



**HAL**  
open science

## Le tritium isotope de l'hydrogène de masse 3. Bibliographie et mise au point

P. Verzaux

► **To cite this version:**

P. Verzaux. Le tritium isotope de l'hydrogène de masse 3. Bibliographie et mise au point. Journal de Physique et le Radium, 1952, 13 (2), pp.94-106. 10.1051/jphysrad:0195200130209400 . jpa-00234544

**HAL Id: jpa-00234544**

**<https://hal.science/jpa-00234544v1>**

Submitted on 4 Feb 2008

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## EXPOSÉS ET MISES AU POINT BIBLIOGRAPHIQUES

LE TRITIUM ISOTOPE DE L'HYDROGÈNE DE MASSE 3.  
BIBLIOGRAPHIE ET MISE AU POINT

PAR P. VERZAUX,

Ancien élève de l'École Polytechnique.  
Institut de Physique Atomique (Université de Lyon).

**Sommaire.** — Après un bref historique sur la recherche du tritium, on examine les méthodes de préparation du tritium, ses propriétés radioactives, les principales réactions nucléaires actuellement connues avec le tritium et les applications de certaines d'entre elles comme sources de neutrons mono-cinétiques. On donne un aperçu des théories qui essayent de rendre compte de l'énergie de liaison et du moment magnétique du triton. On examine ensuite quelques propriétés physiques du tritium comparées à celles des autres isotopes de l'hydrogène et les propriétés de la réaction d'équilibre protium-tritium en présence d'eau. On termine par quelques applications qui ont été faites du tritium comme traceur en chimie et en biologie.

**Historique.** — La recherche du tritium isotope de l'hydrogène de masse 3, de symbole  $H^3$  ou  $T$ , est liée de près à la découverte du deutérium et il est intéressant de passer rapidement en revue les principales étapes qui ont mené à sa découverte. Nous allons voir comment l'idée première qui a guidé les recherches n'est pas celle qui a mené finalement au résultat.

Le deutérium est un des rares isotopes qui ait été découvert par la méthode spectroscopique. En 1931, Urey, Brickwedde et Murphy [4] s'aperçurent que les raies  $H\gamma$ ,  $H\beta$  et  $H\delta$  de l'hydrogène étaient accompagnées d'une raie bien plus faible. Les distances de ces faibles raies aux raies principales s'expliquaient très bien par l'existence d'un isotope de l'hydrogène de masse 2.

Urey et ses collaborateurs concentraient le deutérium par évaporation, mais peu de temps après il devint possible de préparer le deutérium par électrolyse de solutions aqueuses et comme il était probable que le tritium, s'il existait dans l'eau, se concentrait en même temps que le deutérium, cela encouragea les chercheurs à essayer de mettre en évidence les raies correspondant à l'isotope de masse 3.

En 1933, Lewis et Spedding examinèrent, par la méthode spectroscopique, un échantillon d'hydrogène enrichi en deutérium, contenant 67 pour 100 de deutérium, mais la sensibilité de l'appareil n'a pas permis de mettre en évidence les raies de tritium [1, 3.]

En septembre 1933, Latimer et Young utilisèrent une méthode magnéto-optique mettant en jeu la rotation du plan de polarisation de la lumière en présence d'un champ magnétique. Ils pensèrent avoir mis en évidence la présence de  $H^3$ , mais on reconnut, par la suite, que le résultat obtenu n'était pas concluant [1], [3].

Bleakney et ses collaborateurs, à Princeton [1], [3], s'attaquèrent au problème au moyen d'un spectrographe de masse. Ils examinèrent des échantillons de deutérium pur où ils observèrent des particules de masse 6, 5 et 4. Ils tracèrent la courbe

$$\frac{I}{P} = \frac{\text{Courant ionique de masse } 5}{\text{Pression}}$$

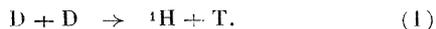
en fonction de la pression mesurée par le nombre d'ions  $D_2^+$ . Ils trouvèrent par extrapolation une valeur appréciable de  $\frac{I}{P}$  pour  $P = 0$ .

Ils interprétèrent cette valeur comme étant la mesure du rapport  $\frac{(DT)^-}{D}$  puisqu'on admettait que la concentration de l'ion triatomique  $(DDH)^+$  de masse 5 également, devenait négligeable aux faibles pressions. Ils trouvèrent qu'il y avait cinq atomes de tritium pour  $10^6$  de deutérium, donc un atome de tritium pour  $10^9$  d'hydrogène.

En avril 1935, Schwood, Taylor, Lozier et Bleakney [1], [3] électrolysèrent 75 t d'eau jusqu'à réduction à 0,5 cm<sup>3</sup>, soit une réduction de volume de 1/150 000 000°. Le spectromètre de masse semble indiquer la présence d'un ion  $(DT)^+$ . D'après eux, la proportion de tritium serait de 7 pour  $10^{10}$  d'hydrogène. Ils trouvèrent aussi que le facteur de séparation protium tritium est de 12.

Mais, à la même époque (1934), Rutherford, Oliphant, Harteck observèrent que quand du chlorure d'ammonium ou de l'acide phosphorique où l'hydrogène a été largement remplacé par le deutérium est bombardé par des deutons, il se forme deux groupes de particules. Le premier se compose de protons et le deuxième, en nombre égal, se compose de particules

simples de parcours 1,5 cm. Ils en conclurent que ce dernier groupe consiste en noyaux de l'hydrogène de masse 3,0151 et qu'on a la réaction



Des expériences d'électrolyse à grande échelle furent faites ensuite en Norvège [1], [3], 13 000 t d'eau étaient électrolysées, donnant 43,4 kg d'eau lourde et ceux-ci, à leur tour, étaient électrolysés jusqu'à réduction à 11 cm<sup>3</sup>. Cet échantillon observé par Aston au spectrographe de masse montra que la raie correspondant à la masse 5 était, sans aucun doute, celle de l'ion (DDH)<sup>-</sup> et qu'il n'y a pas de trace de raie correspondant à (DT)<sup>-</sup>.

En août 1937, Rutherford constatait, dans un article paru dans la *Nature*, qu'on était arrivé à préparer du tritium par la réaction (1), mais que les tentatives pour l'isoler par électrolyse avaient échoué.

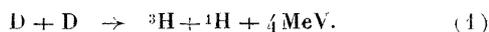
En 1938, Sherr, Smith et Bleakney reprenant leurs expériences, décomposèrent un échantillon d'eau lourde sur un fil chauffé de tungstène et envoyèrent le deutérium dans une succession de pompes à diffusion pour concentrer les molécules de (DT). Après une analyse soignée, ils en conclurent qu'ils n'avaient pu mettre en évidence la présence de tritium et que les autres interprétations étaient erronées. Le problème de l'abondance naturelle du tritium n'était pas résolu.

En 1947, Eidinoff [3], par la méthode bien plus sensible du compteur de Geiger que nous décrirons plus loin est arrivé à montrer que le tritium existe dans l'eau naturelle, mais en proportion bien plus faible que ne le soupçonnaient les premiers chercheurs.

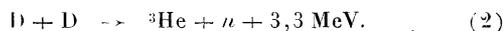
### Préparation du tritium.

1. **Réactions nucléaires.** — Il existe de nombreuses réactions nucléaires donnant naissance au tritium. Nous commencerons par examiner celles qui sont intéressantes pour sa préparation.

1° RÉACTION D(d $\nu$ )<sup>3</sup>H, soit



Concurremment avec cette réaction, il s'en produit une autre



Nous avons vu que c'est elle qui est à l'origine de la découverte du tritium. Des études détaillées ont paru sur elle ces dernières années [5], [6], [7], [8], [9] et [11] et ses propriétés sont bien connues maintenant.

Son seuil est très bas. La section de choc globale est 1,3 · 10<sup>-4</sup> barn pour des deutons incidents de 15 keV, elle augmente rapidement pour atteindre 10<sup>-2</sup> barn vers 60 keV et 0,052 barn à 300 keV. Elle passe par un maximum de 0,09 barn à 2 MeV et conserve sensiblement cette valeur jusqu'à 3,5 MeV. Elle est égale à 0,073 barn à 10 MeV. La distribution angulaire, dans le système du centre de gravité, suit la loi

$$F(\theta) = k(1 + A \cos^2\theta + B \cos^4\theta),$$

A et B sont fonction de l'énergie. Aux faibles énergies, le 3<sup>e</sup> terme n'est pas nécessaire, B passant par la

valeur zéro entre 0,5 et 1 MeV. Aux fortes énergies, il croît lentement. A positif aux faibles énergies s'annule vers 1,5 MeV, puis devient négatif (fig. 1).

La réaction concurrente D(d $\nu$ )<sup>3</sup>He se comporte d'une manière semblable et son rendement est voisin de celui de la réaction (dp). Aux faibles énergies (26 keV < E<sub>d</sub> < 63 keV), le rapport du rendement des protons à celui des neutrons est 1,15 ± 0,15. Ensuite le rendement de la réaction (dn) dépasse légèrement celui de la réaction (dp) et lui reste supérieur en suivant une ligne sensiblement parallèle ( $\sigma \sim 0,1$  barn).

La réaction DD est utilisée plutôt comme source de neutrons monocinétiques, elle peut être utilisée aussi comme source de tritium, bien qu'on semble préférer, en général, une des deux suivantes :



On se sert actuellement de trois sortes de cibles.

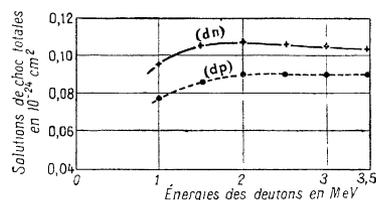


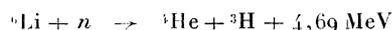
Fig. 1. — Sections de choc totales des réactions D(d $\nu$ )He<sup>3</sup> et D(d $\nu$ )H<sup>3</sup> [7]

a. *Glace lourde* refroidie par l'azote liquide. La cible doit être assez épaisse, une cible mince étant facilement évaporée par le faisceau de deutons. Elle est utilisée aux faibles énergies de bombardement.

b. *Deutérium gazeux* p acé dans une chambre où le faisceau pénètre par une fenêtre fermée par une feuille de nylon [8], d'aluminium ou de nickel. Ces cibles gazeuses ne sont utilisables qu'aux énergies élevées (supérieures à 0,5 MeV).

c. Graves et ses collaborateurs [10] ont mis au point des cibles de tantale et de zirconium avec deutérium occlus. Le tantale a l'inconvénient d'avoir un degré de fragilité qui augmente avec la quantité de gaz occlus dans le métal. Le zirconium permet de fabriquer des cibles assez rigides, d'autant plus qu'il est possible de souder au zirconium un support de tungstène, mais a l'inconvénient de présenter une activité à longue période après le bombardement qui oblige à laisser la cible reposer pendant un mois. Ces cibles ne sont également utilisables qu'aux énergies élevées.

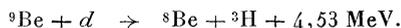
2° LA RÉACTION <sup>6</sup>Li(n $\alpha$ )<sup>3</sup>H, soit



a été découverte en 1935 par Taylor et Goldhaber qui utilisaient des plaques photographiques imprégnées de sel de lithium. Cette réaction a des propriétés bien connues [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17]. Elle a un bon rendement pour les neutrons lents  $\sigma' = 80$  barns à 0,02 eV, les deux isotopes <sup>6</sup>Li et <sup>7</sup>Li étant dans leurs proportions naturelles.  $\sigma$  décroît suivant la loi en  $\frac{1}{v}$ .

Pour extraire le tritium, on peut, après le bombardement, soit dissoudre le lithium dans l'eau, ce qui donne HT, soit le fondre et extraire le tritium au moyen d'un jet d'hydrogène. Dans le 1<sup>er</sup> cas, la moitié du tritium passe dans LiOT et est perdue si l'on veut utiliser le tritium comme traceur. Dans le 2<sup>e</sup> cas, une certaine quantité de tritium est perdue par suite de la formation de LiT (2).

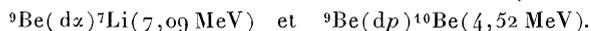
### 3° LA RÉACTION Be (df), soit



C'est une réaction concurrente de la réaction principale des cyclotrons et accélérateurs linéaires productrice de neutrons



Il y a encore deux autres réactions concurrentes

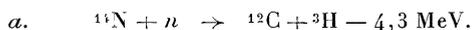


Elle a été découverte par O'Neal et Goldhaber en 1940 [18]. Son seuil est très bas : 2 000 eV (2).

Une partie importante du tritium reste occluse dans la cible probablement à l'état de TD gazeux. On place la cible dans un tube où l'on fait le vide et l'on introduit de l'hydrogène qui chasse le tritium de la cible. Cet hydrogène passe sur de l'oxyde de cuivre à 300° et l'on obtient de l'eau tritiée, forme sous laquelle on peut facilement conserver le tritium. Pour l'utilisation, on réduit l'eau par le magnésium à 650° ou l'amalgame de magnésium à 400°. On obtient facilement par cette méthode des échantillons de 1 mC, dilué dans 2 mmol-g d'hydrogène [38]. On peut aussi dissoudre le béryllium dans l'acide chlorhydrique ou sulfurique et faire passer le gaz obtenu sur l'oxyde de cuivre [79].

4° LA RÉACTION  ${}^2\text{H}(n\gamma){}^3\text{H}$  ( $Q = 6,244 \text{ MeV}$ ), réaction de capture des neutrons par le deutérium a été mise en évidence dans les piles ([11], p. 297). Sa section de choc est naturellement très faible  $\sigma \sim 2 \cdot 10^{-4}$  barn. A la longue, la concentration de tritium dans l'eau lourde s'élève et il est possible qu'elle devienne suffisante pour permettre l'extraction du tritium par électrolyse.

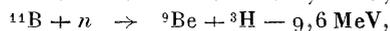
5° AUTRES RÉACTIONS. — Il y a bien d'autres réactions nucléaires donnant le tritium :



ou

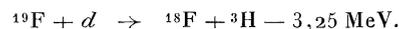


Cette réaction a été découverte par Cornog et Libby en 1941 [19] avec des neutrons de 16 MeV. La section de choc est de l'ordre de  $10^{-26} \text{ cm}^2$  à un facteur 5 près. Libby [20] pense qu'elle est produite naturellement par les neutrons secondaires des rayons cosmiques et comme le tritium se désintègre en  ${}^3\text{He}$ , il a démontré qu'elle est à l'origine de la proportion anormalement élevée de l'hélium léger atmosphérique par rapport à  ${}^4\text{He}$  ( $10^{-7}$ ), alors que la proportion isotopique normale est  $10^{-8}$



réactions mises en évidence par Cornog et Libby [19]. La section de choc est du même ordre de grandeur que celle de la réaction précédente.

c. Le bombardement des sels de fluor par des deutrons donne du tritium [21]

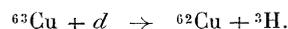


Le seuil de cette réaction est 6 MeV et pour des deutrons de 8,8 MeV la section de choc est  $3,9 \cdot 10^{-17} \text{ cm}^2$ .

d. La réaction  ${}^3\text{He}(np){}^3\text{H}$  a été récemment étudiée par Coon et Nobles [22] et King et Goldstein [23] pour les neutrons lents. La section choc est de l'ordre de 5 000 barns pour les neutrons thermiques et décroît suivant la loi en  $\frac{1}{v}$ .

$$\sigma_{3\text{He}} v = (11,2 \pm 0,5) 10^{-6} \text{ barns} - m : s.$$

e. *Éléments lourds.* — Le bombardement de certains éléments lourds par des deutrons donne du tritium. Par exemple :



Le seuil de la réaction  $\text{Cu}(d{}^3\text{H})$  est inférieur à 6 MeV, le cuivre formé est radioactif de période 10,5 mn.

Kundu et Pool [24] ont signalé des réactions ( $d{}^3\text{H}$ ) dans Ag, Cu, Cb avec des deutrons de 10 MeV. Ces auteurs ont mis en évidence la réaction  ${}^{98}\text{Cb}(d{}^3\text{H}){}^{92}\text{Cb}$ , obtenant le  ${}^{92}\text{Cb}$  radioactif de période 10,1 jours. L'argent donne la réaction  ${}^{107}\text{Ag}(d{}^3\text{H}){}^{106}\text{Ag}$ ,  ${}^{106}\text{Ag}$  ayant la période 24,4 mn.

2. *Électrolyse.* — Le tritium existe dans l'eau naturelle : cela a été mis en évidence par Eidinoff [3] qui a trouvé qu'il y avait moins d'un atome de tritium pour  $10^{17}$  d'hydrogène.

En théorie, il est donc possible de séparer le tritium par électrolyse de l'eau, comme on le fait pour le deutérium.

Quand on électrolyse un mélange de deux isotopes de masses différentes, c'est l'isotope le plus léger qui est libéré le plus rapidement. Prenons le cas de l'hydrogène et du deutérium. On appelle facteur de séparation le rapport :

$$s_{\text{HD}} = \frac{\left(\frac{H}{D}\right)_{\text{gaz}}}{\left(\frac{H}{D}\right)_{\text{liquide}}},$$

$H$  et  $D$  étant les concentrations des deux isotopes.

Ici  $s_{\text{HD}} = 6$  à 8.

Dans le cas de l'hydrogène et du tritium, la différence de masse relative étant la plus grande qui puisse exister, on a un facteur de séparation important

$$s_{\text{HT}} = \frac{\left(\frac{H}{T}\right)_{\text{gaz}}}{\left(\frac{H}{T}\right)_{\text{liquide}}} = 13 \text{ à } 14 \quad [33].$$

Pour le deutérium et le tritium,  $s_{\text{DT}} = 2$ .

Si nous partons d'un volume initial  $V_0$  avec les concentrations  $H_0$  et  $T_0$ , pour aboutir au volume

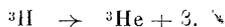
final  $V$  avec les concentrations  $H$  et  $T$ , on démontre la relation

$$\frac{H_0}{H} \left( \frac{T_0}{T} \right)^s = \left( \frac{V_0}{V} \right)^{s-1}.$$

Nous avons vu que les tentatives pour isoler le tritium par la méthode électrolytique avaient échoué et, jusqu'à nouvel ordre, elle reste purement théorique.

### Désintégration du tritium.

En 1931, Alvarez et Cornog, en mesurant l'activité du gaz obtenu par le bombardement de deutérium gazeux par les deutons découvrirent que le tritium était radioactif. La désintégration donne de l'hélium léger de masse 3



La constante radioactive est trop faible pour pouvoir être trouvée par la courbe de désintégration. O'Neal et Goldhaber la trouvèrent indirectement en exposant du lithium pendant un temps donné à un faisceau de neutrons lents de densité connue et déterminèrent le nombre de désintégrations par seconde en dissolvant le lithium dans l'eau et introduisant une fraction connue de l'hydrogène produit dans un compteur. Ils trouvèrent que la vitesse de désintégration était  $7 \cdot 10^{-10}$  s et la période était, par suite,  $T = 31 \pm 8$  ans.

Cette valeur a été longtemps admise, mais, plus récemment, Novick [25] a mesuré le volume de  $\text{He}^3$  produit par la désintégration d'un échantillon connu d'un mélange protium + tritium. Il a trouvé ainsi

$$T = 12,1 \pm 0,5 \text{ ans.}$$

Par une méthode différente, Goldblatt et ses collaborateurs [26] ont mesuré la décroissance du courant d'une chambre d'ionisation contenant un mélange  $\text{H}^1 + \text{H}^3$ . Ils ont trouvé comme période

$$T = 10,7 \pm 2 \text{ ans.}$$

On admet que la période du tritium est  $T = 12,5$  ans.

### Étude du spectre $\beta$ du tritium.

La désintégration du tritium donne des  $\beta$  très mous et beaucoup de chercheurs ont mesuré, depuis 1940, l'énergie maxima et l'énergie moyenne de ces  $\beta$ . Voici les résultats des mesures les plus récentes :

Jenes, Ghormley et Sweeton [27], par une méthode analogue à celle de Novick, ont mesuré la période du tritium, et confirmé le résultat trouvé par ce dernier en trouvant  $12,46 \pm 0,5$  ans.

Leur méthode consistait aussi à mesurer la variation de la proportion de  ${}^3\text{He}$  dans un mélange  ${}^1\text{H} + {}^3\text{H}$ . Ils ont, de plus, mesuré l'énergie moyenne du rayonnement  $\beta$  par une méthode calorimétrique, le calorimètre étant maintenu à la température de l'azote liquide. Ils ont trouvé 5,69 keV.

Hanna et Pontecorvo [27], utilisant un compteur proportionnel et un analyseur d'impulsions, ont tracé

le diagramme de Curie, portant l'énergie  $\varepsilon$  en abscisse

et  $\left[ \frac{\varepsilon \sqrt{\varepsilon^2 - 1}}{N(\varepsilon)} \right]^{\frac{1}{2}}$  en ordonnée qui est proportionnel à  $(\varepsilon_0 - \varepsilon)$ ,  $\varepsilon_0$  étant l'énergie maxima du spectre. Ils ont trouvé

$$\varepsilon_0 = 18,9 \pm 0,5 \text{ keV.}$$

Curran, Angus et Cockroft [30], par une méthode semblable, ont trouvé 18,6 keV.

Enfin, Graves et Mayer [29], employant une méthode toute différente, ont absorbé les rayons  $\beta$  du tritium par les atomes d'un élément lourd comme le zirconium ou le tantale et le spectre X ainsi formé arrive sur la fenêtre mince d'un compteur après passage à travers un absorbant en aluminium; on mesure le taux de comptage en fonction de l'épaisseur de l'aluminium. Ayant ainsi déterminé l'énergie des rayons X, on peut en déduire celle des  $\beta$ . Ils ont trouvé que le point extrême du spectre  $\beta$  est  $18 \pm 0,5$  keV.

Le spectre  $\beta$  du tritium présente l'intérêt suivant :

1° Vérifier la théorie de Fermi sur la désintégration  $\beta$  qui conduit à la formule

$$N(\varepsilon) = \varepsilon \sqrt{\varepsilon^2 - 1} (\varepsilon_0 - \varepsilon)^2, \quad \text{avec} \quad \varepsilon = \frac{E}{me^2} + 1,$$

$E$  étant l'énergie des  $\beta$ .

Le maximum calculé a lieu pour 2 keV, le maximum expérimental pour 2,5 keV et il est moins accusé que le maximum calculé [31].

2° Donner un moyen de calculer la masse au repos du neutrino. Dans le cas d'une masse non nulle du neutrino, la formule ci-dessous devient

$$N(\varepsilon) = \varepsilon \sqrt{\varepsilon^2 - 1} (\varepsilon_0 + \mu - \varepsilon) (\varepsilon - \varepsilon)^{\frac{1}{2}} (2\mu + \varepsilon_0 - \varepsilon)^{\frac{1}{2}},$$

avec

$$\mu = \frac{\text{Masse de neutrino}}{\text{Masse de l'électron}}.$$

Ainsi la forme de la courbe  $\left[ \frac{N(\varepsilon)}{\varepsilon \sqrt{\varepsilon^2 - 1}} \right]^{\frac{1}{2}}$  au voisinage de  $\varepsilon_0$  dépend étroitement de  $\mu$ .

Curran, Angus et Cockroft [30] en ont déduit que la masse de neutrino est inférieure à 1/500<sup>e</sup> de la masse de l'électron, soit 1 keV, mais ne purent arriver à un résultat concluant.

D'autre part, si l'on considère l'intégrale

$$F(\varepsilon_0) = \int_1^{\varepsilon_0} N(\varepsilon) d\varepsilon = \int_1^{\varepsilon_0} \varepsilon \sqrt{\varepsilon^2 - 1} (\varepsilon_0 - \varepsilon)^2 d\varepsilon,$$

on constate que le produit  $TF(\varepsilon_0)$  est à peu près constant pour les transitions permises. Pour le tritium, cette quantité est anormalement faible, voisine de 600, alors que pour  ${}^6\text{He}$  elle est de l'ordre de 5 700. Kono-pinski [32], se servant de la formule contenant  $\mu$ , a déterminé  $\mu$  de manière à obtenir une meilleure concordance. Il a ainsi trouvé que la masse du neutrino était de l'ordre de 1/30<sup>e</sup> de celle de l'électron.

Cependant, Slack, Owen et Primakoff [33] ont fait observer qu'en prenant pour la période du tritium  $T = 12,46$  années et l'énergie maxima égale à 18,5 keV, cette différence s'atténue considérablement. On trouve  $TF(\varepsilon_0) = 3 360$ .

Le problème de la masse au repos du neutrino n'est donc pas résolu d'une façon satisfaisante.

3° Déterminer la différence de la masse entre  $^3\text{H}$  et  $^3\text{He}$

$$^3\text{H} - ^3\text{He} = 0,000018. \quad [31]$$

En résumé, on peut admettre les valeurs suivantes :

$$T = 12,5 \text{ ans}, \quad E_{\text{max}} = 18,5 \text{ keV}, \quad E_{\text{moy}} = 5,69 \text{ keV}.$$

**Dosage du tritium.**

Le dosage du tritium est une application de ses propriétés radioactives. Son principal avantage est sa longue période qui en rend le dosage facile. Mais il a l'inconvénient d'émettre des rayons  $\beta$  très mous et l'on est obligé de l'introduire dans le compteur, soit à l'état gazeux, soit à l'état de composé gazeux. On a proposé, pour les mesures quantitatives, l'emploi du compteur de Geiger ou de la chambre d'ionisation.

1. **Emploi du compteur de Geiger.** — Suivant les expérimentateurs, les mélanges utilisés comme gaz de compteur ont été très divers. Powell a utilisé du butane actif, Fontana de la vapeur d'eau active avec

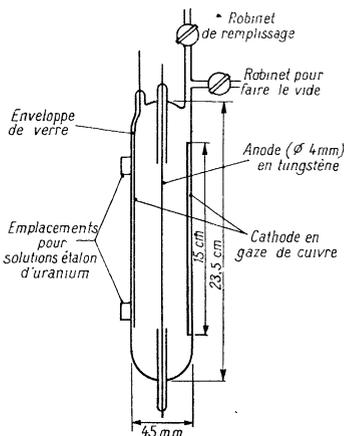


Fig. 2. — Tube de Geiger pour le comptage du tritium.

de l'éthanol, Allen et Libby de l'hydrogène actif avec l'éthanol, Black et Taylor un mélange hydrogène-vapeur d'eau argon-éthanol afin d'étudier le mélange isotopique hydrogène-eau [2]. La méthode la plus précise est celle d'Eidinoff qui utilise un mélange hydrogène-alcool-argon et sur laquelle nous allons nous étendre un peu [34].

**COMPTEUR.** — Le volume effectif du compteur est  $200 \text{ cm}^3$ . Ses dimensions sont indiquées sur la figure 2. Il est muni d'un tube capillaire avec un robinet pour le remplissage et d'un tube assez large avec un robinet pour faire le vide.

Bien que la lumière n'affecte pas beaucoup le comptage, le tube est protégé de la lumière pendant les mesures. Il est entouré en permanence d'un écran de plomb de  $2 \text{ cm}$  d'épaisseur pour réduire les variations de mouvement propre.

**GAZ UTILISÉ.** — Le tritium, sous forme de HT, est dilué suffisamment pour fournir une activité de 100 comptages par minute par millimètre de pression. L'argon est purifié par passage dans un tube rempli de Mg à  $625^\circ$  dans un tube rempli de  $\text{CuO}$  à  $350^\circ$  et un tube contenant de la soude, de la chaux et de l'anhydride phosphorique. L'alcool éthylique absolu est distillé sous vide après être passé sur  $\text{CaO}$ .

Le seuil du compteur est à peu près  $1250 \text{ V}$  pour un mélange contenant  $20 \text{ mm}$  d'hydrogène,  $20$  à  $25 \text{ mm}$  d'éthanol,  $20$  à  $25 \text{ mm}$  d'argon. Ces compteurs ont un palier de  $20$  à  $40 \text{ V}$  commençant  $50 \text{ V}$  au-dessus du seuil. Le mélange hydrogène-alcool-argon possède une bonne ionisation spécifique par unité de pression du mélange égale à plusieurs fois celle de l'hélium. Dans l'étude des mélanges contenant HT, on constate que le taux de comptage par minute par millimètre de pression partielle de HT, après déduction du mouvement propre qu'on mesure avec un mélange inactif de même composition, est constant à 2 pour 100 près. On possède donc une méthode satisfaisante pour doser le tritium.

**APPLICATIONS.** — 1° *Détermination de l'abondance du tritium dans l'eau* [3]. — On prend un mélange hydrogène-tritium enrichi dans le rapport  $F = 2 \cdot 10^4$ .

Soient  $n_T$  le nombre d'atomes de tritium,  $N_H$  le nombre d'atomes d'hydrogène.

Si  $\Delta n_T$  est le nombre de  $\beta$  émis pendant le temps  $\Delta$ , on a

$$\frac{\Delta n_T}{\Delta t} = \frac{0,693 n_T}{t_{\frac{1}{2}}}$$

$t_{\frac{1}{2}}$  étant la période.

Nombre de molécules-grammes d'hydrogène :  $\frac{PV}{RT}$

Nombre d'atomes d'hydrogène :  $N_H = \frac{2 N_A PV}{RT}$  ;

$N_A$ , nombre d'Avogadro.

Le pourcentage de tritium dans le mélange est  $\frac{N_H}{n_T}$

et le pourcentage dans l'hydrogène naturel est  $\frac{N_H F}{n_T}$ .

Le mouvement propre du compteur est 2,85 comptages par seconde. On introduit le mélange actif et l'on constate que l'écart moyen observé dans quatre expériences est 0,03 comptage par seconde.

Donc

$$\frac{\Delta n_T}{\Delta t} = 0,03.$$

Avec les valeurs numériques  $P = 22 \text{ mm}$ ,  $V = 220 \text{ cm}^3$ ,  $T = 300^\circ \text{ K}$  et  $t_{\frac{1}{2}} = 31 \text{ ans}$ , on trouve

que la proportion de tritium est  $1,5 \cdot 10^{-13}$  et dans l'eau normale il y a moins d'un atome de tritium pour  $10^{17}$  d'hydrogène.

*Remarque.* — Avec  $t_{\frac{1}{2}} = 12 \text{ ans}$ , on trouverait  $3 \cdot 10^{18}$ .

2° *Détermination du facteur de séparation cathodique hydrogène-tritium* [35]. — Eidinoff a électrolysé en milieu alcalin de l'eau enrichie en tritium contenant environ  $10^{-11}$  atome de tritium pour un d'hydrogène

et une proportion normale de deutérium. Les électrodes sont en platine. Le facteur de séparation est

$$s_{HT} = \frac{\left(\frac{H}{T}\right)_{\text{gaz}}}{\left(\frac{H}{T}\right)_{\text{liquide}}} \quad \text{ou} \quad \left| \frac{\left(\frac{T}{H}\right)_{\text{liquide}}}{\left(\frac{T}{H}\right)_{\text{gaz}}} \right|.$$

La proportion de tritium étant faible, le numérateur et le dénominateur sont proportionnels à la radioactivité d'un échantillon d'hydrogène de chaque phase. On détermine l'activité du tritium de la solution en transformant des échantillons de 0,05 g de la solution en hydrogène gazeux sur du magnésium à 625°.

**Résultats.** — L'auteur a fait deux expériences à 20° avec des feuilles planes de platine comme électrodes, une solution alcaline à 10 pour 100, une densité de courant de 0,1 A : cm<sup>2</sup>.

Pour la solution alcaline, on a 571 comptages par minute par millimètre d'hydrogène (en moyenne).

Pour le gaz cathodique : 1<sup>re</sup> électrolyse, 38,9, d'où le facteur de séparation, 14,7; 2<sup>e</sup> électrolyse, 42,7, d'où le facteur de séparation, 13,4.

Ce résultat a été retrouvé théoriquement par Horiuti et Nakamura [36] à partir de la valeur  $K$  de la constante de la loi de la masse de l'équilibre eau-tritium donnée par Libby [2]. Ils ont trouvé : 15 pour des électrodes de nickel, 16 pour des électrodes de platine.

**AUTRE MÉTHODE DE DOSAGE UTILISANT LE COMPTEUR DE GEIGER.** — White, Campbell et Payne [37] ont fait observer que si l'on a à faire des dosages répétés, comme c'est le cas en biologie, la méthode de réduction de l'eau active en hydrogène gazeux est trop longue. Aussi ont-ils fait agir l'eau sur le carbure d'aluminium et ont obtenu un gaz qui est un mélange de méthane-ammoniac-hydrogène sulfuré et de carbures non saturés et ses propriétés permettent d'en faire un gaz de remplissage satisfaisant pour les compteurs.

**2. Emploi de la chambre d'ionisation [38].** — Henriques et Margnetti ont préparé, en se servant de la réaction  $\text{Be}(\alpha, n)$ , un échantillon d'eau tritiée par la méthode indiquée plus haut. Cet échantillon est transformé en hydrogène gazeux par réduction sur l'amalgame de magnésium à 400° (au lieu de 620 avec le magnésium).

L'hydrogène est introduit dans une chambre d'ionisation munie d'un électroscope de Lauritsen à fibre de quartz. Un manomètre mesure la pression de l'hydrogène et, connaissant le volume de la chambre, on peut calculer le nombre de millimolécules d'hydrogène. On introduit ainsi dans la chambre, 10 mmol. Pour y arriver, on ajoute à l'eau de l'échantillon de l'eau additionnelle pour faire 11 mmol, soit 200 mg, de façon à tenir compte des pertes, des espaces morts, etc.

On introduit successivement dans la chambre de l'hydrogène inactif pour évaluer le mouvement propre, de l'hydrogène d'un échantillon étalonné et ensuite l'échantillon à mesurer. Ces trois mesures, compte tenu de l'eau additionnelle, permettent d'évaluer la proportion de tritium.

Une comparaison avec le compteur de Geiger montre que la sensibilité relative, soit le rapport  $\frac{\text{Activité}}{\text{mouvement propre}}$  est égal à 40 pour 100 de celle d'un compteur de même volume à la même pression. On peut détecter  $10^{-4}$   $\mu\text{C}$  dans 10 mmol d'hydrogène.

Pour vérifier la valeur de cet appareil pour le dosage du tritium, Henriques et Margnetti ont fait des analyses de mélanges de benzène inactif avec du benzène actif, celui-ci étant préparé par échange, sur du nickel comme catalyseur, des atomes d'hydrogène du benzène avec HT. On part de 160 mg de benzène (soit 6 mmol d'hydrogène) qu'on brûle et à l'eau obtenue, soit environ 108 g, on ajoute de l'eau additionnelle pour faire 200 mg. Pour mesurer l'activité de l'échantillon, on prend le rapport

$$R_i = \frac{w_1 - w_2}{w_1} \frac{\left(\frac{d}{t}\right)_s - \left(\frac{d}{t}\right)_b}{\left(\frac{d}{t}\right)_b},$$

où

$w_1$  est le poids de l'eau résultant de la combustion du benzène;  
 $w_2$  est le poids de l'eau additionnelle;  
 $d$  est la distance parcourue par la fibre de l'électroscope pendant le temps  $t$ ;  
 $s$ , l'échantillon essayé;  
 $b$ , le mouvement propre.

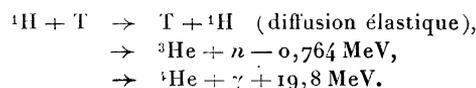
En prenant comme unité de concentration de tritium celle de l'échantillon le moins actif, on constate que  $R_i$  est proportionnel à la concentration relative de tritium, avec des écarts moyens de l'ordre de 1 pour 100.

### Réactions nucléaires avec le tritium.

De nombreux travaux sur les réactions nucléaires du tritium ont paru récemment. Ils se rapportent à l'étude des réactions du tritium avec les éléments légers : protium, deutérium et le tritium lui-même, ainsi que le lithium et à l'étude des réactions produites par les tritons servant de particules de bombardement sur certains éléments lourds et qui ont mené à l'hypothèse de l'existence du dineutron  $n^2$ .

**1. Réactions avec les éléments légers.** — La plupart sont du type  $(t, \alpha)$  et sont alors fortement exoénergétiques. Elles donnent, soit des  $\gamma$ , soit des neutrons. Le fait que  ${}^4\text{He}$  n'ait pas de niveau d'excitation au-dessous de 21 MeV a pour conséquence que des neutrons ou ces  $\gamma$  sont monoénergétiques. Une seule réaction endoénergétique, la réaction  $\text{T}(pn){}^3\text{He}$ .

**1° RÉACTIONS DES PROTONS AVEC LE TRITIUM [39], [40], [41], [42].** — On peut avoir les trois réactions suivantes :



Ces réactions ont été étudiées par Jervis, Hemmen

dingier et leurs collaborateurs. La cible était constituée par le tritium gazeux, bombardé par des protons.

a. Pour les expériences de diffusion, l'énergie des protons variait de 0,7 à 2,5 MeV. On constate que les sections de choc différentielles aux différents angles diminuent rapidement quand l'énergie augmente jusqu'au seuil de la réaction  $T(pn)He^3$  (1019 keV), puis restent sensiblement constantes.

b. La réaction  $T(pn)^3He$  est endoénergétique. Son seuil est 1019 keV et sa section de choc augmente rapidement au-dessus du seuil. Les expérimentateurs qui ont étudié cette croissance jusqu'à 2,4 MeV, pour laquelle  $\sigma = 0,55$  barn pensent qu'il faut l'expliquer par un phénomène de résonance, le noyau composé  $^4He$  ayant un niveau excité à 21,63 MeV.

Cette réaction est intéressante, car elle peut être utilisée comme source de neutrons peu énergiques monocinétiques [46]. Son faible seuil la rend plus utilisable que la réaction  $Li^7(pn)Be^7$  dont le seuil est plus élevé.

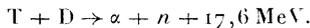
L'énergie des neutrons au seuil est 60 keV. Pour des énergies de bombardement inférieures à 1150 keV, les neutrons jaillissent dans un cône de demi-angle au sommet  $\theta_0$  tel que

$$\sin \theta_0 = 3 \sqrt{\frac{E_p - E_{th}}{E_p}}, \quad E_{th} = 1019 \text{ keV.}$$

L'énergie 1150 keV correspond au seuil à  $90^\circ$  et pour  $E_p > 1150$  keV, il y a des neutrons dans tout l'espace. Pour une direction  $\theta$ , de l'angle du laboratoire, il y a deux groupes de neutrons de vitesses différentes émis vers l'avant si  $E_p < 1150$  keV, mais ces deux groupes sont faciles à séparer, car leurs intensités sont dans le rapport de leurs énergies.

c. La réaction  $T(p\gamma)^4He$  a été étudiée par les mêmes auteurs avec une cible  $T + Zr$  pour des énergies de protons allant jusqu'à 2,5 MeV, limite supérieure du générateur de Los Alamos. Ils ont trouvé une section de choc globale  $\sigma = 2 \cdot 10^{-28}$  cm<sup>2</sup> pour une énergie de 1 MeV. Elle aussi croît rapidement jusqu'à 2,5 MeV, énergie pour laquelle elle passe par un maximum. On retrouve le même phénomène de résonance que pour  $T(pn)^3He$ , indiquant le niveau excité de  $^4He$  à 21,63 MeV. Les  $\gamma$  de cette réaction sont plus énergiques que ceux de la réaction  $Li^7(p\gamma)Be^8$  (17,5 MeV).

## 2° RÉACTION DEUTÉRIUM-TRITIUM. — Soit



Cette réaction a été étudiée par plusieurs groupes d'expérimentateurs :

Bretscher et French [43] qui opéraient à faible énergie (15 à 125 keV) en bombardant une cible de glace lourde avec des tritons.

Allan et Poole [44] qui opéraient de 90 à 190 keV, utilisant également des tritons comme projectiles.

Tasckek et ses collaborateurs [45] qui bombardaient avec des deutons de 1 à 2,5 MeV (fig. 3).

Ils ont abouti aux résultats suivants : la section de choc d'abord faible à 15 keV (de l'ordre de  $10^{-3}$  barns) croît rapidement pour atteindre 3 barns pour  $E_{th} = 110$  keV et passer par un maximum

$\sigma = 6$  barns pour  $E_{th} = 155$  keV. Elle décroît ensuite pour rester sensiblement constante égale à 0,15 barn aux fortes énergies.

La distribution des particules  $\alpha$  est isotrope dans tout l'espace dans le système du centre de gravité.

En raison de l'absence de niveau excité de  $He^4$  au-dessous de 21 MeV, cette réaction est une source idéale de neutrons monocinétiques d'énergies comprises entre 13 et 19 MeV, suivant l'énergie incidente et l'angle d'observation [46].

Au lieu de bombarder avec des tritons, il est préférable d'utiliser des cibles  $T + Zr$  suivant la technique des Graves déjà décrite à propos de la réaction  $D - D$  et s'appliquant aussi au tritium et de bombarder avec des deutons.

Les rendements pour des cibles épaisses sont les suivantes : avec des deutons de 600 keV, on obtient  $5 \cdot 10^8$  neutrons par microcoulomb de deutons incidents et avec des deutons de 200 keV, on a  $10^8$  neutrons par microcoulomb de deutons. Nous voyons,

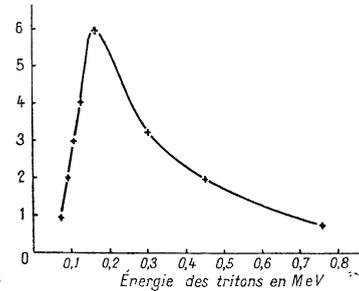
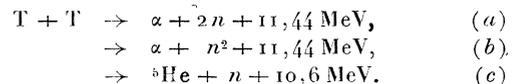


Fig. 3. — Section de choc totale de la réaction  $T(dn)^4He$  en fonction de l'énergie des tritons (d'après [43] et [46]).

de plus, qu'il est possible, avec des cibles de tritium, de passer d'une source de neutrons peu énergiques à une source de neutrons très énergiques en remplaçant le faisceau de protons par un faisceau de deutons, la technique des cibles gazeuses de tritium étant la même.

3° LA RÉACTION  $T + T$ , encore peu connue, a été étudiée par deux groupes de chercheurs : ceux de Los Alamos [47] et ceux de Chalk River [48], [49]. On peut avoir les réactions suivantes :



Le spectre des particules  $\alpha$  pour une énergie de tritons de 220 keV est continu jusqu'à 3,8 MeV avec un maximum à 2,9 MeV. La désintégration est conforme à (a) et l'intensité du groupe d' $\alpha$  qui correspondrait à la formation d'un dineutron est inférieure à 1 pour 100 de l'intensité du spectre continu, d'après le groupe de Chalk River. Le groupe de Los Alamos croit cependant pouvoir conclure à l'existence d'un dineutron.

Le spectre des neutrons est continu de 1 à 9,5 MeV, avec maximum large entre 8,5 et 9 MeV qui peut être attribué à la formation de  $^5He$  dans son état fondamental instable. Moins de 10 pour 100 des neutrons proviennent de cette réaction. Par contre,

il y a un maximum net à 4 MeV. Là aussi, on en déduit que (a) est la réaction principale.

4° RÉACTION T + Li. — Elle a été étudiée par Almqvist [51] en bombardant des composés du lithium LiF, CO<sub>3</sub>Li<sub>2</sub>, LiOD, D<sub>2</sub>O et LiOD avec les tritons de 2,65 MeV de la réaction Li (nα)T.

On a les réactions

$${}^6\text{Li} + \text{T} \rightarrow n + 2\alpha + 16 \text{ MeV}, \quad (1)$$

$${}^7\text{Li} + \text{T} \rightarrow 2n + 2\alpha + 8,79 \text{ MeV}. \quad (2)$$

On avait, en même temps, avec les composés deutérés, les neutrons rapides de la réaction D (tn)α. Tous ces neutrons étaient ralentis par du graphite et dénombrés à l'aide des détecteurs à résonance à indium. En considérant comme négligeables les contributions des autres éléments tels que O, F, C dans la production des neutrons et tenant compte de la réaction D (tn)α, l'auteur en a déduit que la section de choc globale du Li pour les tritons de 2,65 MeV est σ = 1,5 barn.

En bombardant Li<sub>3</sub>F et SO<sub>4</sub>Li<sub>2</sub> avec des tritons de 250 keV, Pepper et ses collaborateurs [50] ont mis en évidence la présence de <sup>6</sup>He dans son état fondamental et un état excité à 2 MeV, produit par la réaction

$${}^7\text{Li} + \text{T} \rightarrow {}^6\text{He} + \alpha + 9,75 \text{ MeV}.$$

L'intensité des α correspondant à l'état excité est cinq fois moins grande que celle de l'état fondamental. Ils ont constaté que ce sont les réactions (1) et (2) qui ont le meilleur rendement.

2. Réactions avec les éléments lourds. Réactions (<sup>3</sup>Hp). — Kundu et Pool ont bombardé certains éléments lourds Ag, Rh, Co avec des tritons de 10 MeV environ. Les tritons sont produits par le bombardement d'une cible de béryllium par des deutons de 10 MeV. La matière à irradier est placée immédiatement sous la cible.

Dans le cas de l'argent, on obtient la réaction <sup>109</sup>Ag (<sup>3</sup>H, <sup>3</sup>He) <sup>109</sup>Pd comme le montre l'activité de Pd<sup>109</sup> dont la période est de 13 h [52] et [53].

Dans le cas du rhodium et du cobalt [54], on est conduit d'une part au <sup>109</sup>Rh dont la période est de 35 h et au <sup>61</sup>Co dont la période est 1,75 h. On a donc les réactions <sup>109</sup>Rh (<sup>3</sup>Hp) <sup>109</sup>Rh et <sup>59</sup>Co (<sup>3</sup>Hp) <sup>61</sup>Co.

Le bombardement par <sup>3</sup>H a permis d'introduire simultanément deux neutrons dans le noyau.

On peut admettre qu'il s'agit là d'un processus analogue à celui d'Oppenheimer et Phillips pour le deuton. Comme dans le cas du deuton, la formation d'un noyau composé Rh + T ou Co + T suivie de l'éjection du proton est moins probable que le processus OP. On a constaté que de faibles changements de l'énergie des tritons n'a que peu d'influence sur le rendement de la réaction, ce qui est en faveur de l'hypothèse du processus OP. De plus, s'il se formait un noyau composé, on aurait des réactions concurrentes (<sup>3</sup>Hn) (<sup>3</sup>H2n) qui, dans le cas de Rh et Co, donneraient des produits stables, alors que <sup>109</sup>Rh et <sup>61</sup>Co sont radioactifs β.

Les auteurs sont amenés à poser l'hypothèse de l'existence d'un groupe de deux neutrons ou dineutron n<sup>2</sup>, qui existe entre le moment où, le triton <sup>3</sup>H

s'approchant du noyau, le proton est repoussé et le moment où les deux neutrons sont capturés. Le dineutron doit être une particule très instable.

### Masse et énergie de liaison du triton.

Rutherford et ses collaborateurs mesurant, pour la première fois la masse du tritium ont trouvé 3,0151.

La table des « constantes sélectionnées de Physique nucléaire » de Grégoire donne 3,01704, chiffre trouvé par Myers, Huntson, Shull et Crenshaw en 1939. Bethe (*Elementary Nuclear Theory*) donne 3,01702. Le chiffre le plus récent, probablement le plus exact, est celui de Tollestrup [55] : 3,016971.

On en déduit l'énergie de liaison du triton. Les chiffres diffèrent légèrement suivant les auteurs. Grégoire donne 2,79 × 3 = 8,37 MeV; Rosenfeld, 8,39 et Weisskopf, d'après Tollestrup, donne 8,492 MeV. De nombreux travaux ont paru pour tenter d'expliquer cette énergie de liaison.

1° Si l'on ne fait intervenir que les forces centrales et en ajustant les dimensions du puits de potentiel d'après celles du deuton, on trouve :

Pour un puits exponentiel

$$B = 9,79 \text{ MeV (Weisskopf);}$$

Pour un puits de Yukawa

$$B = 12,3 \text{ MeV (Weisskopf);}$$

Pour un puits  $e^{-\frac{k}{r}}$

$$B = 7,23 \text{ MeV [56];}$$

Pour un puits  $\frac{1}{r} e^{-\frac{k}{r}}$

$$B = 7,3 \text{ MeV [56].}$$

Les forces centrales, à elles seules, ne peuvent expliquer l'énergie de liaison du triton.

2° Beaucoup d'auteurs, s'inspirant de ce qui se passe pour le deuton, ont fait intervenir les forces tensorielles [57] à [63]. Gerguoy et Schwinger [57], en admettant que l'état fondamental du triton est un état S avec 4 pour 100 d'état D ont trouvé, pour l'énergie de liaison, 39 pour 100 de la valeur expérimentale.

Nous n'indiquerons que les résultats les plus récents donnés par Pease et Feschback [63]. Ces auteurs admettent que le potentiel nucléaire est la somme de deux termes, un terme dépendant des forces centrales de rayon d'action r<sub>c</sub> et un terme dépendant des forces tensorielles de rayon d'action r<sub>t</sub>. Ils ont constaté que l'énergie de liaison est une fonction assez rapidement variable de r. Ils ont admis le même pourcentage d'état D que Gerguoy et Schwinger.

Ils ont pris comme énergie de liaison la valeur expérimentale et ils en ont déduit le rayon d'action des forces tensorielles. Après correction relativiste, ils ont abouti aux résultats suivants :

Énergie de liaison E (en MeV) . . . . .	7,65	8,50
r <sub>c</sub> . 10 <sup>13</sup> (cm) . . . . .	1,184	1,184 (*)
r <sub>t</sub> . 10 <sup>13</sup> (cm) . . . . .	1,58	1,67
Puits de potentiel V <sub>0</sub> (en MeV) . . . . .	42,7	46,1

(\*) Valeur admise.

3° Frohlich et ses collaborateurs [64] se basant sur la théorie des mésons de Moller et Rosenfeld qui admet une interaction statique séparée de l'interaction totale des nucléons, ont trouvé  $E = 8,30$  MeV avec une masse du méson  $M = 220 m_e$  ( $m_e$ , masse de l'électron), ce qui est en assez bon accord avec l'expérience.

### Moment magnétique du triton.

Le moment magnétique du triton a été déterminé par deux groupes d'expérimentateurs :

1° Bloch et ses collaborateurs [65], [66] ont employé la méthode d'induction nucléaire. Le principe en est le suivant : un champ continu  $H_0$  dirigé suivant Oz de l'ordre de 2 000 Gs est créé par un électroaimant. Un champ haute fréquence  $H_1$ , de l'ordre de 10 Gs, est créé par une bobine d'axe parallèle à Ox. La goutte à analyser est placée en M au centre de la bobine. Lorsque la fréquence de  $H_1$  est égale à la fréquence de précession de Larmor correspondant à  $H_0$ , soit  $\omega = \gamma H_0$ , on recueille, dans une bobine d'axe parallèle à Oy, un signal de résonance (fig. 4).

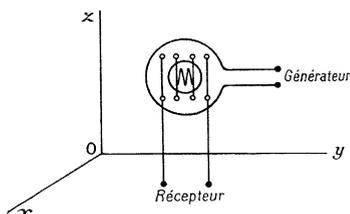


Fig. 4.

Par exemple, pour des expériences sur les protons contenus dans l'eau, avec  $H_0 = 1826$  Gs,  $H_1 = 10$  Gs, la fréquence de résonance est  $\nu = 7,76$  Mc : s.

Pour faciliter les réglages,  $H_0$  est modulé à 50 p : s avec une amplitude de 50 Gs.

Des expériences ont été faites par Bloch sur un échantillon contenant 80 pour 100 d'hydrogène sous forme de  $^3\text{H}$  et 20 pour 100 sous forme de  $^1\text{H}$ . La fréquence était 41,5 Mc : s et le signal venant de  $^3\text{H}$  apparaissait pour  $H_0 = 9160$  Gs et celui de  $^1\text{H}$  pour  $H_0 = 9770$  Gs. L'amplitude des signaux correspondait à la proportion relative des isotopes.

Dans une seconde série d'expériences, les auteurs laissaient fixe le champ  $H_0$  et faisaient varier la fréquence. Le rapport  $\frac{\mu_T}{\mu_P}$  est alors égal au rapport des deux fréquences de résonance.

On en conclut que le spin de  $^3\text{H}$  est le même que celui de  $^1\text{H}$  et que le rapport des moments

$$\frac{\mu_T}{\mu_P} = 1,067 \pm 0,001.$$

Dans une troisième série d'expériences plus précises, on a deux oscillateurs qui créent deux champs de fréquence  $\nu_1$  et  $\nu_3$ . Le récepteur est accordé simultanément sur ces deux fréquences par deux circuits. La détection est faite par une seule diode et l'on enregistre, sur l'oscillographe, un pic égal à la somme des deux pics de résonance. On a alors

$$\frac{\gamma_T}{\gamma_P} = \left(1 - \frac{\Delta\nu}{\nu_3}\right)^{-1}, \quad \text{avec } \Delta\nu = \nu_3 - \nu_1.$$

On trouve

$$\frac{\gamma_T}{\gamma_P} = 1,06663 \pm 0,00001.$$

2° Anderson et Novick [67] ont employé la méthode de l'absorption nucléaire. Un champ  $H_0$  continu est dirigé suivant l'axe Oz et deux petites bobines disposées symétriquement par rapport au centre du champ  $H_0$  ont leurs axes perpendiculaires à  $H_0$  et sont parcourues par des courants haute fréquence fournis par deux générateurs, l'un à cristal, l'autre à fréquence réglable. Ces deux bobines sont montées dans les bras d'un pont placé entre les générateurs et récepteur haute fréquence. L'ensemble est réglé de façon qu'aucun signal ne soit transmis de l'émetteur au récepteur. Le champ  $H_0$  est modulé à 50 p : s.

On place une goutte d'eau ordinaire dans une des deux bobines et l'on observe d'abord à une fréquence déterminée, le pic correspondant à la résonance du proton. Ensuite, avec une goutte d'eau contenant du tritium, on observe, à la même fréquence, un autre pic identique correspondant à une valeur plus basse du champ magnétique  $H_0$ .

Pour une détermination précise du rapport  $\frac{g_T}{g_P}$  des rapports gyromagnétiques, on place une goutte d'eau ordinaire dans une des bobines et une goutte d'eau tritiée dans l'autre et l'on ajuste la fréquence du 2° générateur de manière que les deux pics coïncident. On trouve

$$\frac{g_T}{g_P} = 1,06666 \pm 0,00010$$

**Interprétation du moment magnétique du tritium.** — Expérimentalement on trouve, par conséquent que le moment magnétique du triton est égal au moment du proton, soit  $2,792 + 0,186$  magnétons nucléaires. Or, nous avons vu que pour rendre compte de l'énergie de liaison du triton, on est amené à admettre que son état fondamental est un état S avec 4 pour 100 d'état D. En partant de ces données, on trouve pour le moment magnétique une valeur trop faible, soit  $2,71$  magnétons nucléaires [68]. Pour expliquer cette contradiction, on a fait plusieurs théories se rapportant, soit à l'état fondamental du triton, soit à la nature des forces nucléaires [76].

1° THÉORIE DU SPIN ET MOMENT ORBITAL. — Sachs [70], [73] admet que l'état fondamental du triton peut comprendre jusqu'à 40 pour 100 d'état P.

On peut alors objecter que la fonction d'onde est très différente de celle qui rend compte de l'énergie de liaison du triton.

2° THÉORIE DE L'INTERACTION DES MOMENTS [74], [75]. — On admet que l'état fondamental du triton est l'état S avec un peu d'état D, ce qui rend bien compte de l'énergie de liaison. Cela rend compte également de la somme des moments magnétiques de  $\text{H}^3$  et  $\text{He}^3$ . Mais, en plus des spins et moments orbitaux, il y a des moments qui résultent d'une interaction nucléon-nucléon qui, pour  $\text{H}^3$  et  $\text{He}^3$ , sont égaux et de signes opposés.

3° THÉORIE DE VILLARS [69], [71], [72]. — Si les forces nucléaires résultent d'un échange de mésons

chargés, il doit exister des courants d'échange dans le noyau et ces courants d'échange contribuent à augmenter le moment magnétique nucléaire. Jusqu'à présent, ces trois théories ne sont pas départagées. Adams [76] s'est demandé si l'étude de la structure hyperfine ne permettrait pas de le faire. En effet, dans le cas du deuton, on a constaté que la valeur de la structure hyperfine est un peu plus grande que la valeur calculée pour un deuton considéré comme ponctuel.

Bohr a émis l'hypothèse que pour de faibles distances noyau-électron on ne peut plus considérer le noyau comme un point géométrique, et que la fonction d'onde de l'électron se centre sur le proton et non sur le centre de gravité du noyau. Cette hypothèse, dans le cas du deuton, permet de rendre compte, d'une façon satisfaisante, de la différence entre les deux valeurs.

Le même calcul a été fait par Adams pour le triton, dans le cas des trois hypothèses envisagées ci-dessus. Il est arrivé à ce résultat que l'incertitude sur la structure hyperfine est du même ordre de grandeur dans les trois cas et c'est l'ordre de grandeur des erreurs expérimentales.

La valeur anormalement élevée du moment magnétique du triton reste donc inexplicée.

**Structure hyperfine du tritium.**

Le moment magnétique du noyau produit un champ perturbateur sur l'électron. Si  $I$  est le spin du noyau, le spin total noyau + électron sera  $I + \frac{1}{2}$  ou  $I - \frac{1}{2}$ . Il en résulte donc un doublet de structure hyperfine, correspondant à ces deux valeurs du spin et dont la séparation s'exprime en fréquence.

La mesure de la structure hyperfine du tritium a été faite par Nelson et Nafe [77] qui ont trouvé  $1516,702 \pm 0,010$  Mc : s.

On démontre, théoriquement, que le rapport des structures hyperfines du tritium et de l'hydrogène s'exprime par la formule

$$\frac{\nu_T}{\nu_H} = \frac{\mu_T}{\mu_P} \left( \frac{M_T}{M_H} \right)^3,$$

$\mu_P$  étant le moment magnétique du proton;  $M_T$  et  $M_H$ , les masses réduites de l'électron pour le tritium et le protium. Cette formule suppose aussi que le spin du triton est  $\frac{1}{2}$ , ce qui amène la disparition du facteur correspondant dans le rapport.

Si dans cette formule on porte

$$\frac{\mu_T}{\mu_P} = 1,06666 \quad \text{et} \quad \nu_H = 1420,410 \text{ Mc : s.}$$

on trouve

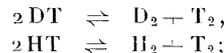
$$\nu_T = 1516,709 \pm 0,015 \text{ Mc : s.}$$

Il est remarquable que la coïncidence ait lieu même sans correction sur l'interaction des nucléons dans le noyau, ce qui n'est pas le cas pour le deuton. Cela vérifie, en outre, que le spin du triton est bien  $\frac{1}{2}$ .

**Autres propriétés physiques du tritium.**

**1. Tension de vapeur.** — Libby et Barter [2] ont mesuré la tension de vapeur de HT et DT liquide en distillant un très petit volume d'hydrogène liquide ou de deutérium contenant du tritium. La concentration de tritium était environ  $10^{-9}$  mol : g pour une d'hydrogène. D'après l'activité du mélange, ils déduisaient la quantité de tritium distillée et, de là, la tension de vapeur de HT et DT.

D'après ces auteurs, on peut également séparer les isotopes, en faisant passer HT et DT sur un catalyseur (non indiqué) :



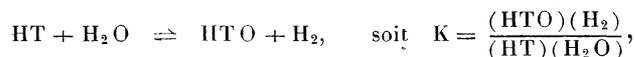
la séparation se faisant ensuite par distillation.

Le tableau ci-dessous donne les tensions de vapeur de HT et DT. On y a reporté les tensions de vapeur de HD et D<sub>2</sub>. La tension de vapeur de T<sub>2</sub> a été obtenue par extrapolation des données de Libby et Barter.

Symbole.	Masse.	de vapeur (mm de H <sub>2</sub> ) à 20,4°K.	Tension Température d'ébullition (°K).	Chaleur latente (cal : mol).	
				Ébullition.	Fusion.
H <sub>2</sub> .....	2	760	20,4	215,9	37 (à 16°K)
HD....	3	438	22,13	261	52,3 (à 18,6°K)
D <sub>2</sub> .....	4	256	23,5	355,4	-
HT.....	4	254 ± 16	-	-	-
DT.....	5	123 ± 6	-	-	-
T <sub>2</sub> .....	6	45 ± 10	-	-	-

D'après les calculs théoriques de Hammel [78], la tension de vapeur de T<sub>2</sub> à 20,4° K serait un peu plus élevée (95 mm) et son point d'ébullition serait vers 25,5° K.

**2. Constante de l'équilibre eau-tritium.** — La constante de la loi de masse de la réaction d'équilibre



a été étudiée expérimentalement par Block et Taylor et, théoriquement, par Libby [2]. Black et Taylor introduisaient séparément l'eau radioactive et l'hydrogène et faisaient passer le mélange sur un catalyseur jusqu'à ce que l'équilibre soit établi. Ensuite, le mélange est introduit dans un compteur qui donne la concentration totale en tritium. Puis on sépare l'hydrogène actif et non actif de l'eau active et non active. Les mesures d'activité faites sur ces deux mélanges donnent les concentrations partielles en tritium et permettent de calculer  $K$ . Les mesures sont faites à différentes températures. Les résultats expérimentaux de Black et Taylor et théoriques de Libby sont donnés dans le tableau suivant :

T(°C).	K (expér.).	K (théorique).
16.....	6,75 ± 0,04	6,47
20,2.....	6,47 ± 0,12	6,24
25.....	6,25 ± 0,05	6,01
56,2.....	5,05 ± 0,05	4,84
79,6.....	4,37 ± 0,05	4,23
111,2.....	3,76 ± 0,04	3,64
153,4.....	3,10 ± 0,06	3,03
217,1.....	2,64 ± 0,04	2,54
302,9.....	2,17 ± 0,02	2,08

On voit que la concordance est satisfaisante;  $K$  vérifie l'équation

$$\log K = 0,292 \log T + \frac{386,5}{T} - 1,065.$$

### Utilisation du tritium comme traceur en chimie [1], [2].

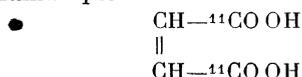
Les propriétés chimiques du tritium étant presque semblables à celles de l'hydrogène ordinaire, on doit pouvoir suivre le transfert d'atomes de tritium d'une molécule à une autre.

Nous avons vu que les avantages du tritium comme traceur sont sa longue période et la possibilité de préparer des échantillons de haute radioactivité spécifique. Mais le principal inconvénient vient du fait qu'il émet des  $\beta$  très mous, de sorte qu'il faut l'introduire dans le compteur à l'état gazeux ou de composé gazeux.

Actuellement, les travaux où le tritium a été utilisé comme traceur ne sont pas encore nombreux, mais il n'est pas douteux que son importance ne fera que croître et deviendra comparable à celles du carbone, du phosphore et du soufre.

Nous citerons quelques exemples :

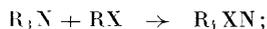
1. **Étude de la synthèse et de l'oxydation de l'acide fumarique.** — Elle a été faite par Allen et Ruben (1942) qui ont utilisé à cet effet  $^{14}\text{C}$  et T. Partant de  $^{14}\text{C}$ , ces auteurs ont fait la synthèse de  $^{14}\text{CO}_2$  et de  $\text{K}^{14}\text{CN}$ , puis de  $(\text{CH}_2^{14}\text{CN})_2$  et de l'acide fumarique



dans lequel seul le carbone du groupe COOH est radioactif. L'oxydation par un mélange de permanganate de potasse et d'acide sulfurique donne de l'acide formique non radioactif, ce qui montre que le carbone vient d'un des groupes CH de l'acide fumarique.

On oxyde de l'acide fumarique non radioactif en solution dans de l'eau contenant HTO et l'acide formique produit est neutralisé avec du bicarbonate de soude, on évapore l'eau formée sous vide. On constate que l'eau produite par combustion du formiate de soude ne renferme que 2 pour 100 de l'activité primitive de l'eau et que, par contre, l'eau évaporée renferme presque toute cette activité. Les auteurs en ont déduit que l'échange d'isotopes est faible et que le groupe CH reste intact pendant l'oxydation.

2. **Étude de la réaction de Menschukin par Stewart et Ruben (1942).** — Cette réaction est la suivante :



R est un radical alcoolique,  $\text{R}_3\text{N}$  une triamine, RX un éther-sel d'acide minéral.

Il s'agit de déterminer si cette réaction est réversible ou non. Stewart et Ruben ont utilisé de l'iode de méthyle dont le radical méthyle renferme du tritium. On le prépare par réduction catalytique du formiate de méthyle avec de l'hydrogène contenant

du tritium, ce qui donne de l'alcool méthylique et celui-ci avec l'acide iodhydrique donne de l'iodeure de méthyle. On fait agir sur cet iodeure un excès de triméthylamine en solution dans l'alcool ou le benzène. On constate que toute la radioactivité passe dans le sel composé et qu'il n'en reste plus dans l'amine restante. La réaction est donc irréversible.

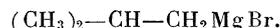
3. **Étude de l'isomérisation du butane par Powell et Reid (1945).** — En présence d'acide chlorhydrique et sur  $\text{AlCl}_3$  comme catalyseur, le butane se transforme en un mélange de butane et isobutane en équilibre. Cette réaction mettant en jeu la rupture et le rétablissement d'une liaison C—C n'était pas bien expliquée.

Powell et Reid ont fait trois séries d'expériences : isomérisation en présence d'hydrogène mélangé de tritium, ce qui ne modifie en rien la réaction, isomérisation en présence de TCl et isomérisation de butanes renfermant du tritium placé à des positions connues dans la molécule.

Le mode opératoire est le suivant : le tritium produit par la réaction DD dans un cyclotron est transformé en eau tritiée HTO. On produit TCl actif par action sur Cl de HT séparé de l'eau par électrolyse avec du carbone comme catalyseur à  $300^\circ$  ou encore par action de  $\text{SO}_4\text{H}_2$  actif sur NaCl. On prépare le butane par hydrolyse de



en solution acide contenant HTO et l'isobutane par hydrolyse de



L'isomérisation se produit à  $107-128^\circ$  en présence d'acide chlorhydrique avec le chlorure d'aluminium comme catalyseur. Le butane sert lui-même de gaz pour le compteur. Le tritium contenu dans l'hydrogène est analysé en hydrogénant le butane avec lui.

**Résultats.** — *a.* L'étude de la réaction entre HT et le butane montre que l'isomère contient la plus grande part de tritium et que le degré d'échange est à peu près proportionnel au degré d'isomérisation, mais varie avec différents catalyseurs. Cela est en accord avec l'hypothèse de la formation d'un composé complexe butane- $\text{AlCl}_3$  à l'intérieur duquel se produisent les échanges et qui se décompose en donnant un mélange en équilibre.

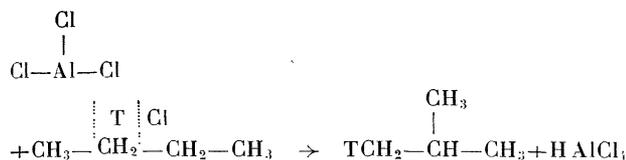
*b.* Les échanges sont beaucoup plus importants en présence de TCl. Comme ils se font beaucoup plus facilement après qu'on a fait passer de l'hydrogène sur le chlorure d'aluminium après un traitement préliminaire par HCl inactif, on en déduit qu'il se forme probablement le composé  $\text{HAlCl}_4$  qui est le véritable catalyseur. On trouve que le tritium se trouve pour la plus grande part dans l'isomère, ce qui confirme la formation d'un composé complexe.

*c.* Mais les résultats les plus significatifs viennent de l'étude des réactions d'échange entre les butanes contenant du tritium et de l'hydrogène. On a constaté que dans l'isobutane la vitesse d'échange du tritium lié au carbone primaire est supérieure à la vitesse d'échange du tritium lié au carbone tertiaire. Mais,

dans le butane normal, la vitesse d'échange du tritium lié au carbone secondaire est supérieure à la vitesse d'échange du tritium lié au carbone primaire.

Les auteurs en ont déduit un mécanisme possible de l'isomérisation.

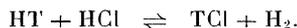
L'hydrogène de  $\text{HAlCl}_4$  se rapproche d'un carbone secondaire du butane



Il y a affaiblissement de la liaison carbone primaire-carbone secondaire. Le radical  $\text{CH}_2$  s'empare de T et donne  $\text{TCH}_2$ . D'autre part,  $\text{AlCl}_4$  cherche à s'emparer d'un nouvel atome d'hydrogène, ce qu'il peut faire, soit aux dépens de l'autre carbone secondaire, ce qui libère une liaison et permet la formation de l'isobutane, soit aux dépens du radical  $\text{TCH}_2$ , nouvellement formé et le carbone reprend sa place de carbone secondaire.

Ce schéma permet donc d'expliquer pourquoi le tritium de  $\text{TCl}$  passe dans l'isobutane.

Enfin, l'échange  $\alpha$  s'explique par un échange préliminaire entre HT et HCl



### Utilisation du tritium comme traceur en biologie.

Nous allons donner comme exemple celui de la mesure de la quantité d'eau dans les organismes vivants par Pace et ses collaborateurs [79].

Le tritium étant préparé par la réaction  $\text{Be}(d,f)$ , on le rassemble en dissolvant la cible dans l'acide chlorhydrique et le mélange hydrogène + tritium passe sur l'oxyde de cuivre à  $550^\circ$ . L'eau formée est recueillie dans une trappe à air liquide. On mesure l'activité de HTO ainsi formée en l'introduisant sous forme de vapeur dans un compteur de Geiger sous une pression de 1 à 2 mm de mercure.

On injecte alors à un lapin 5,09 ml d'une solution d'eau tritiée à 2128 comptages par minute et à un 2° lapin 1,96 ml. On mesure ensuite l'activité des prélèvements de sang à différents intervalles et l'on en déduit la quantité totale d'eau en pour-cent par rapport au poids total du corps. On fait ensuite une mesure directe par dessiccation pendant plusieurs jours des organes des lapins sacrifiés.

Les résultats sont assez concordants et donnent une valeur voisine de 56 pour 100. On constate aussi qu'il faut environ 1 h pour que l'eau tritiée se soit répandue dans l'organisme.

Les auteurs en concluent que cette méthode est correcte et donne des résultats valables à 10 pour 100 près, erreur comparable à celle que donne la méthode par l'eau lourde.

Des mesures faites sur le corps humain par injection intraveineuse d'eau tritiée ont donné une proportion de 64,7 pour 100.

Manuscrit reçu le 19 juillet 1951.

### BIBLIOGRAPHIE.

- [1] SMITH. — Le tritium (hydrogène radioactif). *Sc. Progress G. B.*, 1948, **36**, 101-112.
- [2] AJAZOV et NEJMAN. — Le tritium isotope radioactif de l'hydrogène (en russe). *Usp. fiz. Nauk S. S. S. R.*, 1948, **36**, 145-180.
- [3] EIDINOFF. — La recherche du tritium isotope de l'hydrogène de masse 3. *J. Chem. Educ. U. S. A.*, 1948, **25**, 31.
- [4] UREY, BRICKWEDDE et MURPHY. — Un isotope de l'hydrogène de masse 2. *Phys. Rev.*, 1932, **39**, 164 et 864.
- [5] BRETSCHER, FRENCH et SEIDL. — Rendement à faible énergie de la réaction  $\text{D}(dp)\text{H}^3$  et distribution angulaire des protons émis. *Phys. Rev.*, 1948, **73**, 815.
- [6] GRAVES A. C., GRAVES E. R., COON et MANLEY. — Section de choc de la réaction  $\text{D}(dp)\text{H}_3$  de 100 à 300 keV. *Phys. Rev.*, 1946, **70**, 101.
- [7] BLAIR, FRIER, LAMPI, SFEATOR et WILLIAMS. — Distribution angulaire des produits de la réaction  $\text{DD}$  de 1 à 3,5 MeV. *Phys. Rev.*, 1948, **74**, 1599.
- [8] LEITER, RODGERS et KRUGER. — Distribution angulaire des protons venant de la réaction  $\text{DD}$  à 10 MeV. *Phys. Rev.*, 1950, **78**, 663.
- [9] KENNETH, WARNE et ERIKSON. — Section de choc différentielle en fonction de l'angle pour la réaction  $\text{D}(dp)\text{T}$  pour des deutons de 10 MeV. *Commission de l'Énergie atomique U. S. A. A. E. C. U.*, 1949, 724.
- [10] GRAVES, RODRIGUES, GOLDBLATT et MEYER. — Préparation et utilisation des cibles de deutérium et de tritium. *Rev. Sc. Instr.*, 1949, **20**, 579.
- [11] HORNYAK, LAURITSEN, MORRISON et FOWLER. — Niveaux d'énergie des noyaux légers. *Rev. Mod. Physics*, 1950, **22**, 291-372.
- [12] HARRINGTON et STEWART. — Sections de capture de Cd, Li, B, Ba, Mg, N pour les neutrons thermiques. *Canadian J. Research*, 3 mars 1941, **19**.
- [13] GOLDSMITH, IBSER et FELD. — Sections de choc des éléments pour les neutrons. *Rev. Mod. Physics*, 1947, **19**, 259.
- [14] ADAIR. — Sections de choc des éléments pour les neutrons. *Rev. Mod. Physics*, 1950, **22**, 256.
- [15] BOGGILD et MINNHAGEN. — Étude à la chambre de Wilson de la désintégration du lithium par les neutrons lents. *Phys. Rev.*, 1949, **75**, 782.
- [16] NATANSON. — Désintégration du lithium par les neutrons rapides. *C. R. Acad. Sc.*, 1949, **76**, 576.
- [17] WAY et HAYNES. — Sections de choc des éléments et des isotopes de H à Bi pour les neutrons thermiques. *Commission de l'Énergie atomique U. S. A. A. E. C. D.*, 1948, 2138.
- [18] O'NEAL et GOLDBERGER. — Hydrogène radioactif produit par le bombardement du béryllium par les deutons. *Phys. Rev.*, 1940, **57**, 1086.
- [19] CORNOG et LIBBY. — Production d'hydrogène radioactif par bombardement par les neutrons du bore et de l'azote. *Phys. Rev.*, 1941, **59**, 1048.
- [20] LIBBY. — Hélium 3 atmosphérique et radiocarbone produit par les rayons cosmiques. *Phys. Rev.*, 1946, **69**, 671.
- [21] KRISHMAN. — La réaction deuton-tritium dans le fluor. *Nature*, 1941, **148**, 3753.
- [22] COON et NOBLES. — Désintégration de  $\text{He}^3$  et  $\text{N}^{14}$  par les neutrons thermiques. *Phys. Rev.*, 1949, **75**, 1358.
- [23] KING et GOLDSTEIN. — La section de choc totale de  $\text{He}^3$  pour les neutrons lents. *Phys. Rev.*, 1949, **75**, 1366.
- [24] KUNDU et POOL. — Réaction  $d\text{H}_3$  dans Ag et Cb. *Phys. Rev.*, 1947, **71**, 140.

- [25] NOVICK. — Période du tritium. — *Phys. Rev.*, 1947, **72**, 973.
- [26] GOLDBLATT, ROBINSON et SPENCE. — Période du tritium. *Phys. Rev.*, 1947, **72**, 973.
- [27] JENES, GHORMLEY et SWEETON. — Mesure de la période et de l'énergie moyenne de la désintégration du tritium. *Phys. Rev.*, 1949, **75**, 701.
- [28] HANNA et PONTECORVO. — Le spectre  $\beta$  du tritium. *Phys. Rev.*, 1949, **75**, 983.
- [29] GRAVES et MEYER. — Énergie maxima du spectre  $\beta$  du tritium. *Phys. Rev.*, 1949, **76**, 183.
- [30] CURRAN, ANGUS et COCKROFT. — Le spectre  $\beta$  du tritium. *Phys. Rev.*, 1949, **76**, 853.
- [31] CURRAN, ANGUS et COCKROFT. — Le spectre  $\beta$  du tritium. *Nature*, 21 août 1948.
- [32] KONOPINSKI. — Le tritium et la masse du neutrino. *Phys. Rev.*, 1947, **72**, 518.
- [33] SLACK, OWEN et PRIMAKOFF. — Sur l'énergie maxima du spectre  $\beta$  du tritium.
- [34] EIDINOFF. — Dosage quantitatif du tritium, mélange hydrogène-alcool-argon. *J. Chem. Soc. U. S. A.*, 1947, **69**, 2504.
- [35] EIDINOFF. — Détermination du facteur cathodique de séparation hydrogène-tritium. *J. Chem. Soc. U. S. A.*, 1947, **69**, 2507.
- [36] HORIUTI et NAKAMURA. — Facteur électrolytique de séparation hydrogène-tritium. *J. Chem. Phys.*, 1950, **18**, 395.
- [37] WHITE, CAMPBELL et PAYNE. — Dosage du tritium. *Nature*, 1950, **166**, 628.
- [38] HENRIQUES et MARGNETTI. — Procédé analytique pour estimer l'hydrogène radioactif (tritium). *Ind. Eng. Chem. anal. U. S. A.*, 1946, **18**, 420.
- [39] TASCHEK, JARVIS, HEMMENDINGER, EVERHARDT et GITTINGS. — Interaction des protons avec le tritium. *Phys. Rev.*, 1949, **75**, 1361.
- [40] HEMMENDINGER, JARVIS et TASCHEK. — Diffusion élastique protons-tritons. *Phys. Rev.*, 1949, **76**, 1137.
- [41] JARVIS, HEMMENDINGER, ARGO et TASCHEK. — Les constantes de la réaction  ${}^3\text{T}(pn){}^3\text{He}$ . *Phys. Rev.*, 1950, **79**, 928.
- [42] ARGO, GITTINGS, HEMMENDINGER, JARVIS et TASCHEK. — La réaction  ${}^3\text{T}(p\gamma)\text{He}_4$ . *Phys. Rev.*, 1950, **78**, 691.
- [43] BRETSCHER et FRENCH. — Section de choc à faible énergie de la réaction DT et distribution angulaire des particules émises. *Phys. Rev.*, 1949, **75**, 1154.
- [44] ALLAN et POOLE. — Effet de résonance dans la réaction  ${}^3\text{H}(dn){}^4\text{He}$ . *Nature*, 16 juillet 1949.
- [45] TASCHEK, EVERHARDT, GITTINGS, HEMMENDINGER et JARVIS. — Résultats préliminaires sur la section de choc de la réaction  ${}^3\text{T}(dn){}^4\text{He}$  pour des énergies de deutons entre 1 et 2,5 MeV. *Commission de l'Énergie atomique U. S. A. A. E. C. D.*, 1948, 1250.
- [46] HANSON, TASCHEK et WILLIAMS. — Production de neutrons monoénergétiques par réactions entre particules chargées. *Rev. Mod. Physics*, 1949, **24**, 635.
- [47] LABORATOIRE de LOS ALAMOS. — La réaction T + T. *Bull. Amer. Phys. Soc.*, 1950, **25**, 47.
- [48] SANDERS, ALLEN, ALMQUIST, DEWAN et PEPPER. — La réaction T + T. Distribution d'énergie des  $\alpha$  et des neutrons. *Bull. Amer. Phys. Soc.*, 1950, **25**, 47.
- [49] ALLEN, ALMQUIST, DEWAN et PEPPER. — Distribution d'énergie des  $\alpha$  venant de la réaction T + T. *Phys. Rev.*, 1951, **81**, 315.
- [50] PEPPER, ALLEN, ALMQUIST et DEWAN. — Désintégration du lithium par les tritons. *Phys. Rev.*, 1951, **81**, 315.
- [51] ALMQUIST. — Les neutrons rapides des réactions T + D et T + Li. *Canadian J. Research*, 1950, **28**, 433.
- [52] KUNDU et POOLS. — Résultat du bombardement de AgRh par  ${}^3\text{H}$ . *Phys. Rev.*, 1947, **71**, 467.
- [53] KUNDU et POOL. — Résultat du bombardement de l'argent par  ${}^3\text{H}$  donnant du  ${}^{100}\text{Pd}$ . *Phys. Rev.*, 1947, **72**, 101.
- [54] KUNDU et POOL. — La réaction ( ${}^3\text{H}p$ ) dans Rh ou Co et mise en évidence probable du dineutron  ${}^4_0n$ . *Phys. Rev.*, 1948, **73**, 22.
- [55] TOLLESTRUP, FOWLER et LAURITSEN. — Détermination de masses nucléaires par le Q de certaines réactions. *Phys. Rev.*, 1950, **78**, 372.
- [56] MU HSIEN WANG. — Calcul de l'énergie de liaison de  ${}^3\text{H}$  et  ${}^4\text{He}$ . *Phys. Rev.*, 1946, **70**, 492.
- [57] GERGUOY et SCHWINGER. — Les tenseurs de forces et la théorie des noyaux légers. *Phys. Rev.*, 1942, **61**, 138.
- [58] GOEPPERT, MAYER et SACHS. — Énergie de liaison de  ${}^3\text{H}$ . *Phys. Rev.*, 1948, **73**, 185.
- [59] RARITA et FESHBACH. — Forces tensorielles et énergie de liaison du triton. *Phys. Rev.*, 1948, **73**, 1272.
- [60] FESHBACH et RARITA. — Tenseur de forces et énergie de liaison du triton. *Phys. Rev.*, 1949, **75**, 1384.
- [61] PEASE et FESHBACH. — Rayon d'action des forces tensorielles et énergie de liaison du triton. *Bull. Amer. Phys. Soc.*, 1950, **25**, 14.
- [62] TSIN MING HU et KUNG NGOU HSU. — L'énergie de liaison du triton. *Phys. Rev.*, 1950, **78**, 633.
- [63] PEASE et FESHBACH. — Énergie de liaison du triton. *Phys. Rev.*, 1951, **81**, 142.
- [64] FRÖHLICH, KUN-HUANG et SNEDDON. — Énergie de liaison des noyaux très légers. *Proc. Roy. Soc.*, 1947, **191**, 61.
- [65] BLOCH, GRAVES, PACKARD et SPENCER. — Spin et moment magnétique du tritium. *Phys. Rev.*, 1947, **71**, 373.
- [66] BLOCK, GRAVES, PACKARD et SPENCER. — Moments relatifs de  ${}^3\text{H}$  et  ${}^3\text{H}$ . *Phys. Rev.*, 1947, **71**, 551.
- [67] ANDERSON et NOVICK. — Moment magnétique du triton. *Phys. Rev.*, 1947, **71**, 372.
- [68] SACHS et SCHWINGER. — Moments magnétiques de  ${}^3\text{H}$  et  $\text{He}^3$ . *Phys. Rev.*, 1946, **70**, 41.
- [69] VILLARS. — Moment magnétique d'échange de  ${}^3\text{H}$  et  ${}^3\text{He}$ . *Phys. Rev.*, 1947, **72**, 256.
- [70] SACHS. — Interprétation du moment magnétique du triton. *Phys. Rev.*, 1947, **73**, 312.
- [71] ANDERSON. — Moment magnétique d'échange de  ${}^3\text{H}$  et  ${}^3\text{He}$ . *Phys. Rev.*, 1948, **73**, 919.
- [72] THELLUNG et VILLARS. — Sur le moment magnétique d'échange de  ${}^3\text{H}$  et  ${}^3\text{He}$  dans la théorie Moller-Rosenfeld des forces nucléaires. *Phys. Rev.*, 1948, **73**, 924.
- [73] SACHS. — Interprétation du moment du triton. *Phys. Rev.*, 1948, **73**, 1222.
- [74] AVERY et SACHS. — Remarques sur les moments magnétiques de  ${}^3\text{H}$  et  ${}^3\text{He}$ . *Phys. Rev.*, 1948, **74**, 1320.
- [75] AVERY et ADAMS. — Moments d'échange de  $\text{H}^3$  et  $\text{He}^3$ . *Phys. Rev.*, 1949, **75**, 1106.
- [76] ADAMS. — Sur la structure hyperfine du tritium et l'anomalie du moment magnétique du triton. *Phys. Rev.*, 1951, **81**, 1.
- [77] NELSON et NAFE. — Structure hyperfine du tritium. *Phys. Rev.*, 1949, **75**, 1194.
- [78] HAMMEL. — Calcul de quelques constantes physiques du tritium. *Commission de l'Énergie atomique U. S. A. A. E. C. U.*, 1949, 647.
- [79] PACE, KLEIN, SCHACHMAN et HARFENIST. — Recherche sur la composition de l'organisme, emploi de l'hydrogène radioactif pour l'évaluation *in vivo* de l'eau totale du corps. *J. Biol. Chem. U. S. A.*, 1947, **168**, 459.