CEA-R-4839

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

CEA-R-4839
FR7701762
INDC(FR)-12

E.40

DESCRIPTION D'UN SPECTROMETRE DE TEMPS DE VOL A QUATRE DETECTEURS UTILISE POUR L'ETUDE DE LA DIFFUSION DES NEUTRONS DE 8 A 15 MeV

par

Jean LACHKAR, Gérard HAOUAT,
Jean SIGAUD, Yves PATIN, Francis COÇU,
Claude HUMEAU, Serge SEGUIN

Centre d'Etudes de Bruyères-le-Châtel

Rapport CEA-R-4839

1977
Da

SERVICE DE DOCUMENTATION
C.E.N - SACLAY B.P. n° 2, 91 190 - GIF-sur-YVETTE - France

PLAN DE CLASSIFICATION DES RAPPORTS ET BIBLIOGRAPHIES CEA

(Classification du système international de documentation nucléaire SIDON/INIS)

A 11	Physique théorique
A 12	Physique atomique et moléculaire
A 13	Physique de l'état condensé
A 14	Physique des plasmas et réactions thermonucléaires
A 15	Astrophysique, cosmologie et rayonnements cosmiques
A 16	Conversion directe d'énergie
A 17	Physique des basses températures
A 20	Physique des hautes énergies
A 30	Physique neutronique et physique nucléaire
B 11	Analyse chimique et isotopique
B 12	Chimie minérale, chimie organique et physico-chimie
B 13	Radiochimie et chimie nucléaire
B 14	Chimie sous rayonnement
B 15	Corrosion
B 16	Traitement du combustible
B 21	Métaux et alliages (production et fabrication)
B 22	Métaux et alliages (structure et propriétés physiques)
B 23	Céramiques et cermets
B 24	Matières plastiques et autres matériaux
B 25	Effets des rayonnements sur les propriétés physiques des matériaux
B 30	Sciences de la terre
C 10	Action de l'irradiation externe en biologie
C 20	Action des radioisotopes et leur cinétique
C 30	Utilisation des traceurs dans les sciences de la vie
C 40	Sciences de la vie : autres études
C 50	Radioprotection et environnement
D 10	Isotopes et sources de rayonnements
D 20	Applications des isotopes et des rayonnements
E 11	Thermodynamique et mécanique des fluides
E 12	Cryogénie
E 13	Installations pilotes et laboratoires
E 14	Explosions nucléaires
E 15	Installations pour manipulation de matériaux radioactifs
E 16	Accélérateurs
E 17	Essais des matériaux
E 20	Réacteurs nucléaires (en général)
E 30	Réacteurs nucléaires (types)
E 40	Instrumentation
E 50	Effluents et déchets radioactifs
F 10	Economie
F 20	Législation nucléaire
F 30	Documentation nucléaire
F 40	Sauvegarde et contrôle
F 50	Méthodes mathématiques et codes de calcul
F 60	Divers

Rapport CEA-R-4839

Cote-matière de ce rapport : E.40

DESCRIPTION-MATIERE *(mots clefs extraits du thesaurus SIDON/INIS)*

en français	*en anglais*
SPECTROMETRES A TEMPS DE VOL	TIME-OF-FLIGHT SPECTROMETERS
DOMAINE 01 - 10 MEV	MEV RANGE 01 - 10
DOMAINE 10 - 100 MEV	MEV RANGE 10 - 100
DETECTION DES NEUTRONS	NEUTRON DETECTION
TECHNIQUES DES NEUTRONS PULSES	PULSED NEUTRON TECHNIQUES
RESOLUTION EN ENERGIE	ENERGY RESOLUTION
RENDEMENT	EFFICIENCY
PERFORMANCE	PERFORMANCE
SPECIFICATIONS	SPECIFICATIONS

NEANDC (E) 177 "L"
INDC (FR) 12/L

- Rapport CEA-R-4839 -

Centre d'Etudes Nucléaires de Bruyères-le-Châtel

DESCRIPTION D'UN SPECTROMETRE DE TEMPS DE VOL A QUATRE DETECTEURS UTILISE POUR L'ETUDE DE LA DIFFUSION DES NEUTRONS DE 8 A 15 MeV

par

Jean LACHKAR, Gérard HAOUAT, Jean SIGAUD, Yves PATIN,
Francis COÇU, Claude HUMEAU, Serge SEGUIN

- Mai 1977 -

CEA-R-4839 - LACHKAR Jean, HAOUAT Gérard, SIGAUD Jean, PATIN Yves, COÇU Francis, HUMEAU Claude, SEGUIN Serge.

DESCRIPTION D'UN SPECTROMETRE DE TEMPS DE VOL A QUATRE DETECTEURS UTILISE POUR L'ETUDE DE LA DIFFUSION DES NEUTRONS DE 8 A 15 MeV.

Sommaire.- Pour répondre aux demandes de données neutroniques dans le domaine d'énergie compris entre 8 et 15 MeV, nous avons conçu, réalisé et expérimenté un spectromètre de temps de vol à quatre détecteurs. Les neutrons incidents sont produits à partir de l'accélérateur Van de Graaff tandem Super EN du Centre d'Etudes de Bruyères-le-Châtel à l'aide de cibles gazeuses de deutérium ou de tritium. Un équipement auxiliaire composé d'un accélérateur 150 kV pulsé permet de produire, à l'aide de la réaction T(d,n)^{4}He, un flux de neutrons d'énergie 14,9 MeV dans les mêmes conditions géométriques qu'à l'aide de l'accélérateur tandem. Nous présentons dans ce rapport les caractéristiques de cet équipement et quelques résultats expérimentaux obtenus.

1977 47 p.

Commissariat à l'Energie Atomique

CEA-R-4839 - LACHKAR Jean, HAOUAT Gérard, SIGAUD Jean, PATIN Yves, COÇU Francis, HUMEAU Claude, SEGUIN Serge.

DESCRIPTION OF A FOUR ANGLE TIME-OF-FLIGHT SPECTROMETER FOR STUDYING NEUTRON SCATTERING IN THE ENERGY RANGE FROM 8 TO 15 MeV.

Summary.- Neutron cross sections in the energy range from 8 to 15 MeV are frequently requested mainly for fission and fusion reactor development and for nuclear safety applications. As a consequence a four angle time-of-flight fast neutron spectrometer has been designed and realized. Incident neutrons are produced using the Super EN tandem Van de Graaff accelerator installed at the Centre d'Etudes de Bruyères-le-Châtel and either deuterium or tritium gas targets. An auxiliary facility consisting in a 150 kV pulsed accelerator enables the production of 14.9 MeV energy primary neutron fluxes and the use of the same experimental set-up. Complete description and main characteristics of the apparatus are presented along with some experimental results.

1977 47 p.

Commissariat à l'Energie Atomique

- PLAN -

I - INTRODUCTION - 3

II - METHODES ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES - 3
1° - Production des neutrons incidents. 3
2° - Détection des neutrons. 6

III - DISPOSITIF UTILISE POUR L'ETUDE DE LA DIFFUSION DES NEUTRONS - 7
1° - Accélérateurs. 7
a) - Accélérateur Van de Graaff tandem. 7
b) - Accélérateur de 150 kV. 7
2° - Hall neutrons. 8
3° - Sources de neutrons. 9
a) - Cible gazeuse de deutérium. 9
b) - Cible gazeuse de tritium. 9
c) - Cible solide de tritium. 10
d) - Flux de neutrons produits. 10
e) - Mesure du flux de neutrons. 10
4° - Spectromètre à neutrons. 11
a) - Détecteurs et électronique associée. 11
b) - Protection. 12
c) - Mesure de l'efficacité des détecteurs. 13
5° - Résolution en énergie du spectromètre et incertitude sur les mesures. 13

IV - RESULTATS EXPERIMENTAUX OBTENUS - 14

V - CONCLUSION - 15

-x-x-x-x-x-

I - INTRODUCTION -

L'examen des demandes de données neutroniques fait apparaître un besoin particulier dans le domaine des neutrons d'énergie incidente comprise entre 8 et 15 MeV. Le tableau 1 rassemble et regroupe l'ensemble des besoins figurant dans le rapport WRENDA 75 [1]. Ces demandes sont relatives à l'étude et au développement des réacteurs à fission, au domaine de la fusion thermonucléaire contrôlée et enfin aux programmes de sureté nucléaire. D'autres demandes pourraient, dans un avenir proche, être motivées par des applications non nucléaires et en particulier médicales [2].

L'importance des demandes non satisfaites et le petit nombre de données neutroniques publiées dans cette gamme d'énergie sont dues principalement aux difficultés expérimentales rencontrées dans la production des neutrons primaires et aux techniques de mesures.

La mesure de certaines constantes et en particulier celle de spectres d'émission de neutrons et celles relatives à la diffusion inélastique des neutrons nécessitent l'emploi de flux de neutrons incidents monocinétiques. En effet, dans ces expériences, la mesure du temps de vol des neutrons émis ou diffusés ne permet pas de déterminer simultanément l'énergie des neutrons incidents et celle des neutrons produits.

Après avoir défini les conditions expérimentales nécessaires à ces mesures, nous exposerons les techniques de production de neutrons adoptées par le Service de Physique Nucléaire du Centre d'Etudes de Bruyères-le-Châtel et nous décrirons le spectromètre de neutrons par temps de vol constitué de quatre chaînes de détection utilisé dans ce laboratoire.

II - METHODE ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES -

1° - Production des neutrons incidents .

Nous avons rassemblé dans le tableau 2 les principales réactions productrices de neutrons induites par des particules chargées : protons, deutérons, tritons et particules α. Pour chaque réaction nous avons indiqué la valeur du bilan en énergie Q, celle de l'énergie du seuil dans le cas des réactions endothermiques ainsi que les diverses réactions secondaires qui peuvent entrer en compétition avec la réaction productrice de neutrons considérée. De telles réactions parasites font que certaines réactions sont à proscrire pour la production de neutrons monocinétiques d'énergie comprise entre 8 et 15 MeV.

Nous allons ci-dessous apporter quelques commentaires au tableau 2. En premier lieu, le spectre des neutrons produits par la réaction $^{7}Li(p,n)$ s'accompagne de plusieurs autres groupes de neutrons et principalement celui qui conduit au premier niveau excité de ^{7}Be à 431 keV. La faible différence d'énergie entre ces deux groupes de neutrons limite l'utilisation de cette réaction au dessous de 8 MeV. Par contre, bien que s'accompagnant de plusieurs réactions secondaires, la réaction $^{9}Be(\alpha,n)$ a été utilisée, dans certains laboratoires, pour des mesures de diffusion élastique de neutrons à l'énergie incidente de 10 MeV environ [3]. En effet, la réaction principale passe par un maximum au voisinage de $E_{\alpha} = 4,5$ MeV ; en outre une différence d'énergie de 4,4 MeV environ sépare les deux principaux groupes de neutrons correspondant à l'état fondamental et au premier état excité de ^{12}C. Le choix de cette réaction est lié à la valeur élevée du Q de cette réaction qui permet d'étendre jusqu'à 10 MeV la gamme d'énergie des neutrons produits à l'aide d'accélérateurs de faible énergie ($\leq$ 5 MeV). Toutefois les rendements de cette réaction ne permettent pas des mesures de diffusion inélastique pour la plupart des noyaux.

A partir de la réaction $D(d,n)^{3}He$, des neutrons monocinétiques d'énergie comprise entre 8 et 15 MeV sont produits avec des deutérons dont l'énergie varie entre 5 et 12 MeV environ. Cependant, dans toute cette gamme d'énergie, cette réaction s'accompagne de la réaction de cassure du deutéron D(d,np)D dont le seuil est de 4,45 MeV et qui engendre un flux de neutrons dont le spectre est continu du fait de la cinématique des réactions à trois corps en voie de sortie. La figure 1 donne les valeurs publiées [4,5] des sections efficaces différentielles à 0° pour les réactions $D(d,n)^{3}He$ et D(d,np)D dans le système du laboratoire. On peut remarquer que, au-delà d'une énergie incidente de 5,8 MeV soit une énergie de neutrons de 9 MeV environ, la production des neutrons de "break-up" devient importante par rapport à la production de neutrons monocinétiques (10% du flux monocinétique). Cependant, le pic monocinétique des neutrons de la réaction $D(d,n)^{3}He$ et le début du continuum des neutrons de la réaction D(d,np)D sont séparés de 7 MeV. Cette différence d'énergie rend ainsi possible l'étude de la diffusion élastique et celle des diffusions inélastiques pour les niveaux d'énergie d'excitation inférieure à 7 MeV [6].

Pour éviter la présence d'un spectre continu de neutrons dû à la faible énergie de liaison du deutéron divers auteurs ont proposé le choix de la réaction $T(p,n)^{3}He$ bien que, pour une même énergie des neutrons produits,

la section efficace différentielle à 0° de cette réaction soit plus faible d'un facteur 3 environ que celle de la réaction $D(d,n)^3He$ [7,8,9,10] (Figure 2). En effet, la réaction de cassure du triton dans la réaction $T(p,np)D$, (Q = - 6,258 MeV), peut être considérée comme négligeable, la section efficace de cette dernière n'excédant pas 1% de celle de la réaction $T(p,n)^3He$ pour des neutrons d'énergie inférieure à 16 MeV [10].

Nous avons fait figurer, dans le tableau 2, la réaction $T(d,n)^4He$ qui est couramment utilisée pour la production des neutrons de 14 MeV environ à partir de deutérons incidents de faible énergie (150 keV environ). Cette réaction pourrait produire, en utilisant des deutérons incidents de plus haute énergie, des neutrons dont l'énergie peut être comprise entre 11 et 15 MeV lorsque ceux-ci sont émis vers les angles arrières , mais le rendement de cette réaction dans de telles conditions expérimentales d'une part et la présence de bruit de fond dû à la présence de neutrons d'énergies supérieures à 20 MeV et à la réaction de break-up du deutéron d'autre part font que cette méthode de production de tels neutrons est peu employée.

L'interaction d'un faisceau de tritons avec des cibles d'hydrogène ou de deutérium - cas des réactions $^1H(t,n)^3He$ et $D(t,n)^4He$ - permet du fait des conditions cinématiques de produire à 0° des flux de neutrons beaucoup plus importants qu'à partir des réactions $T(p,n)^3He$ et $T(d,n)^4He$ respectivement [11,12]. Cependant, l'accélération de faisceaux d'ions tritium intenses est d'une mise en oeuvre complexe et peu fréquente. En outre, ces réactions semblent mal adaptées à la production de flux de neutrons dont la dispersion en énergie est faible [11].

L'analyse du tableau 2 développée et commentée ci-dessus semble montrer que les réactions $D(d,n)^3He$ et $T(p,n)^3He$ sont les mieux adaptées pour produire entre 8 et 15 MeV des flux de neutrons intenses, de faible dispersion en énergie, nettement séparés des flux parasites produits par des réactions secondaires.

Ces réactions imposent l'emploi de particules accélérées jusqu'aux énergies comprises entre 5 et 12 MeV dans le cas de la réaction $D(d,n)^3He$ et entre 9 et 16 MeV dans le cas de la réaction $T(p,n)^3He$. En utilisant les faisceaux produits par un accélérateur Van de Graaff Tandem Super EN dont l'énergie maximum est de 14 MeV, il est possible de couvrir toute la gamme d'énergie des neutrons dans le cas de la réaction D + d. Par contre, la gamme d'énergie est limitée à 13 MeV dans le cas de la réaction T + p.

On peut alors utiliser en complément la réaction d + T à basse énergie à l'aide d'un accélérateur auxiliaire de basse énergie.

La qualité des mesures de spectrométrie des neutrons dépend directement de l'intensité du flux incident pour une dispersion en énergie donnée. Ces conditions conduisent à choisir des cibles gazeuses de deutérium et de tritium. En effet le rapport du nombre d'atomes de deutérium ou de tritium contenus dans une telle cible au nombre de ceux qui sont occlus dans un dépôt de Ti est, à dispersion en énergie égale, supérieur à 10 dans le premier cas (deutérium) et supérieur à 6 dans le second (tritium). Les valeurs de ce rapport restent sensiblement constantes dans toute la gamme d'énergie considérée.

Les réactions (p,n) ou (d,n) ainsi que les réactions (n,n') sur l'enveloppe de la cible gazeuse (feuille d'entrée, parois, fond) sont des sources de bruit de fond indésirable dans le spectre des neutrons primaires. Ces diverses sources parasites peuvent être minimisées par le choix des matériaux qui constituent l'environnement immédiat de la source de neutrons [6,13].

2° - Détection des neutrons.

Dans la gamme d'énergie considérée, la spectrométrie des neutrons est assurée par la méthode de temps de vol en utilisant le faisceau pulsé. Le temps de vol des neutrons variant entre 25,7 ns/m à E_n = 8 MeV et 18,9 ns/m à E_n = 15 MeV, une bonne résolution en temps de l'appareillage suppose une largeur de bouffées de neutrons inférieure ou égale à 1 ns et une base de vol supérieure ou égale à 6 m.

Les neutrons sont détectés à l'aide de scintillateurs rapides à protons de recul permettant une bonne discrimination (n-γ). Cette caractéristique est particulièrement importante lorsque la réaction productrice de neutrons est la réaction $T(p,n)^3He$. Un compromis entre une bonne efficacité de détection et un fort taux de comptage d'une part, et une bonne définition en temps de l'instant d'arrivée du neutron d'autre part conduit à utiliser dans la partie basse de la gamme d'énergie des scintillateurs $\emptyset$ = 10 cm, h = 2,5 cm et à plus haute énergie des scintillateurs de même diamètre et d'épaisseur 5 cm.

Enfin pour compenser les faibles taux de comptage liés à la longueur des bases de vol employées on peut utiliser un spectromètre composé

de plusieurs chaînes de détection.

Les critères définis dans cette deuxième partie ont été adoptés pour la conception et la réalisation du dispositif expérimental utilisé au Centre d'Etudes de Bruyères-le-Châtel pour la spectrométrie des neutrons dans la gamme d'énergie comprise entre 8 et 14 MeV. Les techniques de production de neutrons sont aussi employées pour la mesure des sections efficaces de production de photons dans les réactions induites par neutrons [14] et celle des sections efficaces de fission [15].

III - DISPOSITIF UTILISE POUR L'ETUDE DE LA DIFFUSION DES NEUTRONS -

1° - Accélérateurs .

a) Accélérateur Van de Graaff tandem.

L'accélérateur Van de Graaff tandem du type Super EN, construit par H.V.E.C., permet d'obtenir une tension maximale de 7 MV [16]. Il est équipé d'une source duoplasmatron à extraction directe fabriquée par la société Thomson-C.S.F. Cette source, utilisée comme injecteur fonctionnant à la tension nominale de 120 kV , fournit un faisceau d'ions négatifs possédant une faible dispersion en énergie (de l'ordre de 50 eV) et dont l'intensité maximale est de 130 µA pour les protons, de 100 µA pour les deutérons. Le facteur de transmission à travers l'accélérateur varie entre 30 et 50% suivant l'intensité du faisceau injecté. Un système de hachage à la fréquence de 2,5 MHz et de regroupement par modulation de vitesse (à 5 MHz) permet d'obtenir, un faisceau pulsé d'ions. Un système de post-pulsation après accélération permet d'améliorer la forme de la bouffée en éliminant les traînées dues à un regroupement imparfait des particules accélérées. Le transport du faisceau de la salle de l'accélérateur dans la salle d'expériences (hall neutrons) se fait à l'aide de diverses lentilles de focalisation magnétiques et de deux aimants à 45° (Fig. 3). Ces systèmes ont été étudiés pour conserver au mieux l'isochronisme du faisceau. Les caractéristiques moyennes du faisceau atteignant la cible sont données dans le tableau 3.

b) Accélérateur de 150 kV.

Un accélérateur auxiliaire du type SAMES 150 kV est installé dans la salle d'expériences [17]. Il est destiné à la production des neutrons de 14,9 MeV à partir de la réaction $T(d,n)^4He$ en utilisant une cible solide

de tritium. L'emplacement de cette cible coïncide avec celui de la cible de l'accélérateur tandem. Ainsi les mesures qui utilisent les faisceaux délivrés par ces deux accélérateurs sont faites dans des conditions aussi voisines que possible et avec le même spectromètre. En régime continu cet accélérateur peut débiter jusqu'à un courant de 1,5 mA de deutérons. Il est équipé d'une extension comprenant principalement un aimant d'analyse, un système de hachage du faisceau par balayage électrostatique, un regroupeur à modulation de vitesse et une lentille de focalisation. L'intensité moyenne du faisceau sur la cible en régime pulsé à la fréquence de 2,5 MHz peut atteindre jusqu'à 10 µA. La largeur des bouffées à mi-hauteur est comprise entre 1,5 et 2 nanosecondes.

2° - Hall neutrons.

Le hall neutrons (fig.3) de dimensions au sol 36 x 26 m^2 et de hauteur 6 m est construit en matériaux légers afin de diminuer le taux de neutrons diffusés. Les parois sont en mousse de polyuréthane de 5 cm d'épaisseur maintenue par deux feuilles d'aluminium. Une fosse à neutrons de diamètre 10 m et profondeur 3 m est centrée à l'aplomb du diffuseur. Elle est recouverte par un plancher en tôle d'acier de 3 mm d'épaisseur qui repose sur une charpente et qui peut supporter une charge de 4 t/m^2. L'axe du faisceau est à une hauteur de 1,70 m au dessus du sol. Les bases de vol ont une longueur maximum de 18 m pour des angles de détection compris entre 0° et 160°.

Pour une source de neutrons placée au centre de la fosse, le bruit de fond de neutrons diffusés par le sol, l'air et les parois du hall a été mesuré en différents points. Il apparaît que ce flux parasite suit sensiblement une loi en $\frac{1}{L}$, L étant la distance à la source. Des mesures similaires entreprises dans une salle aux murs épais montrent que le bruit de fond est plus élevé et reste sensiblement constant sur toute la surface. Cette comparaison démontre l'intérêt d'une aire d'expérimentation à parois minces pour les mesures de spectrométrie de neutrons rapides qui exigent des bases de vol importantes. Les éléments de cette comparaison seront développés dans un rapport à paraître [20].

3° - Sources de neutrons.

a) Cible gazeuse de deutérium.

L'enceinte de la cible, représentée sur la figure 4a, est un cylindre de longueur 3 cm, rempli de deutérium à la pression de 1 kg/cm^2. Elle est isolée du reste de l'extension par une fenêtre de Ni d'épaisseur 2 μ ou de Havar d'épaisseur 5 μ. La cible est munie d'un système de circulation du gaz qui sert à refroidir la fenêtre d'entrée (fig. 4b); on trouvera dans la réf. [6] une description complète de ce dispositif. Ce dernier assure une utilisation permanente de la cible jusqu'à des courants de 7 μA répartis sur une surface de 4mm^2. L'enveloppe de la cible est chemisée de tantale pour minimiser les réactions parasites (d,n).

Les spectres des neutrons produits à 0° en bombardant cette cible par des deutérons d'énergie 4,8 MeV et 10 MeV respectivement sont présentés dans les figures 5 et 6. Les neutrons monocinétiques produits dans ces conditions expérimentales ont respectivement des énergies de 8 et 13 MeV. Nous avons aussi présenté sur ces figures le spectre des neutrons produits par l'interaction des deutérons incidents avec l'enveloppe de la cible. Certains pics de faible intensité sont associés aux réactions (d,n) sur des produits de contamination en particulier le carbone.

On peut aussi remarquer, dans la figure 6, la forte contribution des neutrons résultant de la cassure du deutéron.

b) Cible gazeuse de tritium. [13]

L'enveloppe de la cible gazeuse de tritium est un cylindre de nickel naturel de 30 mm de long, 10 mm de diamètre et de 1 mm d'épaisseur. Il possède une fenêtre d'entrée en nickel naturel ou en ^{58}Ni dont l'épaisseur varie entre 2 et 5 μ. Cette fenêtre assure l'étanchéité entre la cellule gazeuse et une chambre elle-même fermée par une deuxième fenêtre d'entrée. Cette chambre est traversée par une circulation forcée d'hélium qui est destinée à refroidir les fenêtres (Fig. 7). Divers disques d'arrêt du faisceau ont été considérés et expérimentés. Ils se composaient soit d'un noyau de Z élevé (or, tantale) soit d'un corps pour lequel le bilan de la réaction (p,n) est fortement négatif (C, ^{28}Si, ^{58}Ni). Nous avons adopté un fond de cible en ^{58}Ni (270 mg/cm^2) pour les mesures de spectrométrie de neutrons et en or (193 mg/cm^2) pour les mesures de production de rayons γ. Dans le premier cas, le Q de la réaction (p,n) : Q = - 9,350 MeV permet de réduire le flux de

neutrons parasites, dans le second cas, la barrière coulombienne de l'or diminue le flux de rayons γ produits sur la cible par réactions $(p,p'\gamma)$ et $(p,n\gamma)$. L'étanchéité des divers éléments de la cible est assurée par des joints en or pour éviter la diffusion du tritium.

Lorsque la pression dans la chambre d'hélium est la moitié de celle de la cible, l'intensité maximum du faisceau est de 5 µA répartie sur une surface de 6 mm^2. La pression de fonctionnement de la cible est de 1 atm.; sa pression maximale est de 3 kg/cm^2.

Les figures 8 et 9 montrent les spectres de temps de vol des neutrons produits à 0° en bombardant la cible avec des protons d'énergie 8,7 et 13,7 MeV respectivement. Sur chaque figure ces spectres sont comparés à ceux obtenus cible vide.

c) Cible solide de tritium.

Les cibles solides de tritium utilisées auprès de l'accélérateur 150 kV sont obtenues par adsorption de tritium dans du titane déposé sur une pastille de cuivre. Elles correspondent à un maximum d'atomes de tritium adsorbés pour une dispersion en énergie donnée. La dispersion en énergie des neutrons produits en bombardant ces cibles par des deutérons de 150 keV est comprise entre 10 et 40 keV. Ces cibles sont refroidies par un jet d'air comprimé dirigé sur la face arrière de la cible.

d) Flux de neutrons produits.

Nous avons calculé, pour chaque cible gazeuse, le flux des neutrons produits en fonction de leur énergie et pour diverses valeurs de la dispersion en énergie [9]. Celle-ci est calculée en tenant compte du straggling en énergie dans les fenêtres d'entrée, d'une ouverture angulaire du faisceau de neutrons supposés égale à 7° et de la perte d'énergie du faisceau incident dans le gaz. Les résultats de ces calculs sont rassemblés dans la figure 10.

e) Mesure du flux de neutrons.

Le flux de neutrons primaires est déterminé en utilisant la section efficace de diffusion (n,p) au voisinage de 0° comme étalon [18]. Ce flux est mesuré à l'aide d'un télescope à protons de recul dont le radiateur de polyéthylène couvre, depuis le centre de la cible, le même angle solide que l'échantillon.

L'efficacité du télescope est calculée à diverses énergies par une méthode analytique ; elle est mesurée à 14,1 MeV à l'aide de la méthode de la particule associée en réaction $T(d,n)^4He$.

4° - Spectromètre à neutrons .

a) Détecteurs et électronique associée.

Le spectromètre à neutrons se compose de quatre détecteurs mobiles et d'un cinquième fixe servant de moniteur.

Chaque détecteur comprend un scintillateur liquide NE 213 contenu dans une capsule cylindrique de 10 cm de diamètre et de 2,5 ou 5 cm d'épaisseur. Ce liquide scintillant est choisi pour ses propriétés de discrimination de forme entre les neutrons et les rayons γ. Le scintillateur est couplé optiquement à un photomultiplicateur rapide 58 DVP (Radiotechnique).

Le moniteur de neutrons est constitué par un scintillateur liquide NE 213 de diamètre 12,5 cm et d'épaisseur 5 cm associé à un photomultiplicateur XP 1041 (Radiotechnique).

L'ensemble scintillateur-photomultiplicateur de chaque chaîne est placé à l'intérieur d'un manchon thermostaté par une circulation d'eau à 15°C. Ce dispositif assure la stabilité des caractéristiques de ces deux composants, en particulier celle de la discrimination (n-γ). En outre, le gain de chaque photomultiplicateur est contrôlé à l'aide de diodes photoémissives qui assurent la régulation de la haute tension de chaque photomultiplicateur [19].

Le temps de vol du neutron entre l'échantillon et le détecteur est repéré à l'aide d'un convertisseur temps amplitude (figure 11). L'impulsion de départ est donnée par la voie rapide de chaque chaîne de détection et l'impulsion d'arrêt correspond à la pulsation du faisceau. Cette dernière est fournie par un anneau capacitif placé sur le passage de la bouffée de particules accélérées au voisinage de la cible. Le signal linéaire du détecteur à scintillation est analysé dans un circuit de discrimination des neutrons et des rayons γ qui conditionne le codage des informations à enregistrer. Celles-ci correspondent au temps de vol du neutron et à l'énergie du proton de recul qui lui est associé. Elles sont stockées dans la mémoire tampon d'un ordinateur C.I.I. 10 020 puis transférées par blocs sur une bande magnétique. Un signal d'identification est aussi enregistré ; il permet de repérer le numéro de la chaîne de mesure concernée.

Parallèlement un ensemble d'échelles de comptage assure l'acquisition des informations concernant la mesure relative du flux de neutrons.

La résolution en temps du spectromètre a été mesurée à l'aide des rayons γ de 511 keV émis par une source de ^{22}Na. Elle est environ de 0,5 ns.

b) Protection.

Dans les expériences de diffusion de neutrons, l'échantillon est placé au centre d'un système de collimation et de protection des quatre détecteurs [20]. Ce système est représenté dans la figure 12a; il est composé de trois parties.

Un ensemble de quatre barres d'ombre distantes de 20° collimatent le faisceau de neutrons produits par interaction des neutrons incidents avec l'échantillon. Il protège ainsi les détecteurs des neutrons issus de la cible et de ceux diffusés dans l'environnement de cette dernière. Chaque barre est constituée de pointe de tungstène placée à 15 cm de l'échantillon et d'un bloc en fer en forme de tronc de cône. La forme de chaque élément est définie pour masquer, de la cible, les autres éléments de la protection. Pour éviter que des neutrons issus de la cible diffusent par le canal d'entrée du collimateur dans la direction du détecteur une pièce de plomb, de forme ajustée suivant les angles de détection est disposée à proximité de la cible entre celle-ci et les pointes des barres d'ombre. Le flux direct des neutrons est atténué par chaque barre d'ombre d'un facteur supérieur à 10^6 pour tous les angles de détection compris entre 10 et 160°.

Derrière chaque barre d'ombre, un collimateur intermédiaire en paraffine chargée au bore et au carbonate de lithium diminue le bruit de fond dû aux neutrons diffusés par l'air ou par le sol en direction du détecteur. Son taux de réduction est supérieur à 10^3.

Chaque détecteur est placé à l'arrière d'une protection massive de longueur 2,40 m, de diamètre maximum 85 cm et pesant 1,8 T (Fig. 13). Elle est essentiellement composée de paraffine chargée au bore et au carbonate de lithium. L'entrée du canal de détection est diaphragmée par un collimateur en cuivre. Les rayons γ de l'environnement du détecteur sont absorbés par un blindage de plomb de 5 cm d'épaisseur entourant celui-ci.

Pour démontrer l'intérêt d'un spectromètre composé de quatre chaînes de détection, nous avons comparé les spectres de temps de vol obtenus en utilisant l'ensemble des quatre barres d'ombre qui collimatent, près de

l'échantillon, le flux de neutrons diffusés à ceux enregistrés avec un seul détecteur et la géométrie à une seule barre d'ombre disposée entre la cible et le détecteur (fig. 12b), les autres conditions expérimentales étant inchangées. Comme on peut le voir sur les figures 14 et 15, le rapport signal sur bruit est, au cours de ces deux expériences, identiques [20].

c) Mesure de l'efficacité des détecteurs.

L'efficacité de chaque détecteur est mesurée, lors de chaque expérience, par deux méthodes. Elle est d'abord déterminée à partir de la diffusion (n,p), [18], par un échantillon de polyéthylène de faibles dimensions pour réduire les effets de diffusions multiples (Ø = 1 cm, h = 3 cm). Elle est ensuite déduite de la mesure des neutrons produits par la réaction $D(d,n)^3He$ à divers angles en se référant aux données rapportées [21,4]. Elle est aussi calculée par une méthode de Monte-Carlo en utilisant un code développé dans ce laboratoire [20].

5° - Résolution en énergie du spectromètre et incertitudes sur les mesures .

Nous avons porté, sur la figure 16, les valeurs de la résolution globale du spectromètre pour diverses énergies de neutrons comprises entre 1 et 15 MeV. Cette quantité est calculée en tenant compte de la dispersion en énergie des neutrons incidents due à la cible et à l'ouverture angulaire du faisceau de neutrons qui frappe l'échantillon (C) ; elle inclut l'indétermination dans la définition de l'instant zéro (P) liée principalement à la largeur de la bouffée ainsi que la résolution en temps du détecteur et de l'électronique (E). Les calculs ont été faits en supposant l'emploi de cibles de deutérium ou de tritium, une longueur de base de vol égale à 10 m et une épaisseur de scintillateur de 2,5 cm et un échantillon de 2 cm de diamètre. Ces deux dernières grandeurs entraînent des dispersions en énergies repérées par S et E_c respectivement . Au delà de 8 MeV, la fluctuation en énergie due à l'incertitude sur la détection des instants initiaux et finaux (P + E) a une importance relative prépondérante.

Dans le tableau 4, les incertitudes sur les sections efficaces différentielles mesurées ont été classées en deux catégories : la première

se rapporte aux erreurs relatives qui affectent la forme des distributions angulaires ; la seconde rassemble les erreurs de normalisation qui affectent les valeurs absolues.

Le tableau 5 rassemble les caractéristiques de l'appareillage expérimental présenté dans la troisième partie.

IV - RESULTATS EXPERIMENTAUX OBTENUS -

A titre d'illustration nous présentons dans la figure 17 le spectre de temps de vol des neutrons diffusés à 30° et à 90° par un échantillon de carbone à l'énergie incidente de 8 MeV. Les deux pics sont associés respectivement à l'état fondamental et au premier niveau excité de ^{12}C (Q = - 4,439 MeV).

La possibilité d'utiliser simultanément quatre détecteurs permet de mesurer la distribution angulaire des neutrons entre 10° et 160° en cinq ou six séries d'enregistrements. La cohérence de ces mesures est vérifiée aux angles de recouvrement,2 ou 4 par distribution angulaire.

La figure 18 rassemble les données relatives à la diffusion des neutrons par le carbone à 14 énergies de neutrons comprises entre 8 et 14,5 MeV [6]. Aux deux extrémités de cette gamme d'énergie ($E_n \leqslant 9$ MeV et $E_n \geqslant 14$ MeV) elles sont comparées à celles précédemment publiées [28 - 31]. Entre 9 et 14 MeV aucune autre donnée ne semble avoir été rapportée à ce jour. Sur la base de ces résultats une évaluation nouvelle a été proposée pour ce noyau [25].

L'étude expérimentale de la diffusion des neutrons d'énergie comprise entre 8 et 15 MeV nous a permis de déterminer les paramètres de déformation de certains isotopes pairs de Se et de préciser les différents termes du potentiel de diffusion (Fig. 19) [22]. En effet, à ces énergies, la contribution du mécanisme procédant par la formation du noyau composé est faible sinon négligeable devant celle du processus direct. Nous avons pu montrer que la distribution angulaire des neutrons diffusés élastiquement est sensible principalement aux termes dépendant de l'isospin dans les parties réelles et imaginaires du potentiel de diffusion, et que la distribution angulaire des neutrons diffusés par le premier niveau d'excitation est sensible aux termes d'isospin et aux paramètres de déformation du noyau. En outre, pour les mêmes noyaux, nous avons pu déterminer la profondeur du terme d'absorption de volume à partir des données de diffusion élastique à l'énergie incidente de 10 MeV (Fig. 20).

V - CONCLUSION -

Dans la gamme d'énergie des neutrons comprise entre 8 et 15 MeV, de nombreuses données neutroniques font l'objet de demandes qui n'ont pu être satisfaites à ce jour. Les modèles théoriques, seuls, ne permettent pas encore de les calculer avec une précision suffisante ; en effet le potentiel de diffusion neutron-noyau et les paramètres qui décrivent la déformation nucléaire doivent être précisés. Ces deux considérations justifient un effort expérimental pour mesurer ces diverses constantes et pour approfondir les mécanismes d'interaction. Un dispositif expérimental complet a été développé dans ce laboratoire et y est utilisé. Les qualités de cet appareillage ont été démontrées et illustrées à partir de certains de nos récents travaux portant sur la diffusion des neutrons rapides par le carbone [6] et les isotopes pairs de Se [22].

REFERENCES

[1] - WRENDA 75, World Request List for Nuclear Data Measurements INDC (SEC) - 46/U + R + F + S. June 1975. IAEA (Vienne).

[2] - BEWLEY D.K., Proc. Nuclear Cross Sections and Technology, Washington Mars 1975 NBS 425 p. 527 (1975).

[3] - CORCALCIUC V., FAROQUE M., HOLMQVIST B. et WIEDLING T. dans Progress Report on Nuclear Data activities in Sweden, Septembre 1974 KDK-6, NEANDC (OR) - 140/L, INDC (SWD) - 7/L.

[4] - BROLLEY J.E. Jr., et FOWLER J.L. dans Fast Neutron Physics, Vol. 1 (1960) p. 73. Interscience Publishes, INC, New York.

LISKIEN H. et PAULSEN A., Nuclear Data tables 11 (1973) 569.

[5] - CRAMBERG L., ARMSTRONG A.H. et HENKEL R.L., Phys. Rev. 104 (1956) 421.

[6] - HAOUAT G., LACHKAR J., SIGAUD J., PATIN Y., COÇU F., Rapport CEA-R-4641 (1975).

[7] - COON J.H. dans Fast neutron Physics, Vol. 1 (1960) p. 677. Interscience Publishers, INC, New York.

[8] - SOLEILHAC M., Note CEA (1975) N-1812.

[9] - HAOUAT G., LACHKAR J., SIGAUD J., PATIN Y. et SEGUIN S., Neytroniya Physica , Compte-rendus 3ème Conf. KIEV (1975). Vol.6 - p. 236.

[10] - Mac DANIELS D.K., DROSG M., HOPKINS J.C. et SEAGRAVE J.D., Phys. Rev. C6 (1972) 1593.

[11] - DEUCHARS W., PERKIN J.L. et BATCHELOR R., Nucl. Instr. Meths. 23 (1963) 305.

[12] - ARGO H.V., TASCHEK R.F., AGNEW H.M., HEMMENDINGER A. et LELAND W.T. Phys. Rev. 87 (1952) 612.

[13] - HAOUAT G. et SEGUIN S., Note CEA-N-1739 (1974).

[14] - LACHKAR J., SIGAUD J., PATIN Y. et HAOUAT G., Nucl. Sci. Eng. 55 (1974) 168.

[15] - CANCE M., GRENIER G., JOLY S. et VOIGNIER J.J., NEANDC (E) 173 "L", INDC (FR) 8/L, (1976) 66.

[16] - DANDINE A., "Opération de conversion du Van de Graaff Tandem EN 6 MV du Centre d'Etudes de Bruyères-le-Châtel en Tandem Super EN 7 MV" Note CEA-N-1847 (1976).

- ADAM A. et CABE J., Nucl. Inst. and Meth. 121 (1974) 339.

[17] - DANDINE A. et SINOPOLI L.,"Installation et essais de l'accélérateur Samès 150 keV du Service Physique Nucléaire de B.III" Note CEA-N-1848 (1976).

[18] - HOPKINS J.C. et BREIT G., Nuclear Data tables A9 (1971) 137.

[19] - HAOUAT G. et GIMAT D., Nucl. Instr. Meth. 117 (1974) 611.

[20] - SIGAUD J. et al., à paraître.

[21] - SCHULTE R.L., COSACK M., OBST A.W. et WEIL J.L., Nucl. Phys. A192 (1972) 609.

[22] - LACHKAR J., McELLISTREM M.T., HAOUAT G., PATIN Y., SIGAUD J., COÇU F., Phys. Rev. C, 14 (1976) 933.

[23] - LISKIEN H. et PAULSEN A., Atomic data and nuclear data tables 15 (1975) 57.

[24] - DROSG M. et DRAKE D.M., Rapport LA 5732-MS (1974).

[25] - LACHKAR J., COÇU F., HAOUAT G., LE FLOCH P., PATIN Y. et SIGAUD J., NEANDC (E) 168 "L" et INDC (FR) - 7/L (1975). Pour une bibliographie complète des données se reporter table 11.

[26] - VOITOVETSKII V.K. KORSUNSKII I.L. et PAZHIN Yu. F., Nucl. Instr. Meth. 33 (1956) 245.

[27] - KINNEY W.E., Nucl. Instr. Meth. 83 (1970) 15.

[28] - PEREY F.G. et KINNEY W.E., ORNL 4441 (1969).

[29] - VELKLEY D.E., BRANDENBERGER J.D., GLASGOW D.W., McELLISTREM M.T., MANTHURUTIL J.C. et POIRIER C.P., Phys. Rev. C7 (1973) 1736.

[30] - CROSS W.G. et CLARKE R.L., Nucl. Phys. 53 (1964) 177.

[31] - BOUCHEZ R., DUCLOS J. et PERRIN P., Nucl. Phys. 43 (1963) 628.

Manuscrit reçu le 7 mars 1977

LEGENDE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Tableau des demandes de données neutroniques extraites du rapport WRENDA 75 [1] relatives aux énergies de neutrons incidents comprises entre 8 et 15 MeV.

Tableau 2 : Réactions productrices de neutrons induites par particules chargées.

Tableau 3 : Caractéristiques du faisceau délivré, en régime pulsé, par l'accélérateur Van de Graaff Tandem Super EN du Centre d'Etudes de Bruyères-le-Châtel.

Tableau 4 : Tableau des incertitudes de mesure.

Tableau 5 : Résumé des conditions expérimentales.

REACTION	Programme des réacteurs à fission					Programme des réacteurs à fusion					Sûreté nucléaire				
	Demandes suivant l'origine et la priorité				Total					Total					Total
	CEE (a)		CEE (b)			CEE (a)		CEE (b)			CEE BRC (a)		CEE tome (b)		
	1	2	1	2		1	2	1	2		1	2	1	2	
Diffusion élastique et inélastique (c)	11	9	11	19	50	6	6	4	8	24	-	-	-	-	-
(n,p)	2	3	1	2	8	2	1	-	-	3	-	-	-	-	-
(n,α)	3	2	3	1	9	1	3	1	1	6	-	-	-	-	-
(n,n'γ) (d)	5	4	1	7	17	1	1	3	7	12	-	-	-	-	-
(n,γ)	5	9	39	36	89	-	1	6	1	8	3	1	13	2	19
(n,2n) et (n,3n)	-	4	1	1	6	1	3	1	-	5	-	-	-	-	-
(n,f)	9	10	23	20	61	-	-	-	-	-	1	2	-	-	3
($\bar{\nu}$) (e)	1	8	5	1	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Spectre d'émission de neutrons (f)	-	7	2	4	13	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-
Total cumulé					268					59					21

Tableau des demandes de données neutroniques extraites du rapport WRENDA 75 [1] relatives aux énergies de neutrons incidents comprises entre 8 et 15 MeV.

(a) Demandes en provenance des pays de la Communauté Européenne.
(b) Demandes en provenance des pays extérieurs à la Communauté.
(c) Sous cette rubrique sont regroupées les demandes de sections efficaces intégrées, de sections efficaces différentielles $\frac{d\sigma}{d\Omega}$, $\frac{d\sigma}{dE}$ et $\frac{d^2\sigma}{d\Omega\, dE}$.
(d) Sous cette rubrique sont regroupées les demandes de sections efficaces de production de photons et celles de production de photons par diffusion inélastique.
(e) Sous cette rubrique sont regroupées les demandes de nombre moyen de neutrons émis par fission et du nombre moyen de neutrons prompts émis par fission.
(f) Sous cette rubrique sont regroupées les demandes de spectre de neutrons et des sections efficaces d'émission de neutrons.

- TABLEAU 1 -

Réaction principale	réf.	Q MeV	E_S (MeV)	Réactions secondaires	Q (MeV)	E_S (MeV)	Réactions parasites. Limites d'utilisation.
$^7Li(p,n)^7Be$	23	- 1,644	1,881	$^7Li(p,n)^7Be^*$ $^7Li(p,n^3He)^4He$ $^7Li(p,n)^7Be^{**}$	- 2,075 - 3,229 - 6,190	2,373 3,692 7,080	réactions (p,n) sur le fond de la cible Peu utilisable pour produire des neutrons de $E_n > 8$ MeV
$T(p,n)^3He$	4 24	- 0,764	1,019	$T(p,np)D$	- 6,258	8,348	réactions (p,n) sur le fond de la cible rayonnement γ important
$^1H(t,n)^3He$	11 24	- 0,764	3,056	$^1H(t,np)D$	- 6,258	25,032	réaction sur tritium occlus $T(t,2n)^4He$ ($Q = + 11,332$ MeV)
$D(d,n)^3He$	4	+ 3,269	-	$D(d,np)D$	- 2,225	4,450	réaction (d,n) sur deuterium occlus dans le fond de la cible.
$^9Be(\alpha,n)^{12}C$	25	+ 5,708	-	$^9Be(\alpha,n)^{12}C^*$ $^9Be(\alpha,n)^{12}C^{**}$ $^9Be(\alpha,3\alpha n)$	+ 1,28 - 1,94 - 1,572	- 2,80 2,275	Peu utilisable pour produire des neutrons d'énergie supérieure à 10 MeV
$T(d,n)^4He$	4	+ 17,59	-	$T(d,np)T$ $T(d,2n)^3He$	- 2,225 - 2,990	3,710 4,980	les neutrons d'énergie $11 \leqslant E_n \leqslant 15$ MeV sont émis vers l'arrière
$D(t,n)^4He$	4	+ 17,59	-	$D(t,np)T$ $D(t,2n)^3He$	- 2,225 - 2,990	5,130 7,480	les neutrons d'énergie $12 \leqslant E_n \leqslant 15$ MeV sont émis vers l'arrière

- TABLEAU 2 -

Caractéristiques du faisceau obtenu en régime pulsé par l'accélérateur Van de Graaff Tandem Super EN du Centre d'Etudes de Bruyères-le-Châtel

Faisceau de protons					
V (MV)	4,6	5,5	6	6,5	7
E_p (MeV)*	9,2	11	12	13	14
$(E_n)_{0°}$ (MeV)**	8,0	10	11	12	13
I_p (uA)	3,5	4	3	3	3
Largeur de la bouffée en (ns)	0,8	0,9	1	1	1
Faisceau de deutérons					
V (MV)	2,5	3	4	5	6
E_d (MeV)*	5	6	8	10	12
$(E_n)_{0°}$ (MeV)**	8	9	11	13	15
I_p (uA)	2,5	3	3	3,5	4,0
Largeur de la bouffée en (ns)	1	1	1	1	1

*E_p ou E_d est l'énergie des particules incidentes à l'entrée de la cible gazeuse avant traversée de la fenêtre d'entrée.

**$(E_n)_{0°}$ est l'énergie approximative des neutrons produits par réaction T + p dans le premier cas et D + d dans le second.

La fréquence de récurrence de la pulsation est 2,5 MHz.

- TABLEAU 3-

TABLEAU DES INCERTITUDES DE MESURE

A - INCERTITUDES RELATIVES -

- Statistique de comptage et estimation du fond	1 à 7%
- Monitorage du flux	1%
- Dépendance en énergie de l'efficacité des détecteurs	3%
- Corrections d'échantillons	2%
Total des incertitudes relatives	4 à 8%

B - INCERTITUDES ABSOLUES -

- Détermination des positions géométriques	< 0,5%
- Section efficace de diffusion (n,p)	< 1%
- Efficacité du compteur télescope	2%
- Statistique de comptage du compteur télescope	1,5%
Total des incertitudes absolues	4,5%

- TABLEAU 4 -

- TABLEAU 5 -

RESUME DES CONDITIONS EXPERIMENTALES

Energie des neutrons incidents:

- Entre 8,0 et 15 MeV

Dispersion en énergie :

- Cf. Figure 16

Flux de neutrons :

- Cf. Figure 9 et réf. [9]

Sources de neutrons :

a) Réaction $D(d,n)^3He$, $8 \leqslant E_n \leqslant 15$ MeV.

b) Réaction $T(p,n)^3He$, $8 \leqslant E_n \leqslant 13$ MeV.

c) Réaction $T(d,n)^4He$, $E_n = 14,9$ MeV.

Cibles gazeuses et cibles solides :

a) de deutérium refroidie par circulation du gaz (fig. 4) [6].

b) de tritium refroidie par circulation, d'hélium au contact des fenêtres d'entrée (fig. 7) [13]

c) de tritium-titane sur dépôt de cuivre.

Faisceau et pulsation : Cf. tableau 3.

- Largeur de la bouffée : 0,8 à 1 ns.
- Fréquence de récurrence : 2,5 MHz.
- Courant moyen : 2,5 à 4 µA.

Echantillons :

- Dimensions maximales : Ø = 25 mm, h = 30 mm
- Polyéthylène (pour mesure d'efficacité des détecteurs) cylindre plein Ø = 10 mm, h = 30 mm.

Conditions expérimentales :

- Distance centre de la cible - axe du diffuseur : 10 cm.
- Distance axe du diffuseur - centre du détecteur : variable entre 6 et 10 m.
- Distance centre de la cible - radiateur télescope : variable suivant les dimensions de l'échantillon.

Détection :

- Nombre de détecteurs : 4.
- Caractéristiques du scintillateur : NE-213, Ø = 10 cm, e = 2,5 ou 5 cm.

- Résolution en temps de chaque chaîne de détection : $\simeq$ 0,8 ns pour les rayons γ d'annihilation de ^{22}Na.
- Résolution globale compte-tenu de la pulsation du faisceau et des dimensions de la cible et de l'échantillon : 2,1 ns pour des neutrons de 10,0 MeV.

Mesure du flux des neutrons :

- Par télescope à protons de recul dont les caractéristiques sont les suivants :
  - Radiateur : polyéthylène e = 300 µ, Ø = 14 mm.
  - Diode ΔE/ΔX : épaisseur 300 µ, Ø = 20 mm.
  - Diode E : épaisseur : 1500 µ, Ø = 14 mm.
  - Distance radiateur-diode E : 90 mm.
  - Calcul de l'efficacité par méthode analytique [26], et comparaison avec l'expérience à 14,1 MeV.
  - En réaction $D(d,n)^3He$, la mesure du flux des neutrons est rapportée à l'indication de deux diodes protons placées de part et d'autre de la cible gazeuse à 7,5 cm de celle-ci. Elles comptent les protons de la réaction D(d,p)T produits dans la cible.
  - La mesure du flux de neutrons est aussi rapportée à l'indication d'un détecteur de neutrons placé à 55 degrés par rapport au faisceau incident à 5 m de la cible.

Efficacité des détecteurs :

- La courbe d'efficacité est déterminée expérimentalement :
  a) par diffusion (n-p) sur un échantillon de polyéthylène.
  b) à partir de neutrons de la réaction $D(d,n)^3He$.
- La courbe d'efficacité est calculée par une méthode de Monte-Carlo [20].

Positions angulaires :

- Les mesures ont été effectuées tous les 10° entre 10 et 160 degrés. La précision sur la position angulaire est de : ± 0,2 degré.

Corrections de diffusions multiples et dispersions angulaires :

- Par calcul analytique [27] et par méthode de Monte-Carlo à l'aide d'un code développé dans ce laboratoire [20].

Incertitudes sur les mesures :

- Cf. tableau 4.

LEGENDE DES FIGURES

Figure 1 : Sections efficaces différentielles à 0° des réactions $D(d,n)^3He$ et $D(d,n)D$ dans le système du laboratoire en fonction de l'énergie des deutérons incidents.

Figure 2 : Section efficace différentielle à 0° de la réaction $T(p,n)^3He$ dans le système du laboratoire en fonction de l'énergie des protons incidents.

Figure 3 : Implantation de l'accélérateur tandem, de l'accélérateur 150 kV et du Hall neutrons.

Figure 4 : Cible gazeuse de deutérium.

4a: corps de la cible.

4b: système de circulation et de refroidissement de la fenêtre d'entrée.

Figure 5 : Spectres de temps de vol des neutrons produits à 0° en bombardant avec des deutérons de 4,746 MeV la cible gazeuse de deutérium remplie à 1 atm. (spectre du haut) et vide (spectre du bas). L'énergie des neutrons de la réaction $D(d,n)^3He$ est de 8 MeV. La base de vol est de 10 m.

Figure 6 : Spectres de temps de vol des neutrons produits à 0° en bombardant avec des deutérons de 9,962 MeV la cible gazeuse de deutérium remplie à 1 atm. (spectre du haut) et vide (spectre du bas). L'énergie des neutrons de la réaction $D(d,n)^3He$ est de 13 MeV. La base de vol est de 10 m.

Figure 7 : Cible gazeuse de tritium.

7a: corps de la cible.

7b: circuit de remplissage de tritium et système de circulation et de refroidissement d'hélium.

Figure 8 : Spectres de temps de vol des neutrons produits à 0° en bombardant avec des protons de 8,734 MeV la cible gazeuse de tritium remplie à 1 atm. (spectre du haut) et vide (spectre du bas). L'énergie des neutrons de la réaction $T(p,n)^3He$ est de 8 MeV. La base de vol est de 10 m. La résolution en énergie est identique à celle de la cible de deutérium (fig.5).

Figure 9 : Spectre de temps de vol des neutrons produits à 0° en bombardant avec des protons de 13,736 MeV la cible gazeuse de tritium remplie à 1 atm. (spectre du haut) et vide (spectre du bas). L'énergie des neutrons de la réaction $T(p,n)^3He$ est de 13 MeV. La base de vol est de 10 m. La résolution en énergie est identique à celle de la cible de deutérium (fig.6).

Figure 10 : Variation, avec l'énergie des neutrons, du flux délivré par les cibles gazeuses de deutérium et de tritium, pour plusieurs valeurs de la dispersion en énergie des neutrons. Les courbes en tracé épais discontinu, correspondent à la cible de tritium (T). Celles en tracé fin discontinu correspondent à la cible de deutérium (D) ; pour chaque courbe la dispersion en énergie est constante et repérée par sa valeur en keV. Deux courbes en trait continu marquées respectivement ϕ_{LD} et ϕ_{LT} correspondent au flux maximum limité par la pression maximum admissible dans la cible (3 atm.).

Figure 11 : Shéma du montage électronique de l'ensemble de spectrométrie des neutrons par temps de vol,

Figure 12 : a) Schéma du système de collimation et de protection de quatre détecteurs.

b) Schéma de l'ensemble barre d'ombre, collimateurs, protection pour un seul détecteur.

Figure 13 : Plan de la protection massive entourant le détecteur.

Figure 14 : Spectre de temps de vol des neutrons de 8 MeV diffusés à 30° par un échantillon de carbone. La base de vol est de 8 m. Le spectre du haut a été enregistré en utilisant le système de 4 barres d'ombre, celui du bas, en utilisant une géométrie à une barre d'ombre.

Figure 15 : Même légende que la figure 14 mais l'angle de détection est de 90°. Dans les deux cas les neutrons étaient produits par la réaction $D(d,n)^3He$.

Figure 16 : Variation de la résolution globale en énergie (T) du spectromètre avec l'énergie des neutrons, pour les cibles gazeuses de deutérium (courbe du bas) et de tritium (courbe du haut). Le calcul a été effectué avec une longueur de base de vol de 10 m, une épaisseur de scintillateur (S) de 2,5 cm, un diamètre d'échantillon (Ec) de 2 cm et une résolution en temps du détecteur (E) de 0,8 ns.

Figure 16 (suite) : Pour la cible de deutérium la pression du gaz est 1 atm., la fenêtre 2 μ d'épaisseur, l'ouverture angulaire du faisceau de neutrons est 7 deg et la résolution en temps de la pulsation (P) est 1,0 ns. Pour la cible de tritium la pression est 1 atm., les 2 fenêtres ont 2 μ d'épaisseur, l'ouverture angulaire du faisceau de neutrons est 7 deg et la résolution en temps de la pulsation (P) est 0,8 ns. Les contributions à la résolution globale de la cible (C), de la dispersion en temps de la pulsation et de l'électronique (P + E) et de l'épaisseur du scintillateur et de l'échantillon (Ec + S) sont aussi représentées.

Figure 17 : Spectres de temps de vol des neutrons de 8 MeV diffusés à 30 et 90° par un échantillon de carbone (respectivement en haut et en bas). La contribution des neutrons détectés sans diffuseur a été soustraite. Conditions de fig. 14 avec 4 barres d'ombre.

Figure 18 : Diffusions élastique et inélastique des neutrons par ^{12}C dans la gamme d'énergie comprise entre 8 et 14,5 MeV [6]. Ces données sont comparées en dessous de 9 MeV et au dessus de 14 MeV aux données précédemment publiées :
a) : réf. [28] - b) : réf. [29] - c) : réf. [30] - d) réf. [31]

Figure 19 a et b : Diffusions élastique et inélastique des neutrons de 8 MeV par les isotopes pairs de Se. Les courbes en trait plein ou en traits mixtes sont les résultats de calculs en équations couplées ; les courbes en pointillé sont les résultats des calculs par modèle optique [22].

Figure 20 : Diffusion élastique des neutrons de 10 MeV par ^{76}Se et ^{82}Se. Les mêmes conventions que dans la légende de la figure 19 ont été adoptées [22].

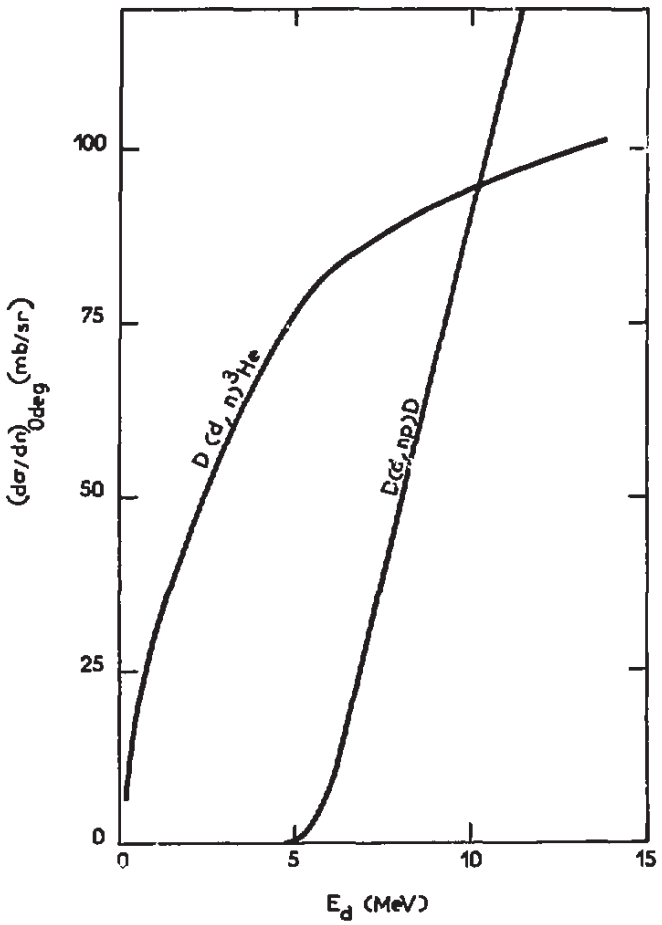

100
75
50
25
0
0
5
10
15
$(d\sigma/d\Omega)_{0deg}$ (mb/sr)
D (d, n)^{3}He
D(d, np)D
E_d (MeV)

FIG. 1

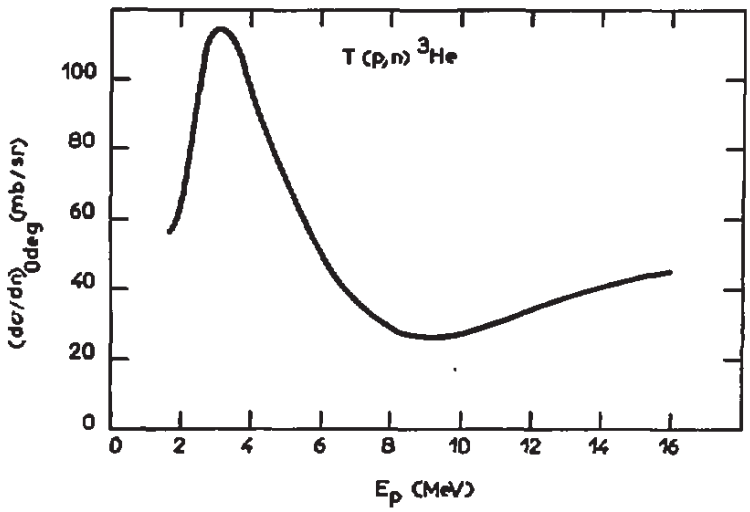

T (p,n) ^{3}He
100
80
60
40
20
0
0
2
4
6
8
10
12
14
16
$(d\sigma/d\Omega)_{0deg}$ (mb/sr)
E_p (MeV)

FIG. 2

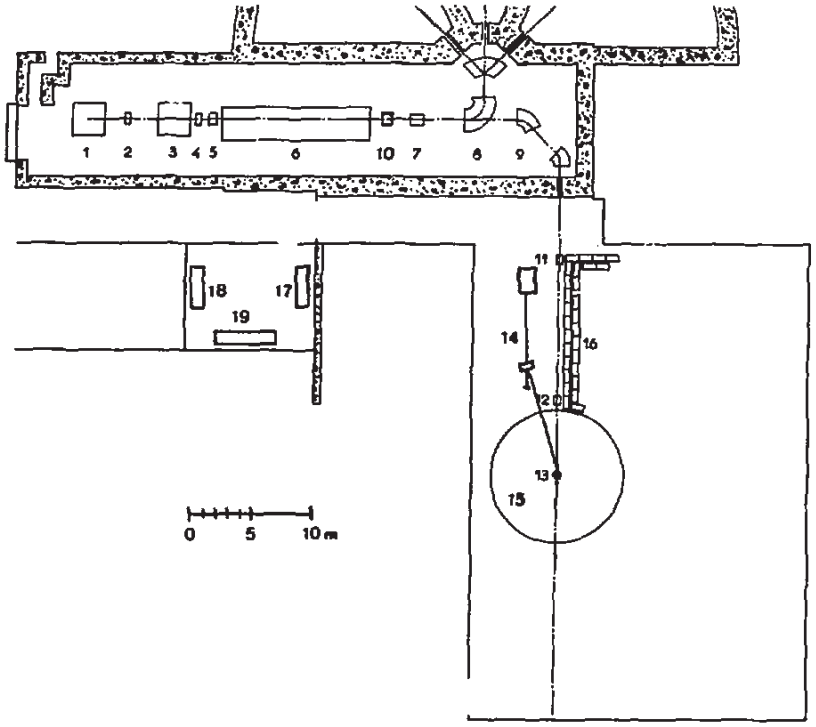
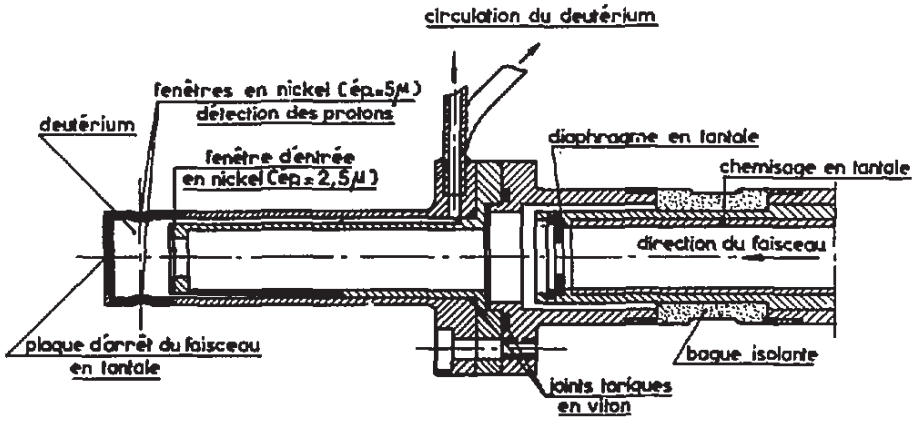


FIG. 3

(1) source à extraction directe et injecteur, (2) et (4) hacheurs, (3) source à échange de charges, (5) regroupeur, (6) accélérateur tandem, (7), (11) et (12) lentilles de focalisation, (8) aimant d'analyse à 90°, (9) aimants de déflection à 45°, (10) post pulsateur, (13) cible gazeuse, (14) extension de l'accélérateur 150 keV, (15) fosse à neutrons, (16) protection en béton, (17) électronique associée, (18) pupitre de commande de l'accélérateur 150 keV, (19) calculateur d'acquisition. Le pupitre de commande de l'accélérateur tandem n'est pas figuré.



a – CORPS DE CIBLE ET ASSEMBLAGE

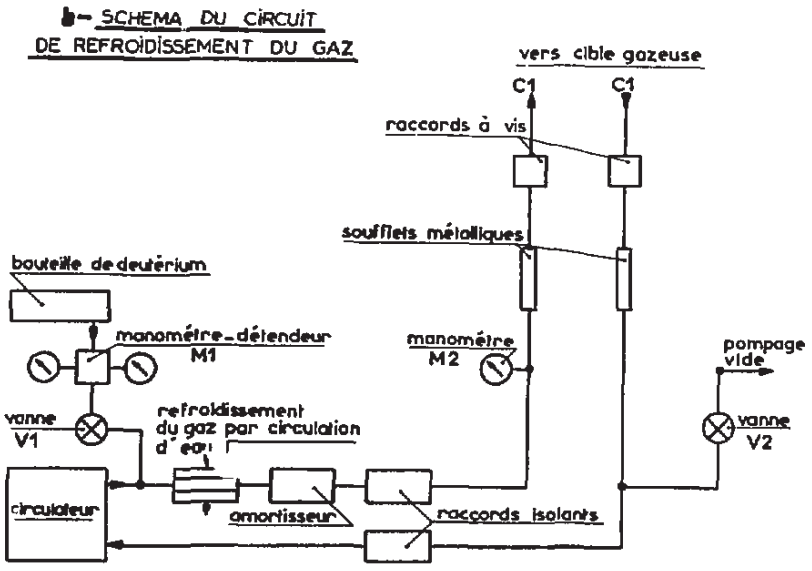


FIG. 4

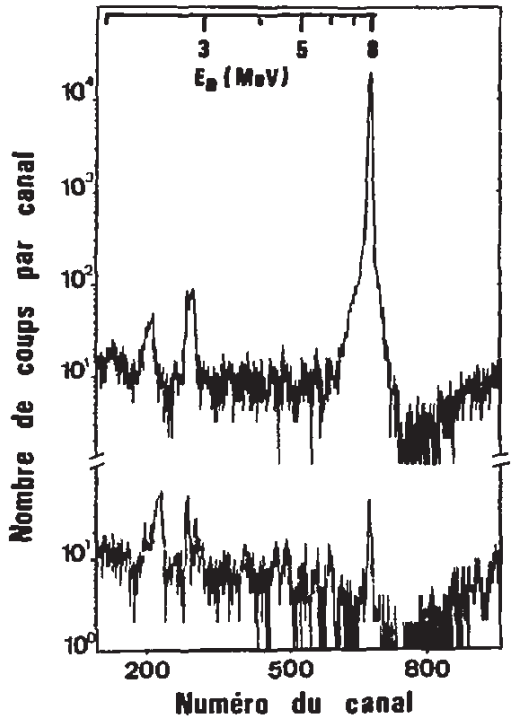

3
5
8
E_α (MeV)
10^4
10^3
10^2
10^1
10^1
10^0
Nombre de coups par canal
200
500
800
Numéro du canal

FIG. 5

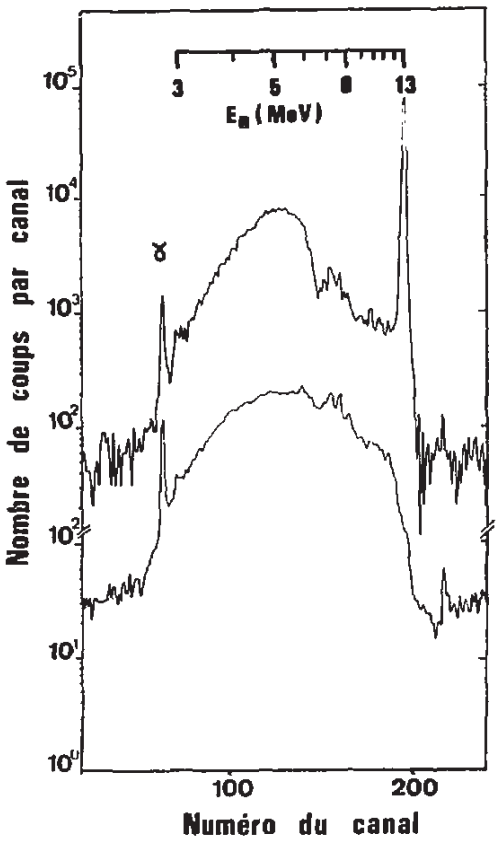
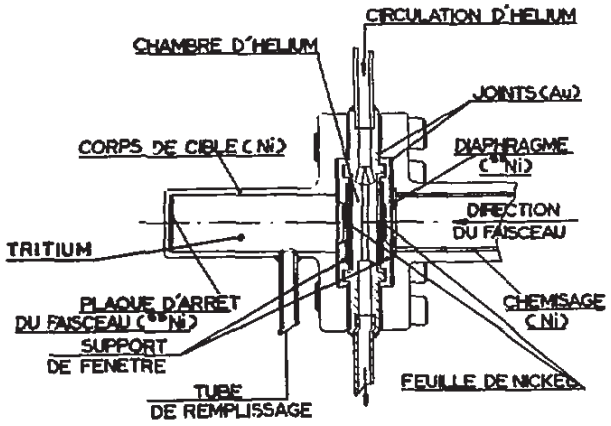
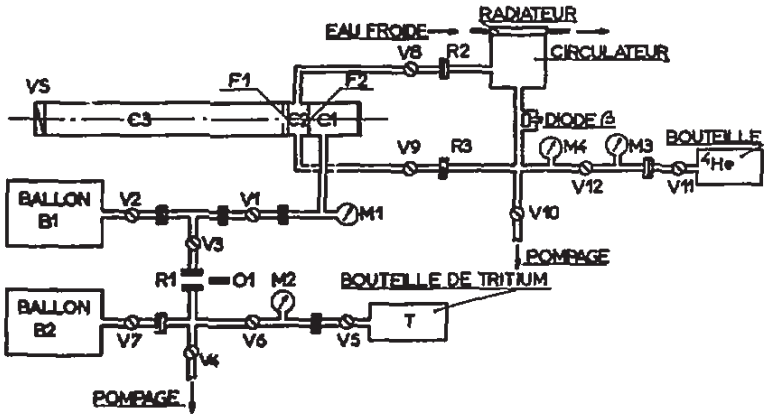

3
5
8
13
E_α (MeV)
10^5
10^4
10^3
10^2
10^2
10^1
10^0
α
Nombre de coups par canal
100
200
Numéro du canal

FIG. 6



a CORPS DE CIBLE ET ASSEMBLAGE



b CIRCUIT DE REMPLISSAGE DE TRITIUM
ET
SYSTEME DE CIRCULATION ET REFROIDISSEMENT
DE L'HELIUM

FIG. 7

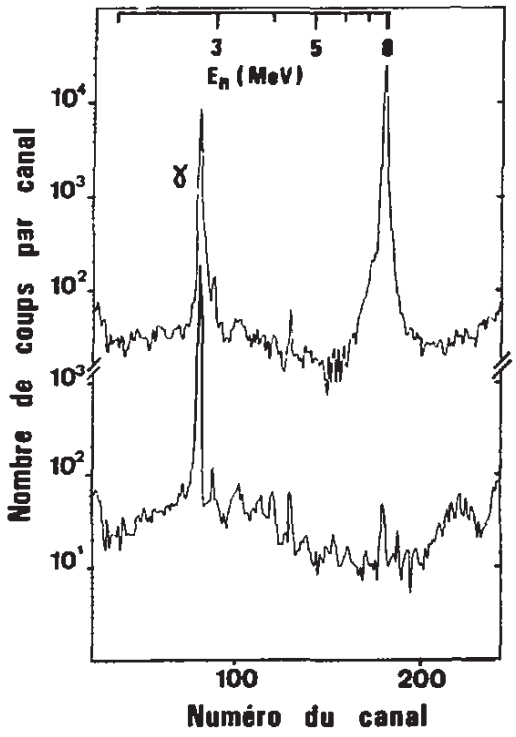

3
5
8
E_n (MeV)
γ
10^4
10^3
10^2
10^3
10^2
10^1
Nombre de coups par canal
100
200
Numéro du canal

FIG. 8

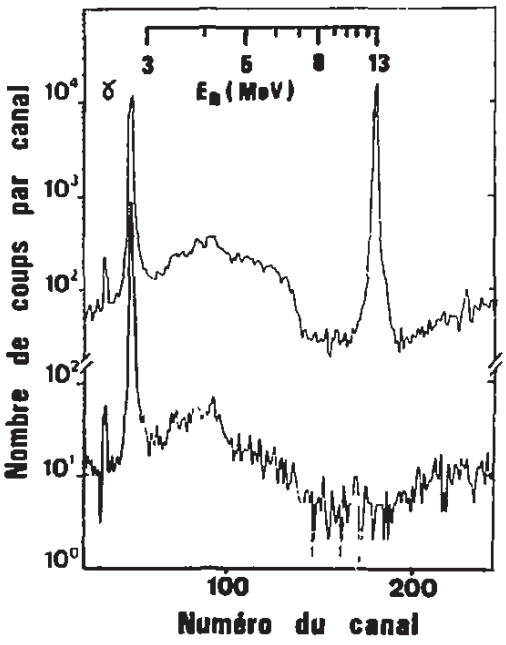

3
5
8
13
E_n (MeV)
γ
10^4
10^3
10^2
10^2
10^1
10^0
Nombre de coups par canal
100
200
Numéro du canal

FIG. 9

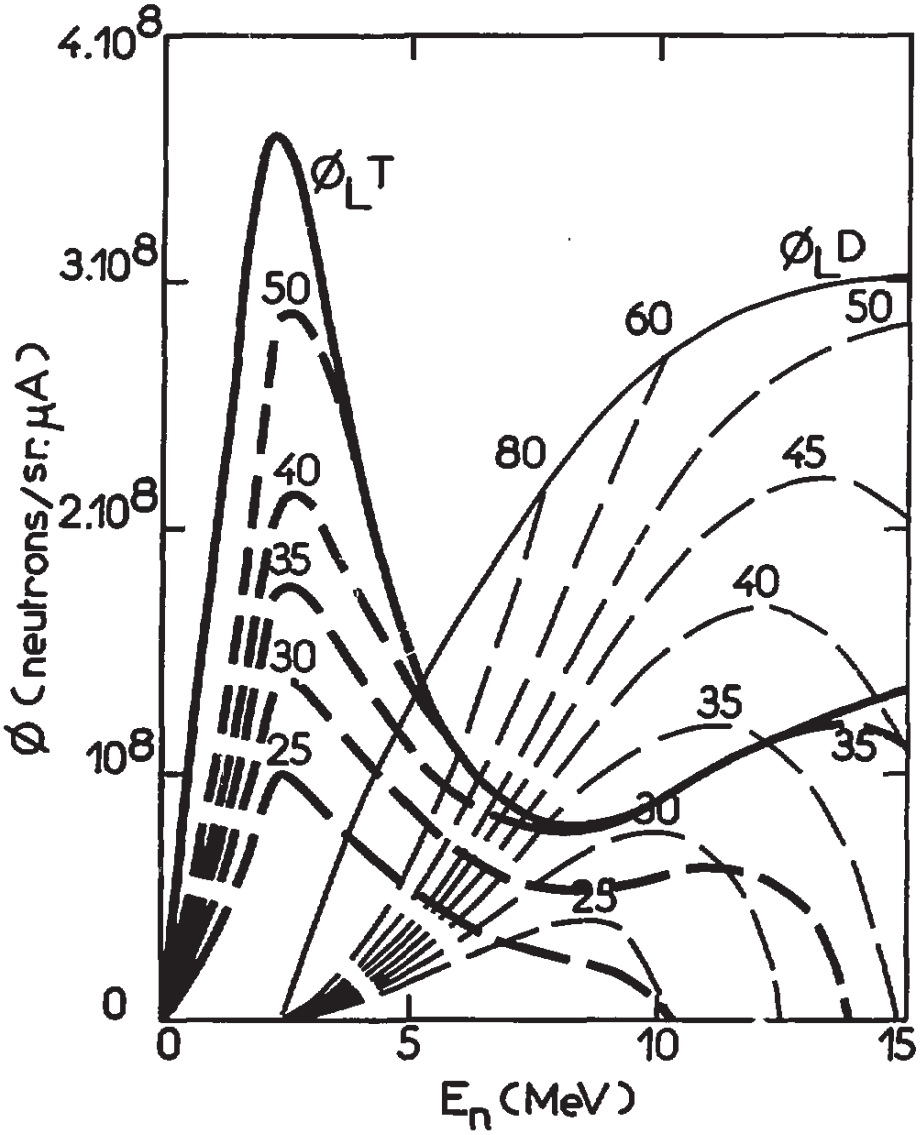

4.10^8
3.10^8
2.10^8
10^8
0
Ø (neutrons/sr.μA)
ØLT
ØLD
50
40
35
30
25
60
80
50
45
40
35
35
30
25
0
5
10
15
En (MeV)

FIG. 10

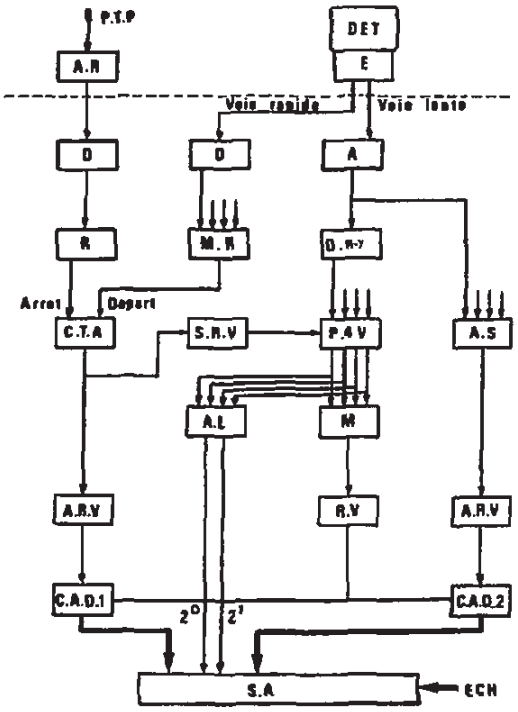


FIG. 11

P.T.P.	Prise temps pulsation
D.E.T.	Détecteur
A.R.	Amplificateur rapide
E	Embase du détecteur : préamplificateur : prise temps à fraction constante
D	Discriminateur rapide
A	Amplificateur linéaire
R	Retard variable (ns)
M.R.	Mélangeur rapide 4 voies
D. n-γ	Discriminateur n-γ
C.T.A.	Convertisseur temps-amplitude
S.R.V.	Sélecteur monocanal et retard
P.4.V.	Porte logique 4 voies
A.S.	Amplificateur sommateur
A.L.	Aiguilleur logique
M	Mélangeur logique 4 voies
A.R.V.	Amplificateur à retard variable
R.V.	Retard variable (µs)
C.A.D.	Convertisseur analogique-digital
S.A.	Système d'acquisition
E.C.H.	Echelle de comptage.

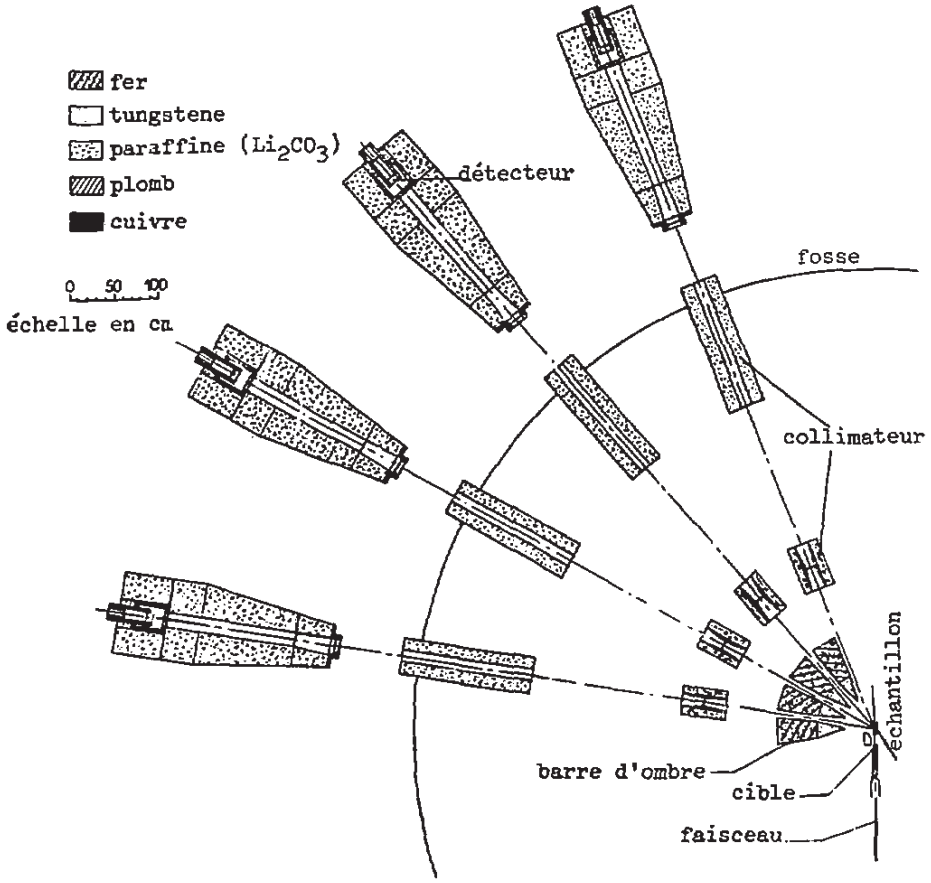

fer
tungstene
paraffine (Li_2CO_3)
plomb
cuivre
0 50 100
échelle en cm
détecteur
fosse
collimateur
échantillon
barre d'ombre
cible
faisceau

FIG. 12 *a*

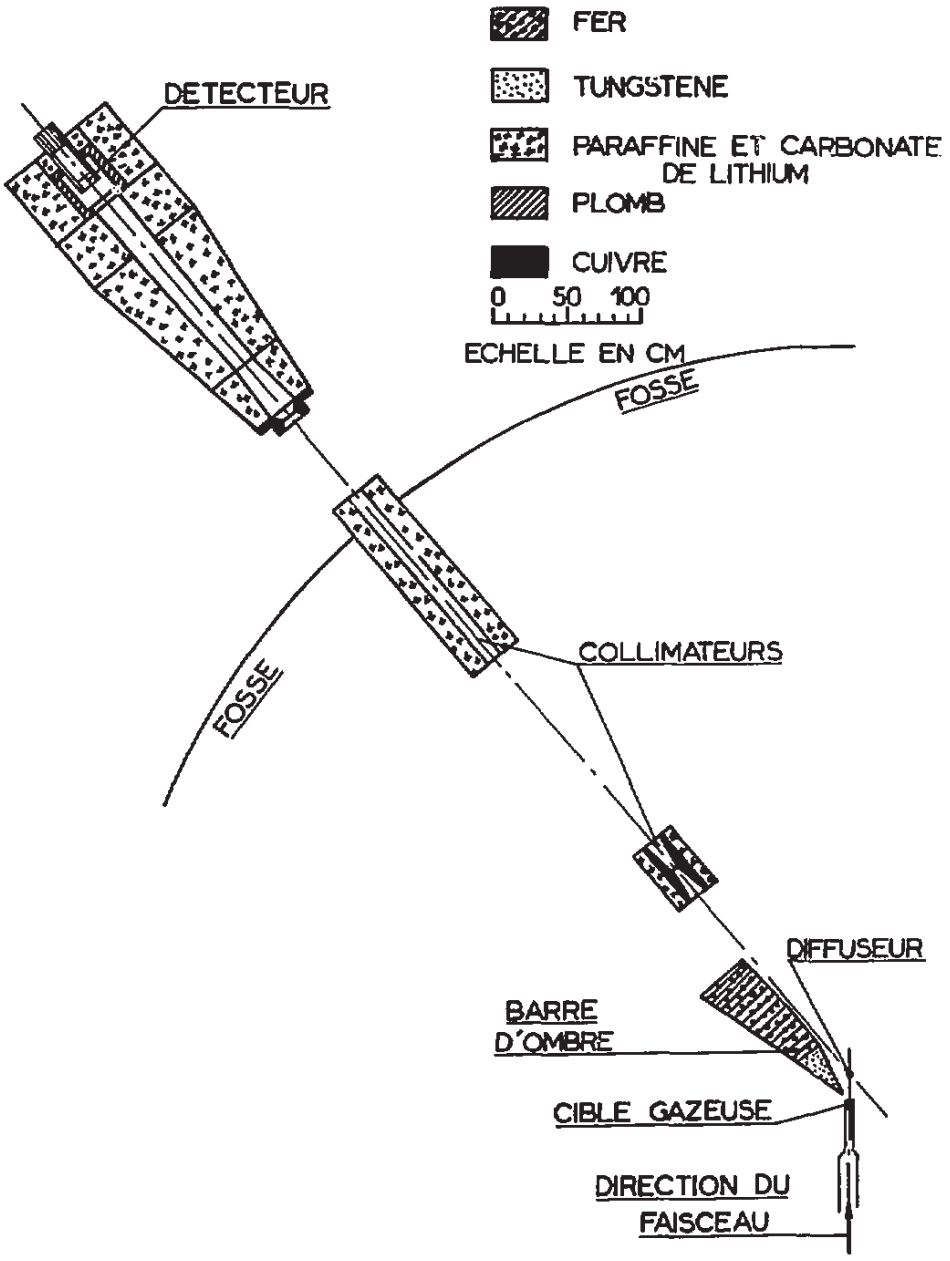
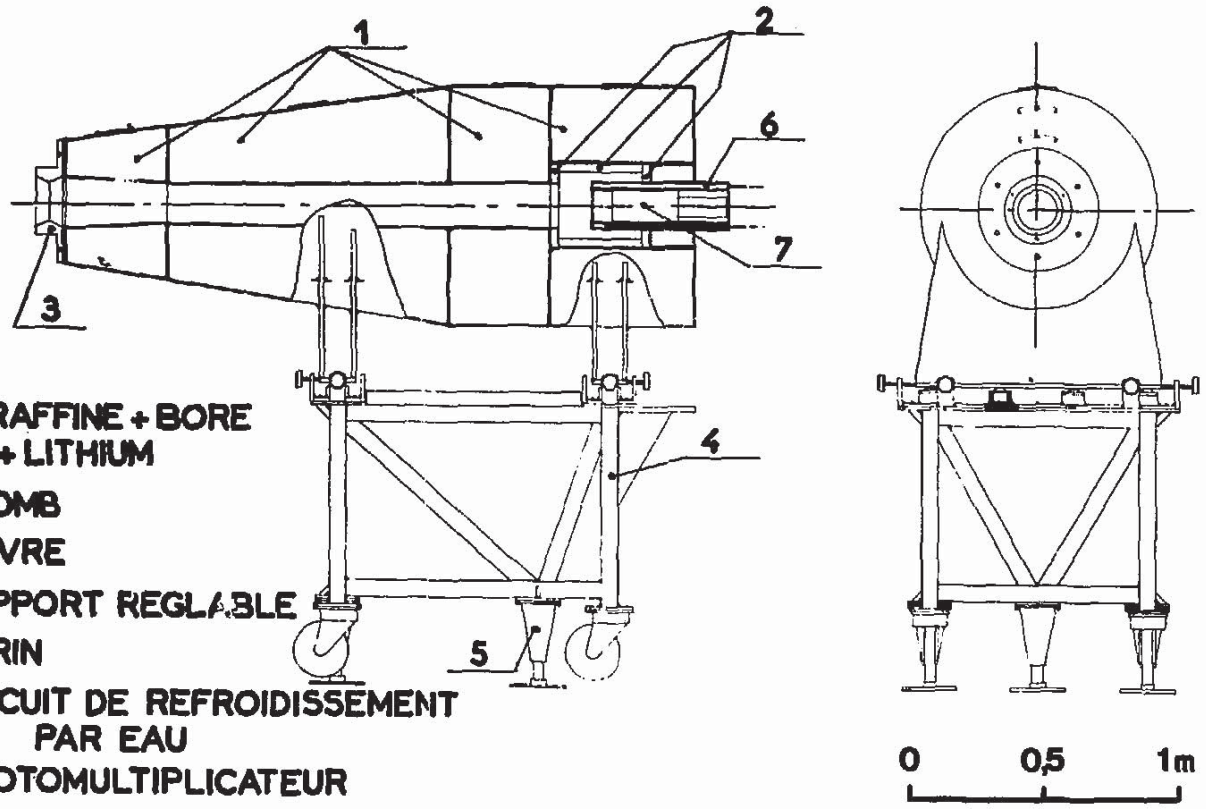

FER
TUNGSTENE
PARAFFINE ET CARBONATE DE LITHIUM
PLOMB
CUIVRE
0 50 100
ECHELLE EN CM
DETECTEUR
FOSSE
FOSSE
COLLIMATEURS
DIFFUSEUR
BARRE D'OMBRE
CIBLE GAZEUSE
DIRECTION DU FAISCEAU

FIG. 12 *b*



PROTECTION POUR DETECTEUR DE NEUTRONS

FIG. 13

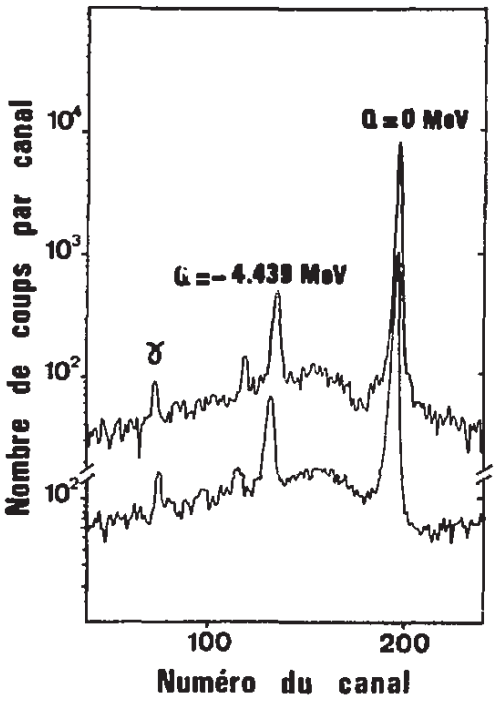

Q = 0 MeV
Q = – 4.439 MeV
γ
Nombre de coups par canal
Numéro du canal
100
200

FIG. 14

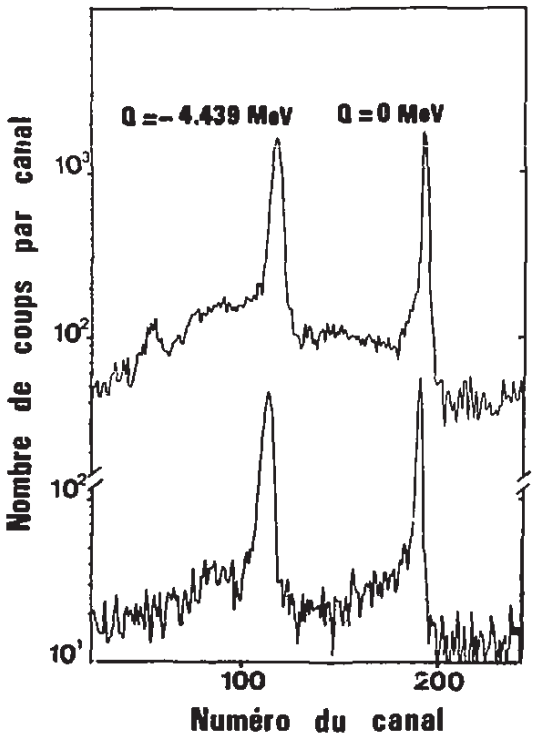

Q = – 4.439 MeV
Q = 0 MeV
Nombre de coups par canal
Numéro du canal
100
200

FIG. 15

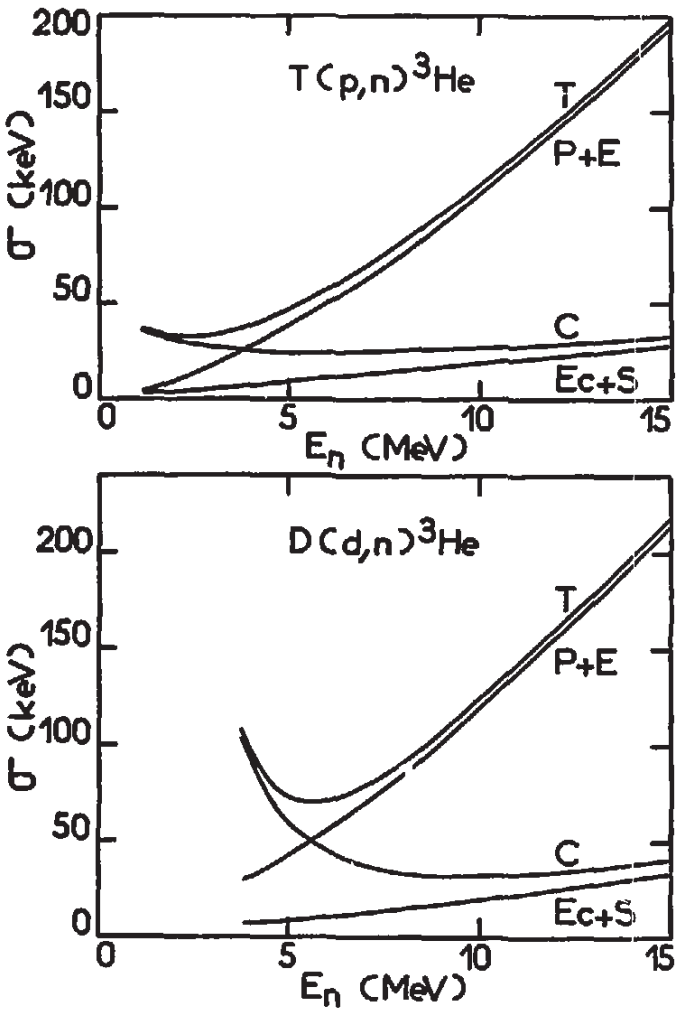

T(p,n)3He
T
P+E
C
Ec+S
σ (keV)
En (MeV)
D(d,n)3He
T
P+E
C
Ec+S
σ (keV)
En (MeV)

FIG. 16

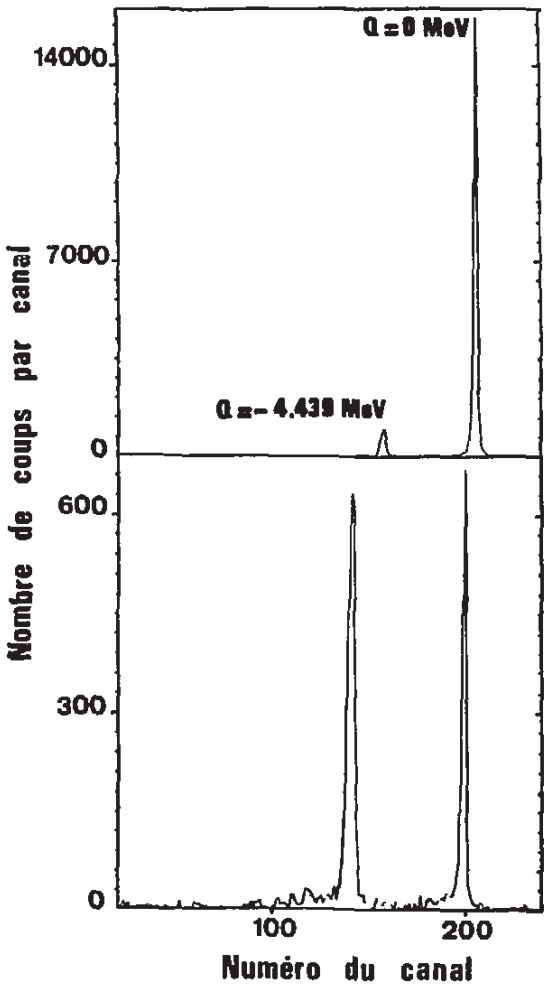

Q = 0 MeV
Q = - 4.439 MeV
Nombre de coups par canal
Numéro du canal

FIG. 17

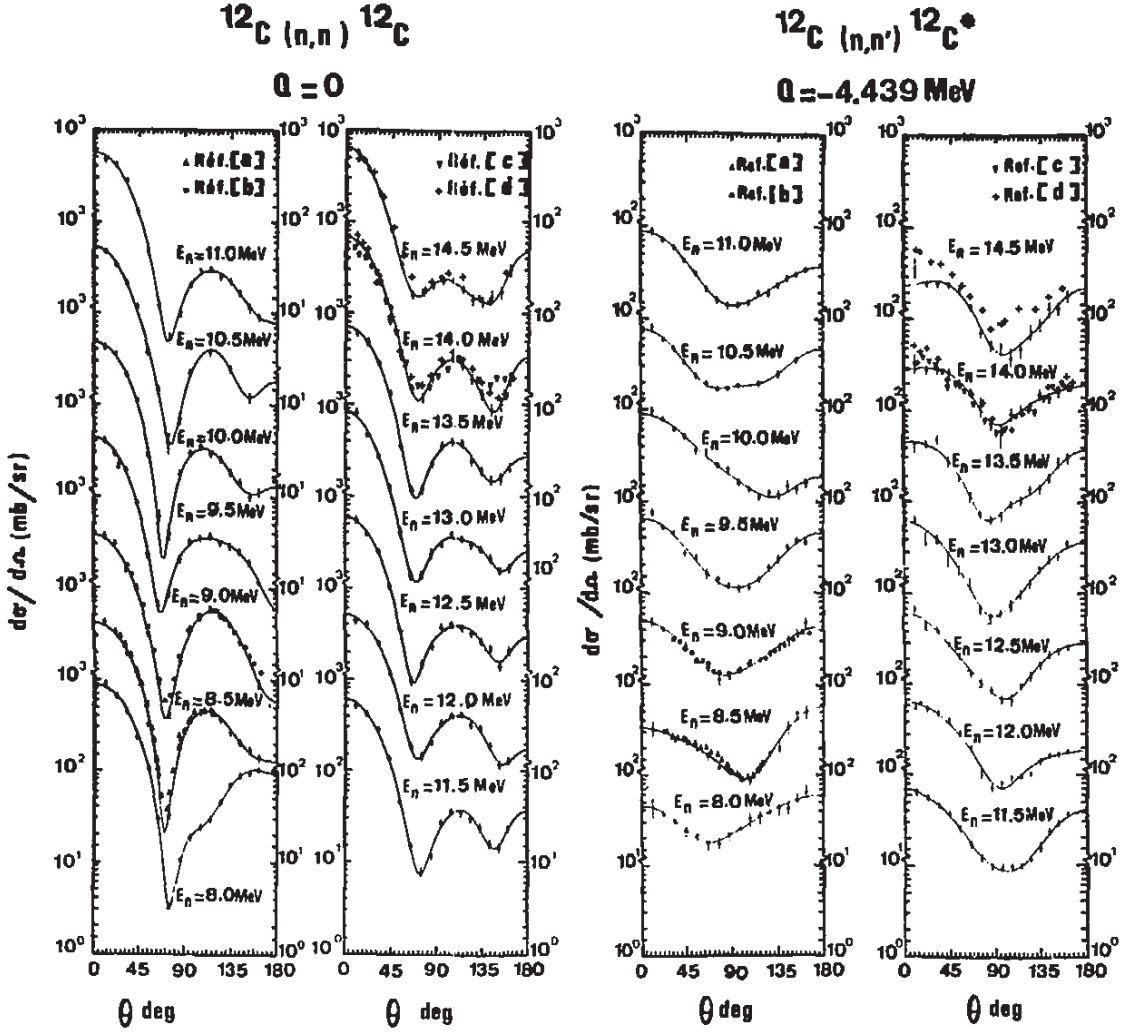

^{12}C (n,n) ^{12}C
Q = 0
^{12}C (n,n') $^{12}C^*$
Q = -4.439 MeV
dσ/dΩ (mb/sr)
θ deg
Ref.[a]
Ref.[b]
Ref.[c]
Ref.[d]
E_n=11.0MeV
E_n=10.5MeV
E_n=10.0MeV
E_n=9.5MeV
E_n=9.0MeV
E_n=8.5MeV
E_n=8.0MeV
E_n=14.5 MeV
E_n=14.0 MeV
E_n=13.5MeV
E_n=13.0 MeV
E_n=12.5 MeV
E_n=12.0 MeV
E_n=11.5 MeV

FIG. 18

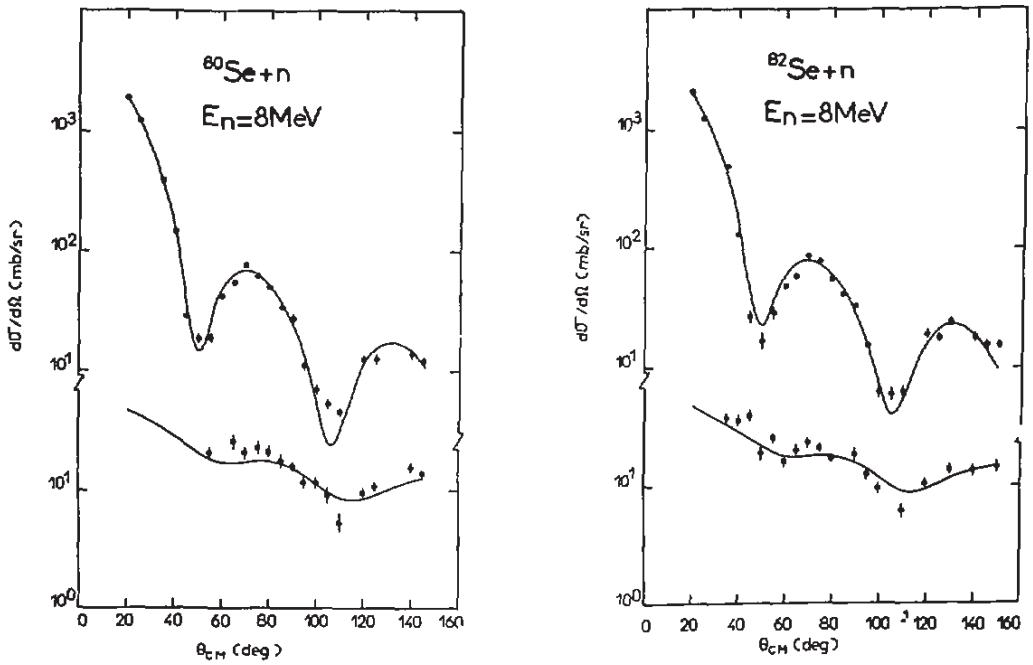

^{80}Se+n
E_n=8MeV
^{82}Se+n
E_n=8MeV
dσ/dΩ (mb/sr)
θ_{CM} (deg)

FIG. 19

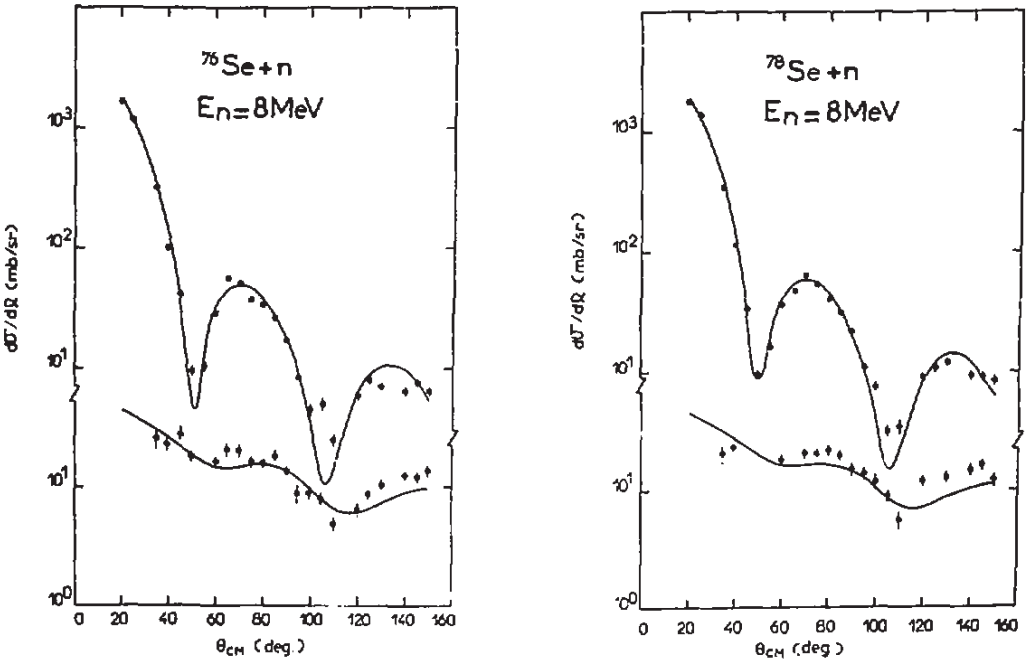

^{76}Se+n
E_n=8MeV
^{78}Se+n
E_n=8MeV
dσ/dΩ (mb/sr)
θ_{CM} (deg)

FIG. 20

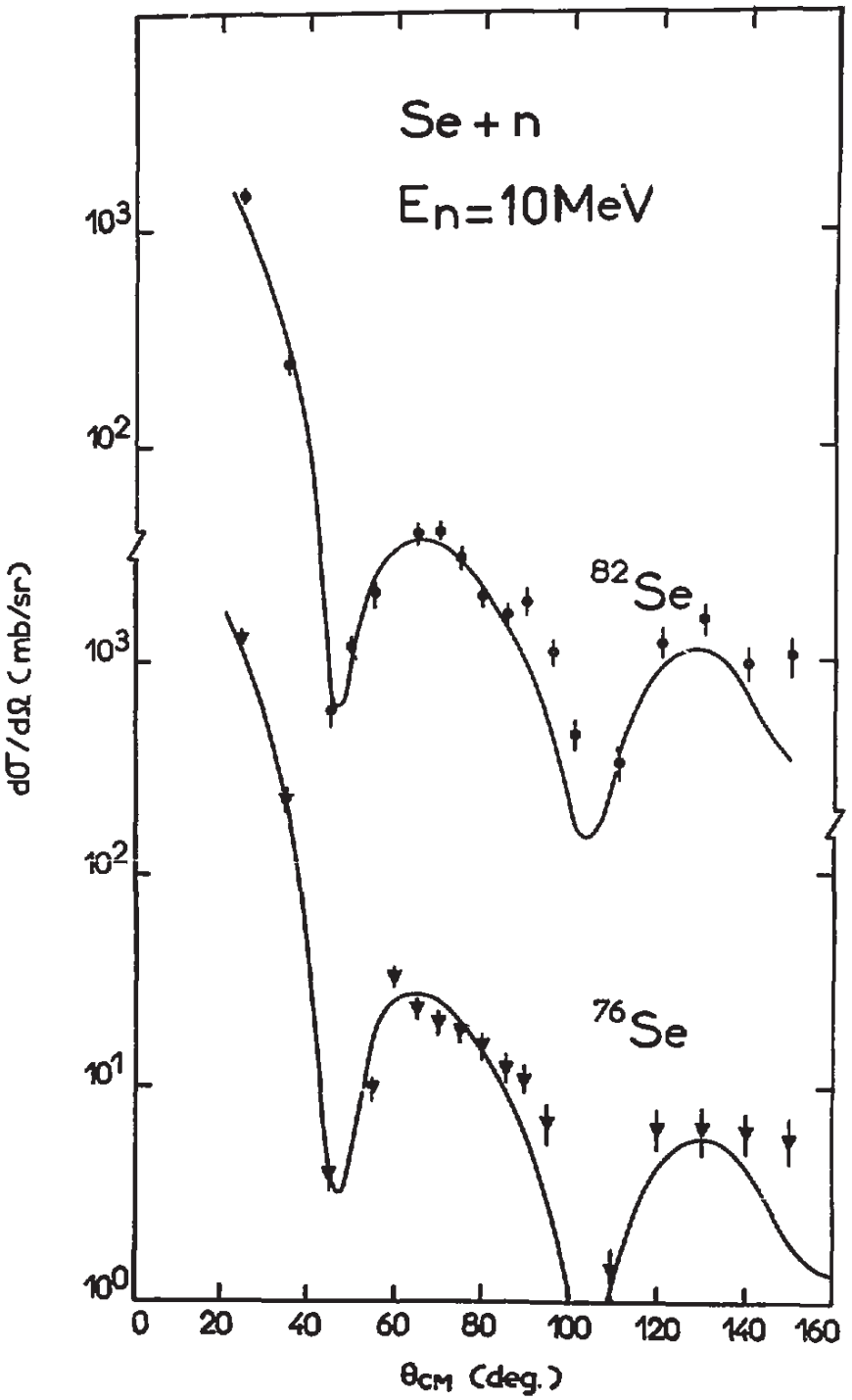

Se + n
En=10MeV
82Se
76Se
dσ/dΩ (mb/sr)
θCM (deg.)
10^3
10^2
10^1
10^0
0
20
40
60
80
100
120
140
160

FIG. 21

Achevé d'imprimer
par
le CEA, Service de Documentation, Saclay
Mai 1977

DEPOT LEGAL
2ème trimestre 1977

La diffusion, à titre d'échange, des rapports et bibliographies du Commissariat à l'Energie Atomique est assurée par le Service de Documentation, CEN-Saclay, B.P. n° 2, 91 190 - Gif-sur-Yvette (France).

Ces rapports et bibliographies sont également en vente à l'unité auprès de la Documentation Française, 31, quai Voltaire, 75007 - PARIS.

Reports and bibliographies of the Commissariat à l'Energie Atomique are available, on an exchange basis, from the Service de Documentation, CEN-Saclay, B.P. n° 2, 91 190 - Gif-sur-Yvette (France).

Individual reports and bibliographies are sold by the Documentation Française, 31, quai Voltaire, 75007 - PARIS.

Edité par
le Service de Documentation
Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay
Boîte Postale n° 2
91190 - Gif-sur-YVETTE (France)