formation que d'un

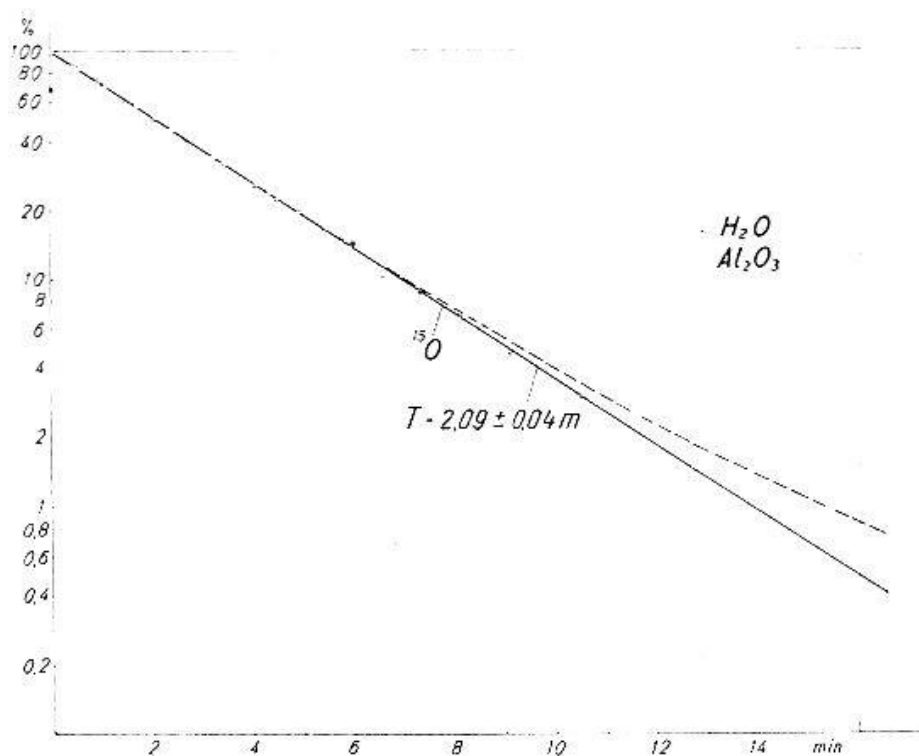


Fig. 3. Décroissance de l'activité de l'oxygène irradié sous forme de H_2O ou de Al_2O_3 .

seul isotope actif 3H ($T = 12,1$ y), mais en quantité trop faible et un rayonnement trop mou pour être décelé ici.

L'oxygène, irradié sous forme de H_2O ou Al_2O_3 , durant 10 minutes à 40 cm de la cible, a été mesuré 3 minutes après la fin de l'irradiation. Les deux courbes de décroissance sont données par la figure 3. L'eau donne une seule période de $2,09 \pm 0,04$ m qui correspond à ^{15}O (Seaborg et Perlman [9] $T = 2,1$ m) produit par $^{16}O(\gamma, n)^{15}O$. La production de ^{11}C par la réaction $^{16}O(\gamma, \alpha n)$ signalée par G. C. Baldwin et G. S. Klaiber [7] pour une énergie maximum de 100 McV, n'apparaît donc pas ici. La courbe de décroissance de Al_2O_3 donne la même période principale de 2,09 m à laquelle s'ajoute une période plus longue issue de l'aluminium et que nous n'avons pas déterminée.

Le phosphore, sous forme de phosphore rouge en poudre, séché préalablement au $CaCl_2$, a été irradié durant 20 minutes à 75 cm de la cible et observé 2 minutes après la fin de l'irradiation. La décroissance d'activité en fonction du temps, donnée par la figure 4, met en évidence une seule période de $2,60 \pm 0,06$ minutes due à ^{30}P . La période trouvée est en net désaccord avec celle de $2,18 \pm 0,03$ m indiquée par Mattauch-Flammersfeld et déterminée par Cichocki J. und Soltan A. Cette valeur est en accord, en revanche, avec la période de 2,55 m indiquée par L. Ridenour et W. Henderson [18].

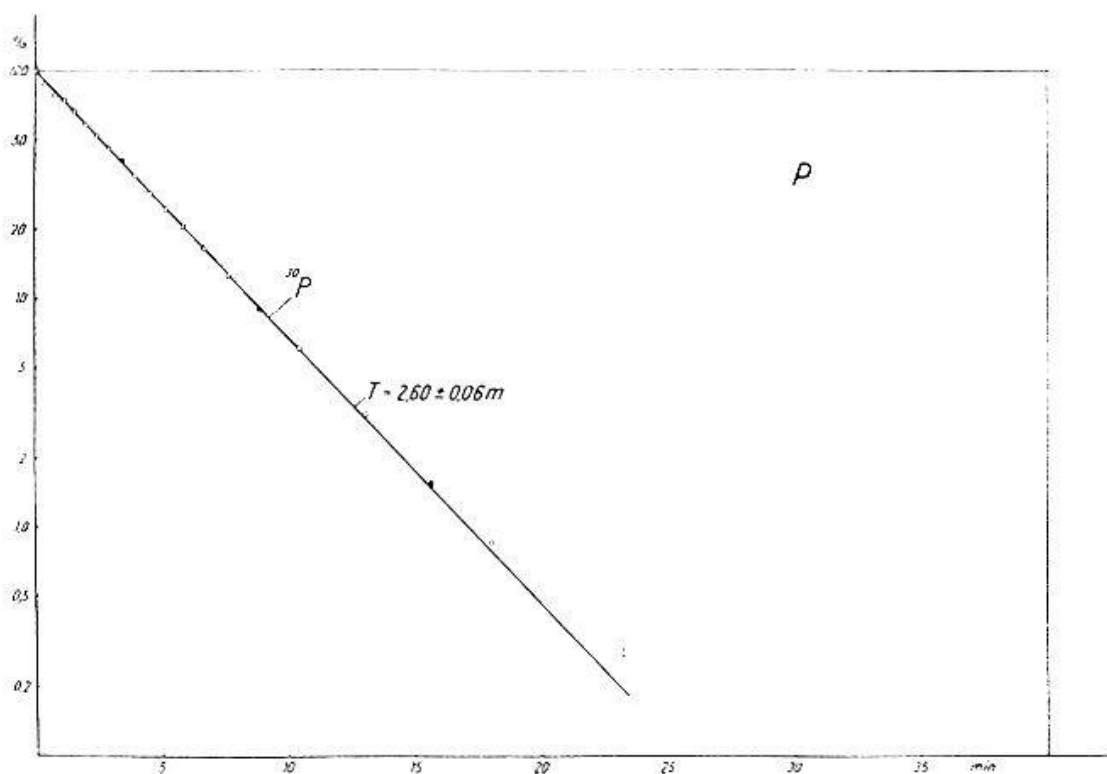


Fig. 4. Décroissance d'activité du phosphore.

Le calcium métallique pur, irradié 40 minutes à 20 cm de la cible a été observé 1,5 minutes après la fin de l'irradiation. La décroissance de l'activité en fonction du temps est donnée par la figure 5. Elle comporte au moins 5 périodes $T_1 = 22,6$ h, $T_2 = 2,2$ h (imprécise), $T_3 = 38$ m, $T_4 = 8,3$ m et $T_5 = 3,8$ m. Aucune de ces périodes ne correspond à des réactions connues, le calcium n'ayant pas été étudié par les auteurs déjà cités.

Comme la décomposition d'une courbe de décroissance en un aussi grand nombre d'exponentielles comporte une certaine incertitude, et que la nature chimique des isotopes produits reste indéterminée, avec la collaboration de MM. *Pierre Jordan* et *Walter Mauderli*, nous avons étudié le potassium actif et le calcium extraits séparément du calcium irradié.

Du CaO pro analysis de Merck est irradié durant 40 minutes à 20 cm de la cible. Le potassium, extrait du calcium irradié sous forme de cobaltinitrite et observé 20 minutes après la fin de l'irradiation, présente une forte activité dont la décroissance est donnée par la figure 6 avec 3 échelles différentes de l'abscisse. Elle comporte exactement 2 périodes, $T_1 = 21,2 \pm 0,5$ h et $T_2 = 8,0 \pm 0,2$ m correspondant à 2 isotopes connus du potassium ^{43}K (*Mattauch-Flammersfeld*, $T = 22,4$ h) et ^{38}K (*Mattauch-Flammersfeld*, $T = 7,65$ m). Ces isotopes seraient produits par les

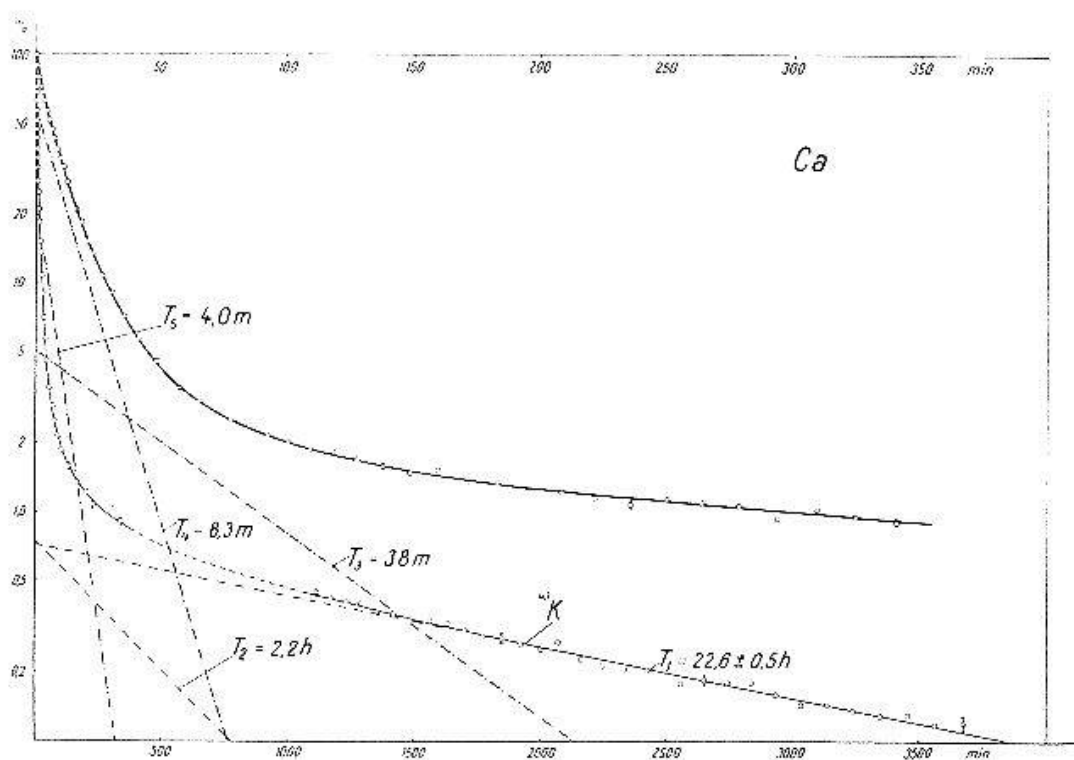


Fig. 5. Décroissance d'activité du calcium métallique irradié (2 échelles différentes de l'abscisse).

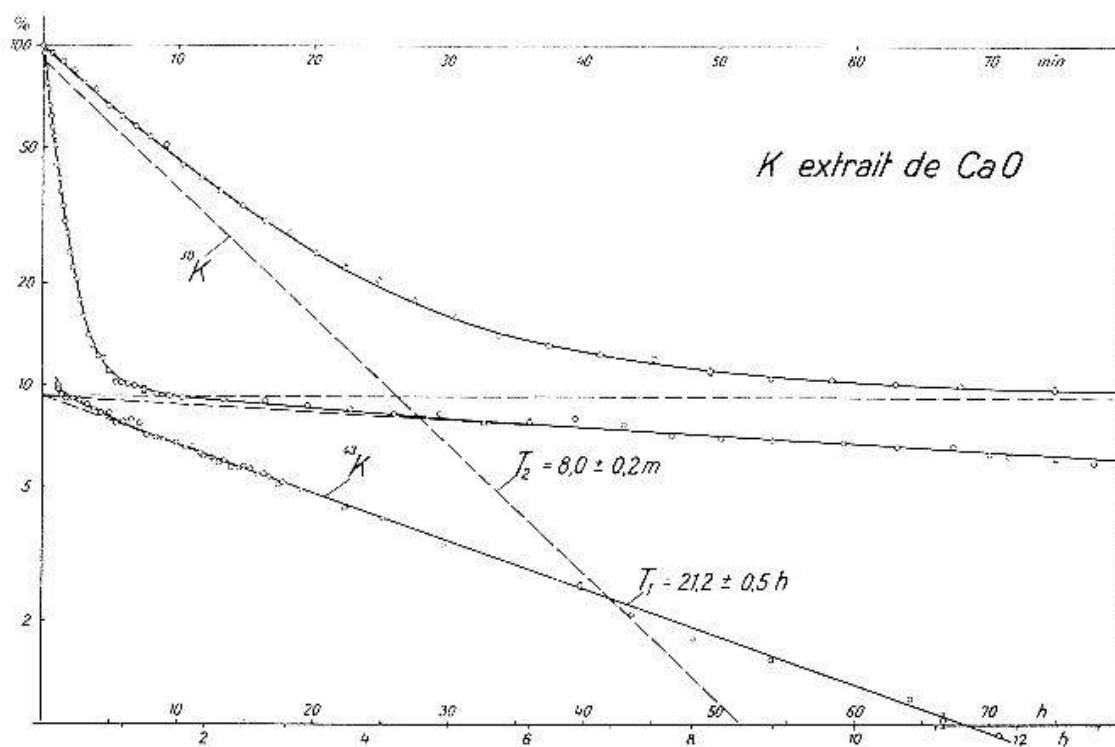


Fig. 6. Décroissance d'activité du potassium extrait du calcium irradié.

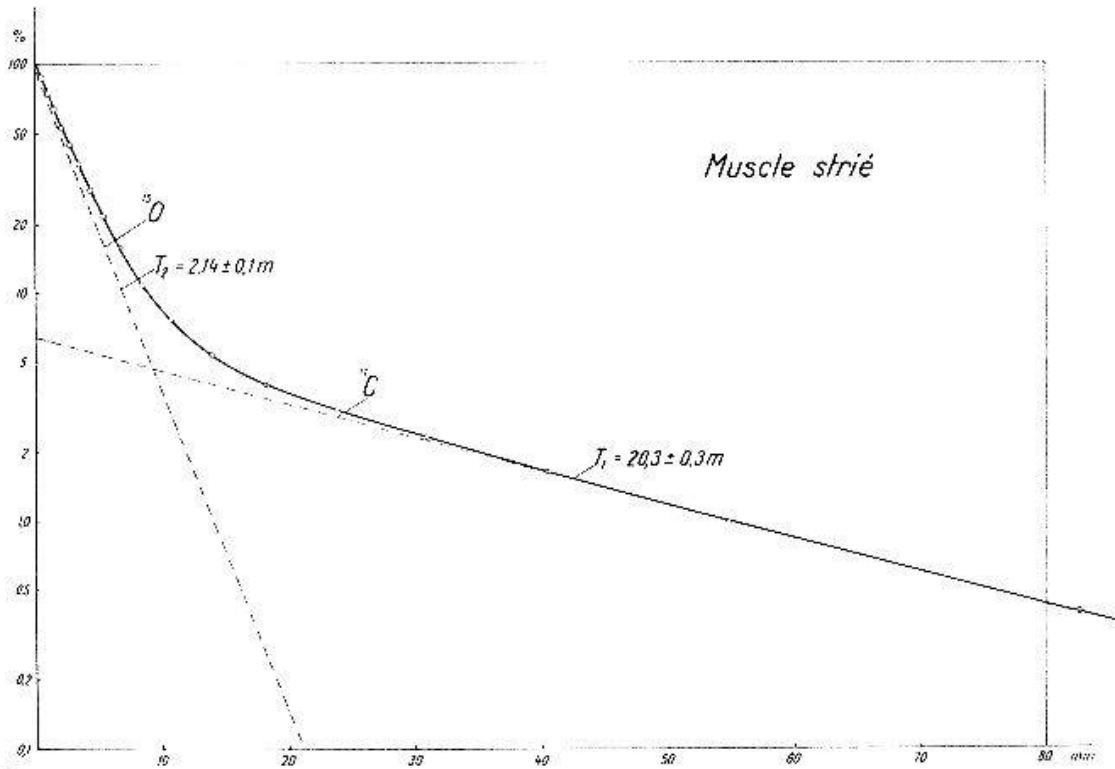


Fig. 7. Décroissance d'activité de la musculature striée.

réactions $^{44}\text{Ca} (\gamma, p) ^{43}\text{K}$ et $^{40}\text{Ca} (\gamma, pn) ^{38}\text{K}$ qui n'ont pas encore été démontrées.

Le *calcium*, extrait du calcium irradié sous forme d'oxalate, à l'exclusion des isotopes actifs d'autres éléments, livre une faible activité dont la courbe de décroissance varie avec l'origine du calcium utilisé (CaO de Merck ou Ca métallique). La décomposition de la courbe ne donne pas des périodes fixes et déjà connues. Si l'on considère les isotopes stables du calcium susceptibles de donner des isotopes actifs par effet (γ, n) , on voit qu'à l'exclusion du ^{40}Ca qui donne un ^{39}Ca de période 1,06 s trop courte pour être observée ici, le ^{42}Ca , le ^{46}Ca et le ^{48}Ca qui entrent en considération se présentent avec des abondances respectives de 0,64, 0,003 et 0,178%. La moindre impureté peut donc masquer les faibles activités issues de ces isotopes. Par ailleurs, une courte irradiation de CaO p.a. observée sans séparation chimique 5 minutes après l'irradiation ne livre que les 2 périodes certaines de 2,0 m et 7,7 m attribuées à ^{15}O et ^{38}K .

Dans la décomposition de la figure 5, les périodes de 8,3 m et de 22,6 h dues à ^{38}K et ^{43}K sont donc seules confirmées².

² L'étude des isotopes actifs issus du calcium fera l'objet d'une publication particulière en collaboration avec MM. P. Jordan et W. Mauderli.

4. Activation de la musculature striée et des os

La décroissance d'activité d'un fragment de *musculature striée* irradié durant 21 minutes à 75 cm de la cible et observé 1,5 minutes après la fin de l'irradiation est donnée par la figure 7. Elle est formée très exactement de deux périodes de 2,14 et 20,0 minutes qui correspondent à ^{15}O et ^{11}C . L'azote ^{13}N n'y apparaît pas, ou du moins en quantité inférieure à 2⁰/₀. Il s'agissait de musculature fraîchement disséquée et conservée 5 heures au frigidaire (+3° C) avant l'expérience.

Les activités obtenues doivent être mises en relation avec la composition du tissu musculaire. Mlle *Claire Eggenberger* a déterminé à l'aide des données des *Tabulae biologicae*, T. III, p. 438 [19], la composition atomique moyenne de la musculature striée à partir de la teneur en eau, en albumines, en graisses et en cendres indiquée par la table. Le résultat est donné dans le tableau ci-dessous :

Elément	Teneur en %
Oxygène	72
Carbone	12
Hydrogène	10
Azote	3,5
Soufre	0,5
Potassium	0,3
Phosphore	0,2
Sodium	0,08
Chlore	0,07

Les éléments Mg, Fe, Ca, Si, Cu se trouvent en quantité totale inférieure à 1⁰/₀₀.

Pour la musculature striée, le rapport *apparent* des activités $^{15}\text{O} : ^{11}\text{C}$ est donné par la figure 7, $93,8 : 6,2 = 15,1$. En tenant compte de la composition atomique du tableau ci-dessus et des dosages absolus de ^{15}O et ^{11}C effectués au § 5 (figure 12), on peut retrouver la valeur de ce rapport à partir de la composition atomique donnée. On trouve 15,4, soit une valeur à peu près identique à la précédente. *L'observation de la radioactivité induite dans les tissus mous, après irradiation au béta-tron, donne une méthode de détermination assez exacte du rapport oxygène: carbone.* Il se peut que ce rapport permette d'étudier certaines fonctions physiologiques comme la respiration cellulaire par exemple. De ce point de vue il sera important d'examiner les tissus cancéreux.

Des fragments d'os, découpés au milieu de la longueur d'un fémur et débarrassés de la moëlle et des tissus tendres ont été taillés en forme de disque et irradiés, l'un durant 40 minutes à 20 cm, l'autre durant 20 minutes à 75 cm de la cible.

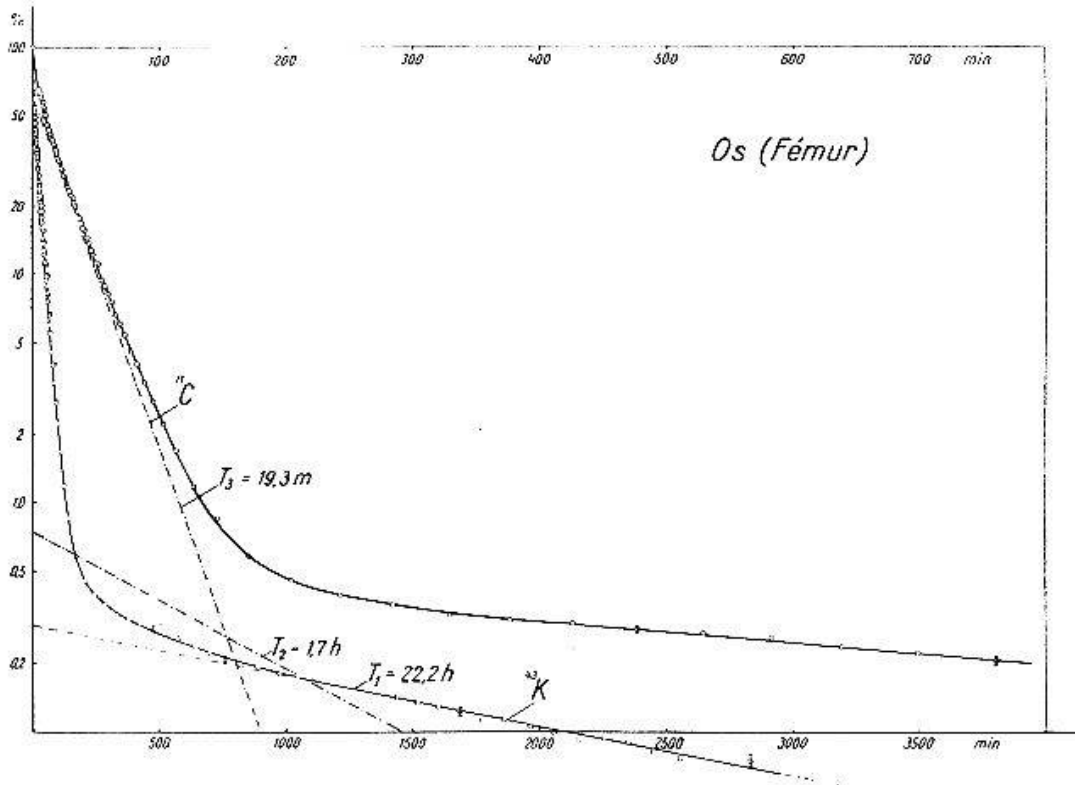


Fig. 8. Activité d'un fragment de fémur irradié durant 40 minutes à 20 cm de la cible (deux échelles différentes de l'abscisse).

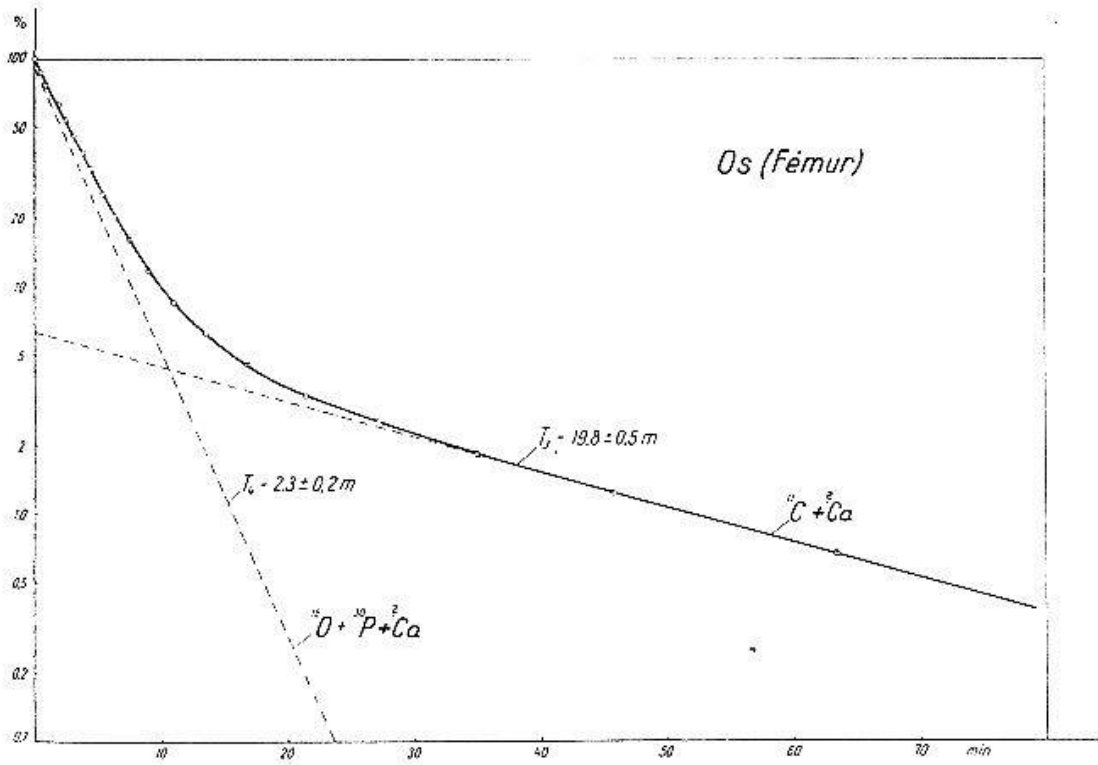


Fig. 9. Activité d'un fragment de fémur irradié durant 20 minutes à 75 cm de la cible.

L'irradiation intense, destinée à mettre en évidence les périodes longues, a été effectuée dans les mêmes conditions que celle du calcium. L'activité, observée 3 minutes après l'irradiation, comporte (figure 8) une période longue, $T_1 = 22.2$ h analogue à celle que nous avons trouvée pour le calcium et que nous avons supposée correspondre à ^{44}Ca (γ , p) ^{43}K ; une période mal déterminée $T_2 = 1.7$ h, une période $T_3 = 19.3$ m qui peut être attribuée à ^{11}C et enfin des périodes courtes de 2 à 5 m qu'on ne peut séparer. Cette expérience révèle donc avant tout la présence du carbone et du calcium.

L'irradiation à plus faible intensité et de plus courte durée observée 1,2 minutes après l'irradiation (figure 9) donne une courbe de décroissance formée assez exactement de deux périodes $T_3 = 19.8$ m et $T_4 = 2.3$ m.

La composition atomique du tissu osseux a été déterminée à l'aide des mêmes tables par Mlle *Eggenberger* pour le *fémur* du chien, à partir de sa teneur en eau, en graisses, en substances organiques et inorganiques.

Elément	Proportion en %
Oxygène	41
Carbone	27
Calcium	14,5
Phosphore	6,9
Hydrogène	6,3
Azote	2,7
Soufre	0,2
Magnésium	0,2
Chlore	0,1

Les éléments Fl, Ba, Ce, La, se trouvent en traces, en quantités totales inférieures à $10/100$.

Il résulte du tableau précédent que la période courte de 2,3 m de la figure 9 doit être attribuée à un mélange de ^{15}O et ^{30}P . La période de 19,8 m est due avant tout à ^{11}C . Le ^{38}K de 8,0 m issu du calcium n'apparaît donc pas en quantité suffisante pour être décelable.

L'irradiation des os met donc en évidence des isotopes actifs issus du calcium, le ^{43}K de 21,4 h, du carbone, le ^{11}C , de l'oxygène, ^{15}O et du phosphore, le ^{30}P , les courbes de décroissance de ces deux derniers isotopes n'étant pas séparables.

Les deux isotopes actifs principaux, produits dans la musculature striée, sont ^{15}O et ^{11}C .

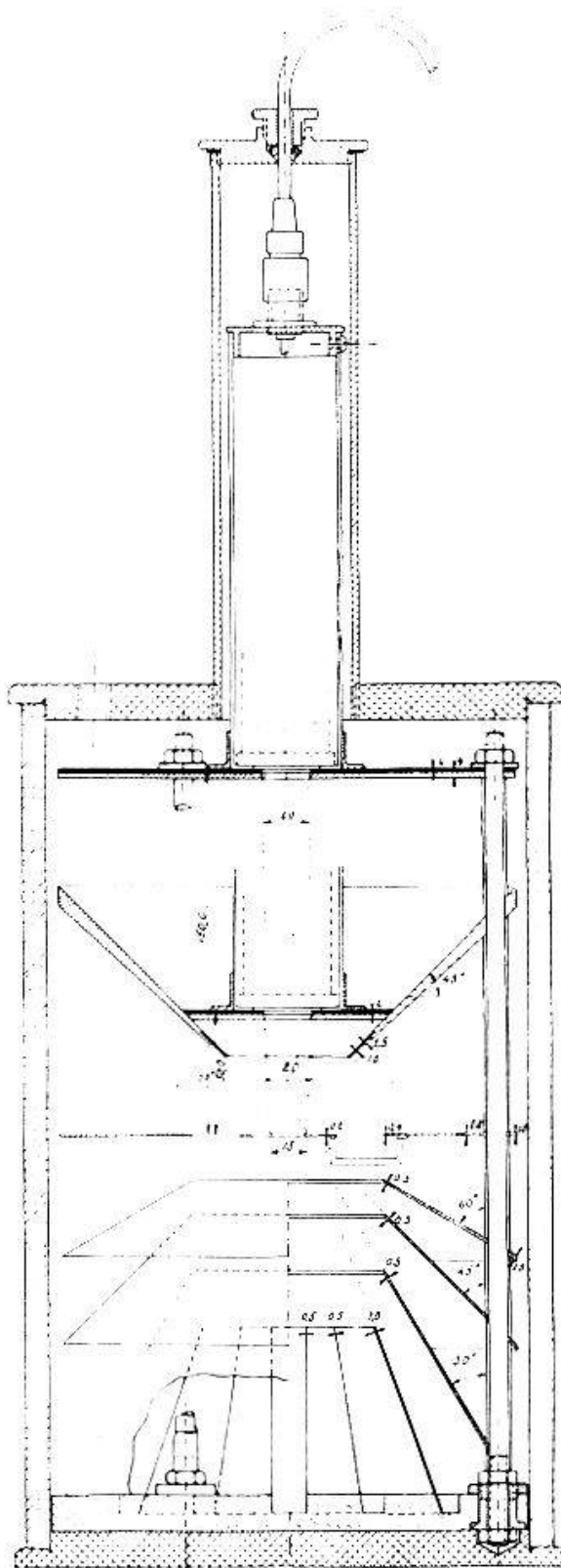


Fig. 10. Appareil pour le dosage absolu du rayonnement bêta. Compteur de Geiger à deux positions. Vide préliminaire.

5. Mesure des activités spécifiques induites pour ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , ^{30}P et ^{128}I .

Pour pouvoir calculer la dose de rayonnement en équivalents röntgens dissipée par la radioactivité induite dans un tissu, après la fin de l'irradiation, il faut connaître l'activité spécifique induite par gramme d'élément pour une irradiation d'intensité et de durée données. Cette activité spécifique a été déterminée à l'aide d'un appareil à *dosage absolu* du rayonnement bêta que nous avons construit et dont l'étude préliminaire a été faite en collaboration avec M. H. Schmid¹.

L'appareil (figure 10) comporte au centre une bague annulaire amovible de 3,0 cm de diamètre intérieur et de 0,2 mm d'épaisseur en laiton (détail agrandi, figure 11). Celle-ci porte le film de Zapon ou la lame de mica de 0,5 à 2 mg/cm², sur laquelle se trouve la couche radioactive mince répartie en un disque de 10 mm de diamètre. Le tube de Geiger à fenêtre de mica de 2,0 mg/cm² est pourvu d'un diaphragme de 20,0 mm de diamètre, situé à 50,0 mm de la couche active. La géométrie est telle que la variation d'angle solide du centre au bord de la couche entraîne une efficacité géométrique (*geometrical efficiency*) de 99% (G. B. Cook, J. F. Duncan, M. A. Hewitt [10]). L'angle solide utilisé à 50 mm représente les $1/92,7^e$ de 4π . Pour éviter l'erreur due aux électrons rétrodiffusés issus des parois, nous avons adopté un système d'écrans tronconiques en laiton et aluminium dont la nappe externe est centrée sur le bord de la source active. Ces écrans offrent une très faible surface incidente au rayonnement de la source d'une part, et d'autre part, tout électron diffusé par la paroi cylindrique dans la direction du tube de Geiger est intercepté par eux. L'ensemble du dispositif, maintenu par 3 barres d'aluminium, est logé dans un cylindre de plexiglas fermé par deux disques d'acier à rebords rodés et graissés. Le tout peut être évacué par une pompe à vide préliminaire pour supprimer l'absorption et la diffusion du rayonnement bêta par la couche d'air située entre la couche active et le compteur. Le tube de Geiger et sa fenêtre peuvent occuper deux positions, l'une à 50, l'autre à 150 mm de la couche active (variation de l'angle solide avec la distance).

Dans le premier usage que nous avons fait de l'appareil pour le présent travail, où il s'agissait avant tout d'évaluer l'ordre de grandeur des radioactivités induites, nous ne l'avons pas utilisé avec la précision maximum qu'il peut fournir. L'appareil n'a pas été évacué, les couches actives, relativement épaisses, ne sont pas descendues au-dessous de 10 mg/cm², et la lame de mica qui les portait était de 2 mg/cm². Comme la

¹ M. Schmid a pu effectuer cette étude grâce à une subvention de l'Académie Suisse des Sciences Médicales.

courbe d'activité en fonction de la densité superficielle subit des modifications importantes au-dessous de 10 mg/cm^2 (*W. E. Nervik, P. C. Stevenson* [11]), nous avons extrapolé horizontalement à zéro la courbe d'activité en fonction de la densité superficielle à partir de 10 mg/cm^2 . La valeur obtenue a été ensuite corrigée, pour l'absorption et la dif-

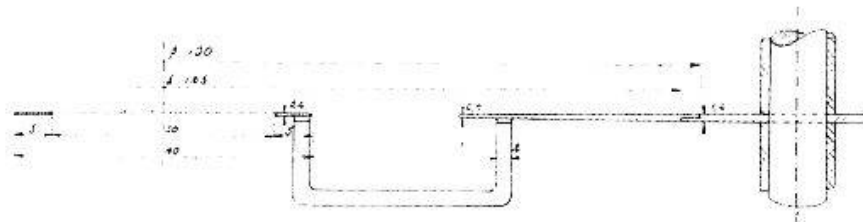


Fig. 11. Support de préparation active (détail de l'appareil à dosage absolu).

fusion propres, par un facteur, fonction de l'énergie béta, donné par *Nervik et Stevenson* pour une couche active en NaCl. L'absorption due à la couche d'air a été jugée équivalente à celle d'un même poids d'aluminium (*B. P. Burt* [12]).

Les différents facteurs de correction appliqués aux mesures sont donnés dans le tableau ci-dessous.

	^{11}C	^{13}N	^{15}O	^{30}P	^{128}I
Energie béta maximum (MeV)	0,97	1,24	1,7	3,0-3,5	2,02 [93] 1,59 [7]
Fenêtre de mica	: 0,95	: 0,96	: 0,97	: 0,99	: 0,98
Absorption dans 5 cm d'air (6,1 mg/cm^2)	: 0,85	: 0,88	: 0,91	: 0,95	: 0,92
Diffusion et absorption propre de la couche active (10 mg/cm^2)	: 1,12	: 1,12	: 1,16	: 1,18	: 1,17
Correction totale	: 0,90	: 0,95	: 1,02	: 1,11	: 1,05
Facteur d'angle solide	92,7				

Les poudres de carbone, de BN, de Al_2O_3 , de phosphore rouge et de NaI ont été réparties en couches minces sur la feuille de mica à l'aide d'instruments de dentiste. La figure 12 donne les activités spécifiques mesurées pour différentes densités superficielles des couches ainsi que l'extrapolation à zéro. Les valeurs indiquées sont corrigées des coefficients précités. On doit considérer que leur précision n'est pas supérieure à $\pm 25\%$.

Les activités spécifiques sont données en microcuries par gramme-élément pour une irradiation de 20 minutes avec une intensité de 36,5 r/min à 100 cm de la cible (mesure dans le plexiglas au maximum de la courbe de transition), soit pour une dose totale de 730 r.

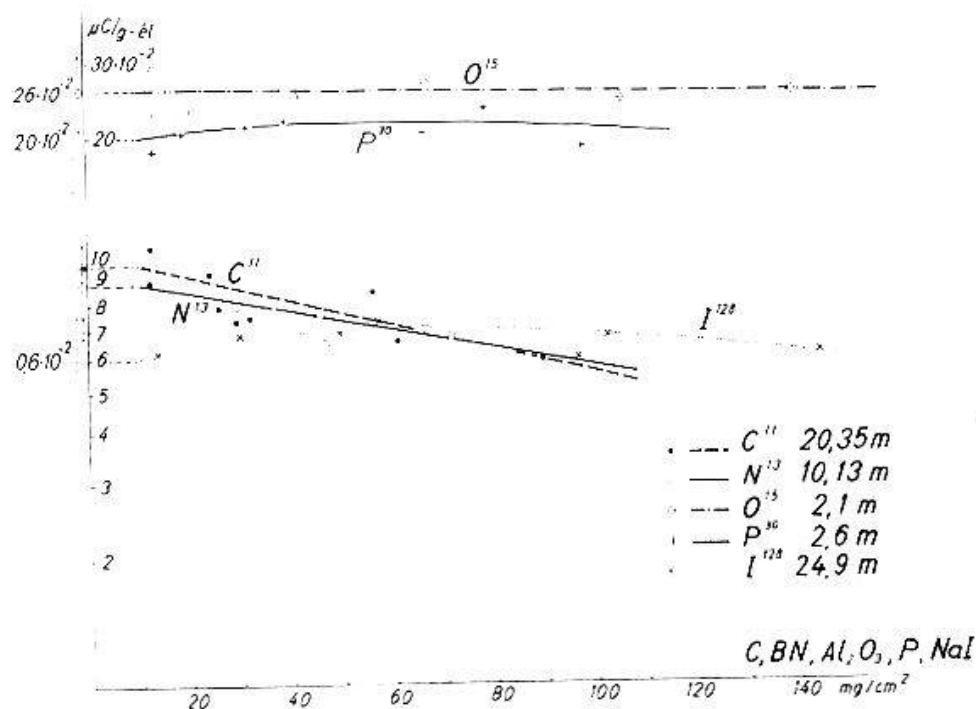


Fig. 12. Détermination absolue avec extrapolation à zéro des poudres actives de C, BN, Al₂O₃, P et NaI.

6. Dose de rayonnement dissipée dans les tissus par la radioactivité induite

Un isotope de période T (days) dont l'énergie bêta moyenne est égale à $\bar{E}_{\beta(\text{MeV})}$ et qui se trouve en concentration A ($\mu\text{C/g}$) dans un tissu, dissipe, jusqu'à désintégration complète, une dose de rayonnement bêta donnée par la formule

$$D_{\beta} = 88,2 A T \bar{E}_{\beta \text{ (rep)}}$$

établie par *Marinelli, Quimby et Hine*.

L'unité de dose de rayonnement est l'équivalent physique du röntgen (rep), c'est-à-dire la quantité d'énergie bêta égale à la quantité d'énergie dissipée dans un gramme d'air par ionisation par une dose de rayonnement X de 1 röntgen (83,8 ergs).

Pour un mélange d'éléments qui se trouvent en concentrations pondérales $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ avec des activités spécifiques A_1, A_2, \dots, A_n par gramme d'élément, la dose de rayonnement dissipée sera:

$$\sum D_{\beta}^{\infty} = 88,2 [\eta_1 A_1 T_1 \bar{E}_{1\beta} + \eta_2 A_2 T_2 \bar{E}_{2\beta} + \dots + \eta_n A_n T_n \bar{E}_{n\beta}]$$

Pour ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O et ^{30}P le rapport $\bar{E}_\beta/E_{\beta_{\max}}$ a été déterminé à l'aide des calculs effectués par *G. J. Hine* [15] pour une transition autorisée et pour $Z = 0$. Les résultats du calcul des doses de rayonnement figurent dans le tableau ci-dessous.

Dose de rayonnement dissipée dans les tissus par ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , ^{30}P , ^{38}K et ^{43}K
Irradiation de 20 minutes à 100 cm de la cible avec une intensité de 36,5 r/min

	η	$A_{\mu\text{C/g}}$	T	$E_{\beta_{\max}}$	$\bar{E}_\beta/E_{\beta_{\max}}$	\bar{E}_β	Dose en rep.	
Oxygène ^{15}O	0,65	0,26	2,1 m	1,7	0,42	0,71	$1,55 \cdot 10^{-2}$	
Carbone ^{14}C	0,18	0,10	20,35 m	0,97	0,39	0,38	$0,86 \cdot 10^{-2}$	
Azote ^{13}N	0,03	0,09	10,13 m	1,24	0,40	0,50	$0,082 \cdot 10^{-2}$	
Calcium		^{38}K	0,1 *	8,0 m	2,53	—	0,8 *	$0,059 \cdot 10^{-2}$
		^{43}K	0,015	0,01*	21,2 h	$\begin{cases} 0,81 \\ 0,24 \end{cases}$	—	0,4 *
Phosphore ^{30}P	0,01	0,20	2,60 m	3,5	0,46	1,61	$0,051 \cdot 10^{-2}$	
Dose totale pour les 5 éléments les plus abondants de l'organisme							$3,07 \cdot 10^{-2}$	rep

* Le dosage absolu du ^{38}K et du ^{43}K n'ayant pas été effectué, ces valeurs ont été appréciées et indiquent un ordre de grandeur maximum.

Comme la dose de rayonnement direct correspondante est de 730 röntgens, la fraction d'énergie libérée dans les tissus par la radioactivité induite après l'irradiation s'élève à $4,2 \cdot 10^{-5}$ pour les éléments envisagés, soit moins de un dix-millième. Ce résultat expérimental est en accord avec les estimations de *Mayneord* et ses collaborateurs.

On doit se demander, si les autres éléments, qui se présentent dans l'organisme avec une fréquence inférieure au pourcent et que nous n'avons pas étudiés, peuvent être la source d'une dose de rayonnement notable.

G. A. Price et *D. W. Kerst* [16], en étudiant le rendement (yields) de l'effet (γ , n) en fonction du numéro atomique Z pour des radiations de freinage de 18 et 22 MeV ont montré que ce rendement commence par décroître pour Z croissant jusqu'à 10, où il atteint un minimum; de $Z = 10$ jusqu'à $Z = 90$, le rendement croît constamment et selon une loi empirique $2 \cdot 270 Z^{2,1}$ pour 22 MeV et pour les éléments lourds. De $Z = 10$ à $Z = 90$, le rendement augmente selon un facteur d'environ 10^3 . Selon cette observation, on ne doit pas s'attendre à ce que les éléments K, S, Na, Cl et Mg (dans l'ordre du tableau de la page 559) dont les numéros atomiques sont compris entre 10 et 20 et la fréquence entre 0,35 et 0,05% entraînent une radioactivité aussi élevée que celle des éléments déjà étudiés, dont le numéro atomique est compris entre 1 et 20.

Pour le fer, le manganèse et le cuivre, pour lesquels Z varie de 25 à 29, leur section de capture (yield), selon le travail de *Price* et *Kerst*, pourra être de 10 à 100 fois plus grande que pour les éléments légers; mais il faut remarquer que leur fréquence est comprise entre 0,04 et 0,0002%. Leur rareté surcompense très largement l'augmentation de la section de capture de l'effet photonucléaire.

On ne doit donc pas s'attendre à ce que les éléments qui se présentent dans l'organisme avec une abondance inférieure au pourcent entraînent une dissipation de rayonnement radioactif aussi élevée que celle des éléments déjà étudiés.

7. Activation de l'iode de la thyroïde

Une attention toute particulière doit cependant être attachée à l'iode qui n'est pas réparti d'une façon homogène dans les tissus.

En cas d'irradiation de la thyroïde – pour un cancer de la trachée par exemple – il faut déterminer les isotopes actifs issus de l'iode qui sont produits. Les 30 mg d'iode de l'organisme humain sont à peu près complètement concentrés dans les 30 g du tissu thyroïdien où la concentration atteint donc 0,1%.

L'iode, sous forme de NaI pro analysis et séché, a été irradié durant 20 minutes à 20 cm environ de la cible. La courbe de décroissance de l'activité est donnée par la figure 13, avec deux échelles de l'abscisse.

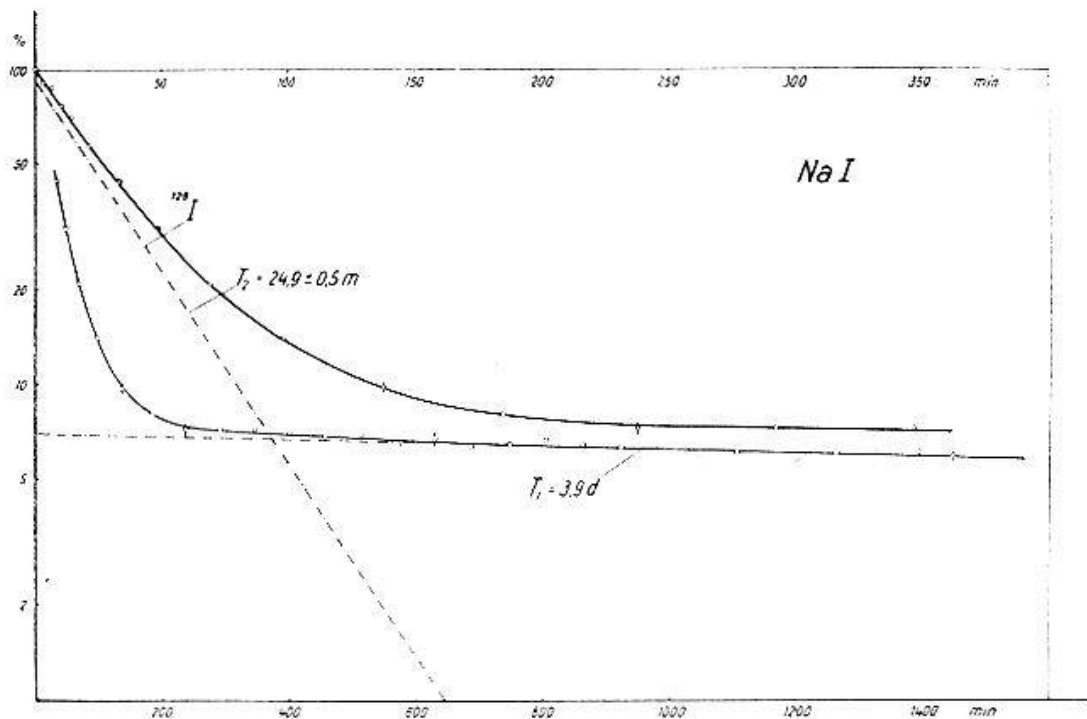
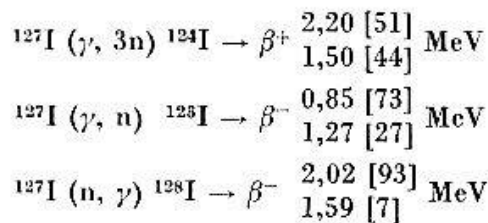


Fig. 13. Décroissance d'activité du NaI irradié (la période observée de 13,0 d n'est pas représentée).

Elle renferme deux périodes de 3,9 d et 24,9 m correspondant respectivement à ^{124}I et ^{128}I . Une observation de plus longue durée met en évidence une troisième période de 13,0 d correspondant à ^{126}I . Ces 3 isotopes sont produits par les réactions



La première réaction n'est pas connue et n'a pas encore été démontrée. La troisième réaction est provoquée par les neutrons présents dans le faisceau. Ceux-ci proviennent sans doute d'effets (γ, n) , produits dans la paroi du tube accélérateur du bétron.

La réaction ${}^{127}\text{I} (\gamma, n) {}^{126}\text{I}$ mise en évidence par *McElhinney*, etc. [8] conduit à un isotope de période 13,0 d pour lequel $E_{\beta_{\max}} = 1,27 \text{ MeV}$.

On peut effectuer un calcul approximatif de la dose de rayonnement bêta dissipée par l'iode dans la thyroïde, en supposant que la proportion des 3 isotopes actifs produits est la même que celle qui apparaît dans la courbe de décroissance de la figure et en supposant une désintégration bêta pure dont l'énergie moyenne a été appréciée. Le dosage absolu de ^{128}I a été effectué comme pour les autres éléments. Les données et les résultats du calcul figurent dans le tableau ci-dessous :

		Isotope	%	A $\mu\text{C/g}$	T	\bar{E}_{β}	Dose en rep.
Iode	0,1% par g de tissu	^{124}I	6,5	$0,04 \cdot 10^{-2}$	3,9 d	0,7	$0,01 \cdot 10^{-2}$
		^{126}I	0,5	$0,003 \cdot 10^{-2}$	13,0 d	0,4	$0,0014 \cdot 10^{-2}$
		^{128}I	93	$0,6 \cdot 10^{-2}$	24,9 m	0,8	$0,0007 \cdot 10^{-2}$

Irradiation de 20 minutes à 100 cm de la cible et 36,5 r/min.

Le rayonnement dissipé par les isotopes de l'iode dans une thyroïde irradiée est donc encore plus faible que la dose de rayonnement dissipée par les premiers éléments étudiés.

*

En conclusion, la radioactivité induite dans l'organisme par la radiation de freinage de 31 MeV dissipe dans les tissus une dose de rayonnement tout à fait négligeable de l'ordre de 0,005% de la dose de rayonnement direct qui l'a produite.

Cette radioactivité induite possède cependant un intérêt scientifique. Elle permettra par exemple de doser directement dans les tissus certains éléments comme l'oxygène, le carbone ou le calcium. Elle permettra également d'étudier la diffusion des mêmes éléments dans l'organisme en dehors du territoire irradié.

*

Nous exprimons nos remerciements à l'Académie Suisse des Sciences Médicales dont une subvention a permis l'étude de l'appareil à dosage absolu du rayonnement bêta utilisé pour ce travail.

Nous devons une reconnaissance toute particulière à M. le Professeur Dr. *H. R. Schinz* pour les moyens matériels importants qu'il a fait mettre à notre disposition et pour l'intérêt qu'il a témoigné à cette étude.

M. W. Mauderli a effectué avec beaucoup d'obligeance les irradiations au béta-tron.

Nous remercions enfin Mlle *M.-L. Boss* qui a effectué les calculs et les corrections statistiques des courbes de décroissance.

Résumé

La radiation de freinage du béta-tron de 31 MeV induit dans les tissus des radioéléments, dont les plus importants sont ^{15}O , ^{11}C , ^{13}N , ^{30}P , ^{128}I , ^{124}I , ^{126}I et les isotopes actifs issus du calcium ^{38}K et ^{43}K . La musculature striée et le champ d'irradiation à la surface de la peau ont des courbes d'activité qui renferment les deux périodes principales de 2,1 et 20,5 minutes dues à ^{15}O et ^{11}C . Dans les os, une période longue de 21,2 h est attribuée à ^{43}K provenant du calcium. L'activité spécifique des radioéléments produits séparément a été déterminée à l'aide d'un appareil à dosage absolu. Cette activité atteint, pour une irradiation de 20 minutes à 100 cm de la cible, totalisant 730 röntgens, environ 0,1 μC par gramme-élément pour le carbone 11 et l'azote 13, 0,26 μC pour l'oxygène 15, 0,2 μC pour le phosphore 30 et 0,006 μC pour l'iode 128. La dose de rayonnement supplémentaire due à la radioactivité artificielle induite est de l'ordre de 0,5 dix-millième de la dose de rayonnement direct, mesurée par la chambre d'ionisation au maximum de la courbe de transition. La radioactivité induite peut permettre le dosage direct dans les tissus de certains éléments et, par exemple, le rapport de O : C.

Zusammenfassung

Die Bremsstrahlung des 31-MeV-Betatrons erzeugt in den Geweben Radioelemente, von denen ^{15}O , ^{11}C , ^{13}N , ^{30}P , ^{128}I , ^{124}I , ^{126}I und die vom Calcium abgeleiteten aktiven Isotopen ^{38}K und ^{43}K die wichtigsten sind. Die

quer gestreifte Muskulatur und das Bestrahlungsfeld an der Oberfläche der Haut haben Aktivitätskurven, welche die beiden auf ^{15}O und ^{11}C zurückzuführenden Hauptperioden von 2,1 und 20,5 Minuten umfassen. Eine 21,2 Stunden lange Periode in den Knochen wird dem aus dem Calcium abgeleiteten ^{43}K zugeschrieben. Die getrennt entwickelte spezifische Aktivität der Radioelemente ist mit Hilfe eines Apparates für absolute Dosierung bestimmt worden. Für eine Bestrahlung von 20 Minuten in einer Entfernung von 100 cm vom Fokus und eine Strahlendosis von 730 r, erreicht die spezifische Aktivität $0,1 \mu\text{C}$ pro Gramm-Element für Kohlenstoff 11 und Stickstoff 13, $0,26 \mu\text{C}$ für Sauerstoff 15, $0,2 \mu\text{C}$ für Phosphor 30 und $0,006 \mu\text{C}$ für Jod 128. Die auf die künstliche eingeführte Radioaktivität zurückzuführende zusätzliche Strahlendosis beträgt 0,5 Zehntausendstel der mit der Ionisationskammer am Maximum der Transitionskurve gemessenen direkten Strahlendosis. Die eingeführte Radioaktivität kann die direkte Dosierung gewisser Elemente in den Geweben erlauben und zum Beispiel die Messung des Verhältnisses O : C.

Riassunto

L'irradiazione di freno del betatron di 31 MeV induce nei tessuti radioelementi fra i più importanti il ^{15}O , ^{11}C , ^{13}N , ^{30}P , ^{128}I , ^{124}I , ^{126}I e gli isotopi attivi derivanti dal calcio ^{38}K e ^{43}K . La muscolatura striata e il settore d'irradiazione alla superficie del tessuto cutaneo danno curve di attività che racchiudono i due periodi principali di 2,1 e 20,5 minuti dovuti al ^{15}O e al ^{11}C . Nelle ossa un periodo lungo di 21,2 ore è attribuito al ^{43}K derivante dal calcio. L'attività specifica dei radioelementi prodotti separatamente ha potuto essere determinata grazie ad un apparecchio di dosaggio assoluto. Dopo una irradiazione di 20 minuti, cioè dopo una dose di 730 r in distanza di 100 cm dal foco, si nota una attività di $0,1 \mu\text{C}$ per grammasostanza all'incirca per ^{11}C e ^{13}N , di $0,26 \mu\text{C}$ per ^{15}O , di $0,2 \mu\text{C}$ per ^{30}P e di $0,006 \mu\text{C}$ per ^{128}I . La dose di irradiazione supplementare indotta è di 0,5 diecimillesimi della dose di irradiazione diretta misurata dalla camera di ionizzazione al massimo della curva di transizione. La radioattività indotta può permettere il dosaggio diretto di certi elementi nei tessuti, per esempio il rapporto fra O e C.

Summary

The "Bremsstrahlung" of the 31 MeV betatron induces in the tissues some radio-elements of which the most important are ^{15}O , ^{11}C , ^{13}N , ^{30}P , ^{128}I , ^{124}I , ^{126}I and the active isotopes issued from the irradiation of calcium ^{38}K and ^{43}K . The striated musculature and the field of irradiation at the sur-

face of the skin have activity curves which confirm the two principle periods of 2.1 and 20.5 minutes due to ^{15}O and ^{11}C . A long period of 21.2 hours in the bones is attributed to ^{43}K issuing from calcium. The specific activity of radio-elements produced separately has been determined with an apparatus for absolute beta counting. The specific activity induced at 100 cm from the target with an irradiation of 20 minutes which delivers a dose of radiation of 730 r, is about $0.1 \mu\text{C}$ per gram-element for carbon 11 and nitrogen 13, $0.26 \mu\text{C}$ for oxygen 15, $0.2 \mu\text{C}$ for phosphorus 30 and $0.006 \mu\text{C}$ for iodine 128. The dose of supplementary radiation due to the artificial radio-activity induced is of the order of $0.5 \frac{1}{10000}$ of the dose of direct radiation measured with the ionisation chamber at the maximum of the transition curve. The radioactivity induced may allow the direct dosage into the tissues of certain elements, and for instance the measurement of the ratio of O : C.

1. Joyet, G., et Mauderli, W.: Revue Brown Boveri, septembre-octobre 281-91 (1951).
2. Lea, D. E.: Actions of radiations on living cells, Cambridge, New York 1947.
3. Mayneord, W. V., Martin, J. H., Layne, D. A.: Nature **164**, 728 (1949).
4. Wideroe, R.: Revue Brown Boveri, septembre-octobre 1951.
5. Selon «Recommendations of the International Commission on Radiological protection», London 1950.
6. Baldwin, G. C., et Koch, H. W.: Physical Rev. (Am.) **67**, 1 (1945).
7. Baldwin, G. C., et Klaiber, G. S.: Physical. Rev. (Am.) **70**, 259 (1946).
8. McElhinney, Hanson, Becker, Duffield et Diven: Physical. Rev. (Am.) **75**, 542 (1949).
9. Seaborg, G. T., et Perlman, I.: Table of Isotopes, Rev. mod. Physics. **20**, 587 (1948).
10. Cook, G. B., Duncan, J. F., Hewitt, M. A.: Nucleonics **8**, 24 (1951).
11. Nervik, W. E., et Stevenson, P. C.: Nucleonics 18-22, mars 1952.
12. Burt, B. P.: Nucleonics 28-43, août 1949.
13. Marinelli, L. D., Quimby, E. H., et Hine, A. J.: Nucleonics **2**, 56 (1948); **2**, 44 (1948).
14. Marinelli, L. D., Quimby, E. H., et Hine, A. J.: Amer. J. Röntgenol. **59**, 260 (1948).
15. Hine, G. J.: Nucleonics **3**, 32 (1948).
16. Price, G. A., et Kerst, D. W.: Physical Rev. (Am.) **77**, 806 (1950).
17. Perlman, M. et Friedlander, G.: Physical Res. (Am.) **74**, 442 (1948).
18. Ridenour, L. et Henderson, W.: Physical Rev. (Am.), **52**, 889 (1937).
19. Oppenheimer, C. et Pincussen, L.: Tabulae biologicae, Bd. **3**, 433-438, Berlin, W. Junk 1926.