

Zeitschrift: Helvetica Physica Acta
Band: 60 (1987)
Heft: 7

Artikel: Modélisation numérique et spectrométrie à neutrons rapides dans le programme LOTUS
Autor: Kumar, A. / Leo, W.R. / Schneeberger, J.P.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-115880>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 16.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Modélisation numérique et spectrométrie à neutrons rapides dans le programme LOTUS

Par A. Kumar, W. R. Leo et J. P. Schneeberger

Institut de Génie Atomique, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, CH-1015 Lausanne (Suisse)

Dédié à M. le Prof. B. Vittoz pour son 60^{ème} anniversaire

(16. VII. 1987)

Résumé. On rappelle quelques caractéristiques de l'installation LOTUS et du programme de recherche. L'analyse numérique d'un problème type est présentée, à partir d'un code déterministe de transport neutronique à deux dimensions et, parallèlement, par la méthode de Monte Carlo. On fait le point sur le développement de deux spectromètres à scintillateur liquide de petites dimensions, respectivement à protons et deutons de recul.

Introduction

L'installation de recherche LOTUS a été développée afin de permettre l'étude expérimentale de concepts de couvertures intéressant le développement de réacteurs de fusion (Tokamaks ou autres) ou de systèmes hybrides fusion–fission. De telles études nécessitent de disposer d'une source intense de neutrons ($D - T$), capable de générer des taux de réaction suffisants dans les éléments de la couverture: réactions de captures dans les isotopes Li-6 et Li-7 (régénération du tritium dans un réacteur de fusion), réactions de captures fertiles dans le thorium (génération d'U-233, combustible fissile par les neutrons thermiques), etc. La Fig. 1 montre la partie supérieure de l'installation avec l'ouverture de la cavité d'expérimentation, le blindage et le couvercle; sur la Fig. 2 on aperçoit, à gauche, le générateur Haefely (source de neutrons) et, à droite, la face frontale du module LBM (voir plus loin). Avec une source d'une intensité de $5 \times 10^{12} \text{ n/s}$, LOTUS est une des rares installations de par le monde permettant de réaliser de telles études.

Le tube-source est une des particularités de l'installation. A l'intérieur d'un tube scellé de 36 cm de diamètre et de 60 cm de longueur, les neutrons y sont produits en accélérant et focalisant des ions (D) et (T) sur une cible tritiée-deutérée, à dépôt de scandium (constructeur: E. Haefely, Bâle). Cette conception possède l'avantage évident de réduire fortement les problèmes de radio-protection liés à la diffusion du tritium, ce qui a été un élément important de décision dans la phase de projet de l'installation. En revanche, on a à faire à une structure assez complexe (bobines de focalisation, isolation HT , etc.), dont la modélisation numérique est pour le moins bi-voire tridimensionnelle. On voit

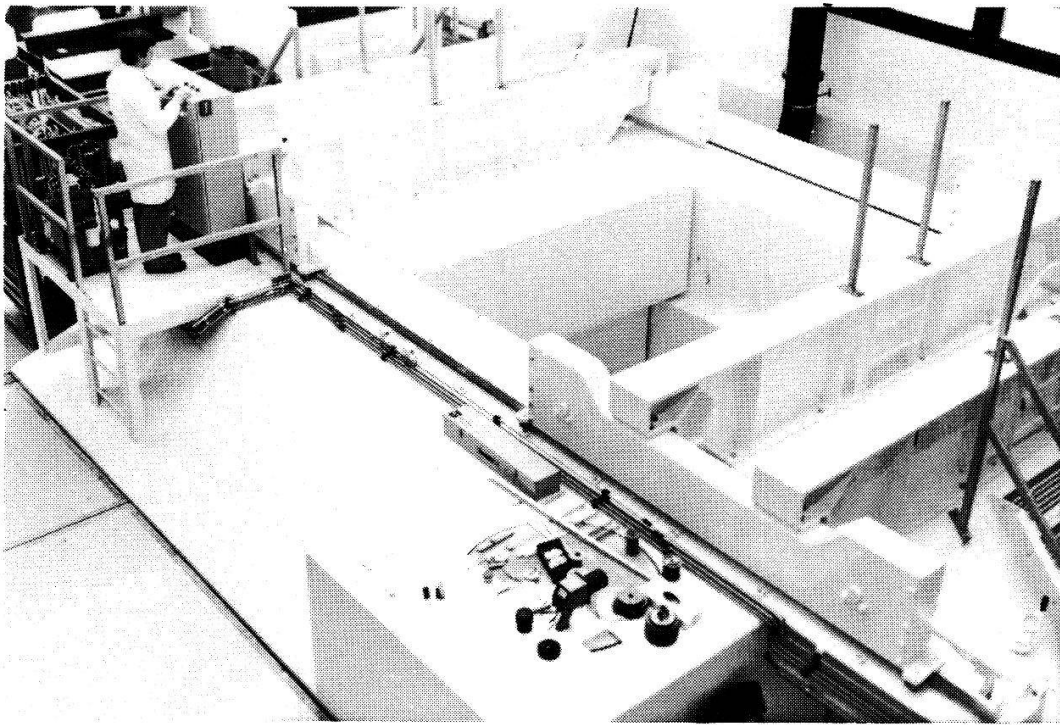


Figure 1
L'installation LOTUS – Ouverture de la cavité expérimentale.

déjà, par cet exemple, que le programme LOTUS implique un *support numérique et informatique important*. Les principaux codes utilisés actuellement sont DOT (2D, différences finies), TRISM (2D, éléments finis) et MCNP (3D, Monte-Carlo). Une modélisation typique à 2D d'une configuration expérimentale nécessite environ une heure de calcul sur le CRAY-1S de l'EPFL; un calcul de Monte-Carlo exige facilement plusieurs heures de calcul sur la même machine.

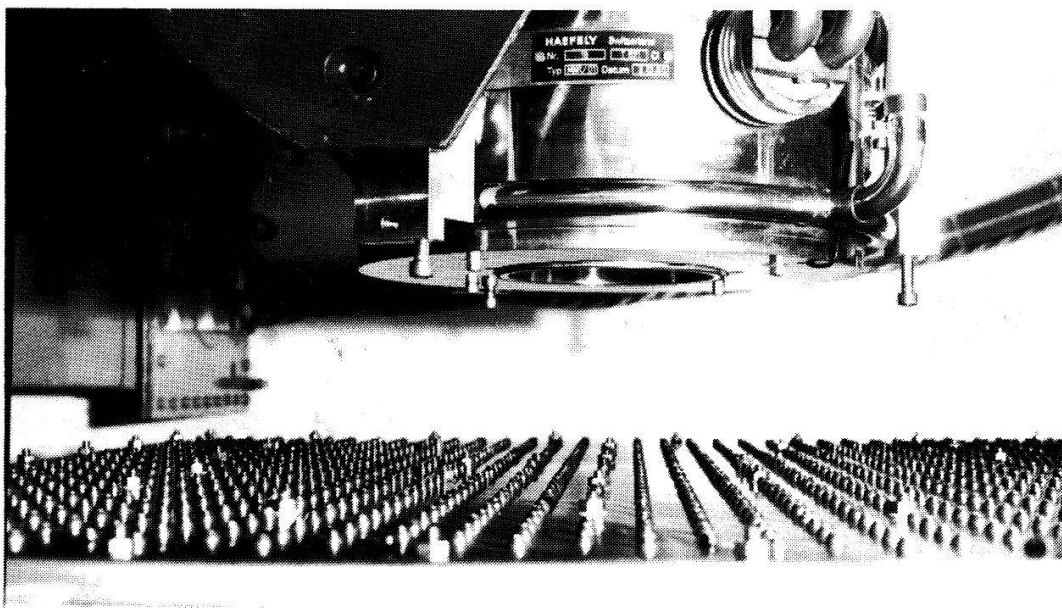


Figure 2
Tube-source de neutrons et module LBM.

Dans le domaine expérimental, s'agissant en l'occurrence d'*expériences intégrales de référence*, un soin tout particulier doit être voué à la qualité des mesures. Le spectre neutronique, notamment, est une grandeur essentielle, qui doit être déterminée avec précision, en l'occurrence dans le domaine des énergies 1–16 MeV. C'est ainsi qu'un effort important de recherche et de développement a été consacré à ce sujet, l'objectif étant de mettre au point un spectromètre à scintillateur liquide de *petites dimensions*, susceptible d'être inséré à l'intérieur même des éléments de couverture. Les deux spectromètres étudiés, respectivement à protons et deutons de recul, sont décrits ci-après.

Les études proprement dites de couverture réalisées jusqu'ici depuis la mise en service de LOTUS (1984), ne font pas l'objet de cette présentation. On pourra consulter les Réfs. [1], [2] et [3]; mentionnons brièvement les deux études suivantes:

(a) *Couverture de fusion* (module LBM)

Il s'agit ici d'un module (Lithium Blanket Module) développé par le Laboratoire de Physique des Plasmas de l'Université de Princeton (PPPL) pour le Tokamak TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor) de Princeton. Il est destiné à tester le comportement neutronique et les performances régénératrices (production de Tritium) d'une couverture d'oxyde de Lithium; il se compose de 900 barreaux de pastilles frittées de Li_2O dans une gaine d'acier inoxydable. Le programme de recherche, réalisé en collaboration avec PPPL, s'est étendu d'octobre 1985 à décembre 1986.

(b) *Couverture hybride à barreaux de Thorium* (ThO_2)

La couverture relative à ce projet a trait plus particulièrement aux systèmes nucléaires hybrides fusion–fission, dans lesquels les couvertures peuvent être aménagées, soit pour produire du combustible fissile, soit pour améliorer le bilan d'énergie d'un réacteur de fusion. Dans ce concept de couverture, le Thorium présente un intérêt tout spécial car il permet d'obtenir un optimum du point de vue de la génération de combustible fissile, tout en réduisant très fortement le nombre d'évènements de fission (concept à "fissions supprimées"). Le Thorium de la couverture (1700 barreaux) a pu être obtenu en prêt grâce à un accord de collaboration avec le Centre Nucléaire de Bhabha, en Inde.

Modélisation numérique à deux et trois dimensions

Fondamentalement, la modélisation des expériences de couverture dans l'installation LOTUS nécessite une approche tri-dimensionnelle en raison, notamment, de la forme parallélépipédique de la cavité expérimentale. L'étude de l'effet des neutrons rétrodiffusés par les parois de la cavité, l'analyse de la génération de tritium dans les deux isotopes Li-6 et Li-7 , sont deux exemples, parmi d'autres, nécessitant une modélisation 3D.

Dans d'autres problèmes, l'approche 3D est utilisée d'une manière

complémentaire au traitement 2D, par exemple lorsque le degré d'approximation numérique que l'on peut atteindre n'est pas suffisant. Cela peut être le cas lorsque la distance entre la source de neutrons et le détecteur est grande, ce qui nécessite en général de considérer un grand nombre de directions de propagation des neutrons (discrétisation de l'angle de propagation en segments, méthode S_N). Pour des raisons pratiques, liées à l'ordinateur, on ne peut pas, cependant, introduire une discrétisation trop poussée, beaucoup plus grande que S_{16} par exemple, même sur un CRAY-1S, tel que celui de l'EPFL.

Nous avons choisi, dans ce qui suit, deux cas typiques rencontrés dans l'analyse de nos expériences pour illustrer ce problème (appelé également "effet de raies"). Dans le premier cas, le détecteur (spectromètre à scintillateur NE213) se trouve à 60 cm du tube-source, sur l'axe de celui-ci, dans la cavité vide. Dans le second cas, une plaque de plomb de 15 cm d'épaisseur est placée entre le tube-source et le détecteur, ce dernier étant à 10 cm de la plaque (Fig. 3). Les calculs ont été effectués au-moyen des deux codes suivants:

- MCNP, code 3D, de type Monte-Carlo, [4].
- DOT3.5, code déterministe 2D, discrétisation d'angle selon la méthode S_N , [5].

Donnons quelques brèves indications sur le déroulement des événements (ou histoires) dans MCNP, [4], [6].

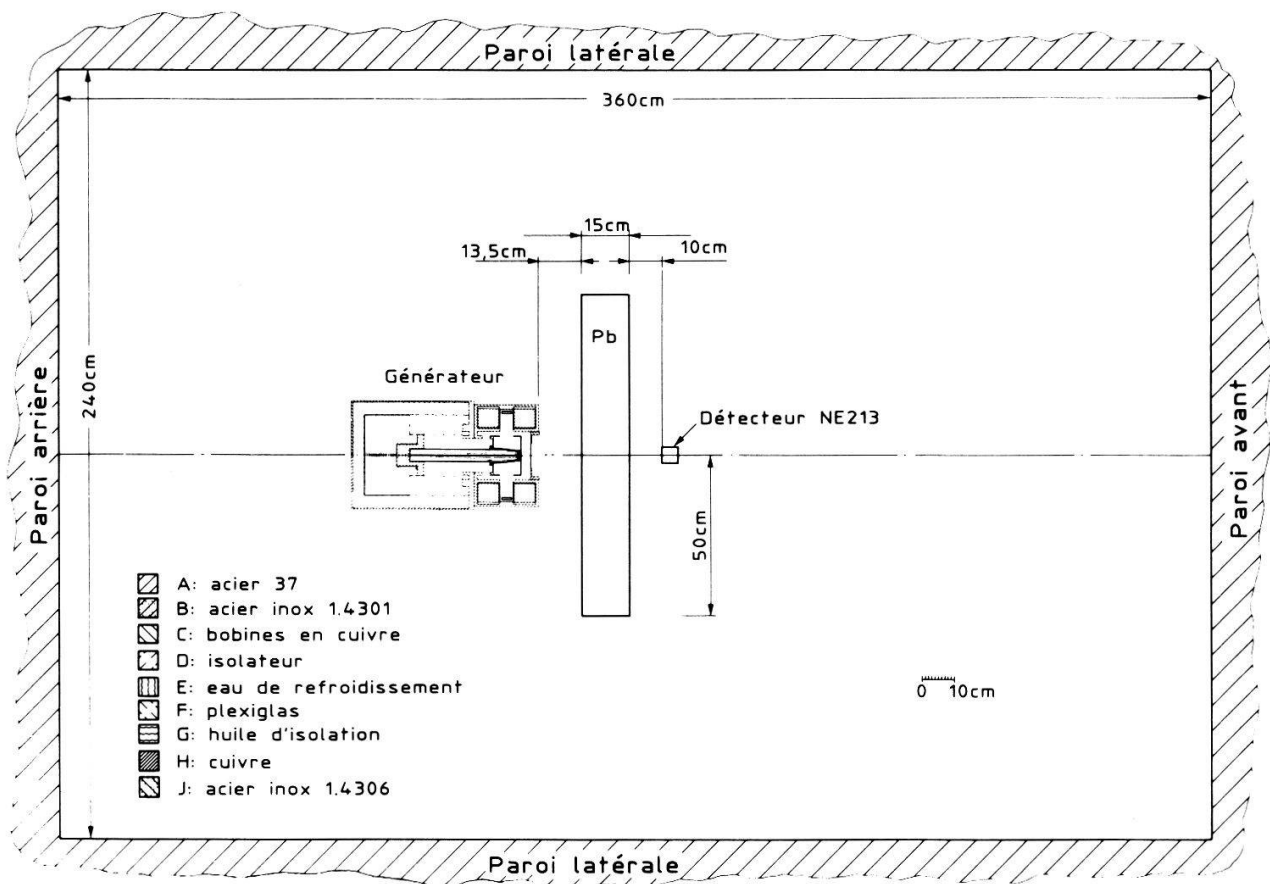


Figure 3

Schéma de l'arrangement expérimental avec le générateur (tube-source), une plaque de plomb (Pb) et le spectromètre NE213.

(a) Le point de génération, sur la surface de la cible (légèrement conique, Fig. 3), des neutrons à suivre, est obtenu à partir d'une distribution de probabilité tenant compte du profil de répartition (gaussien) de l'intensité du faisceau incident, selon l'axe de la cible; (b) l'énergie d'ion (composition du faisceau: D_2^+ , D^+ , DT^+ , T_2^+ , T^+) est déterminée en échantillonnant la distribution de probabilité d'émission de neutrons en fonction de l'énergie d'ion; on considère l'effet de ralentissement dans la cible; (c) l'angle d'émission des neutrons est déterminé à partir de tables de distribution angulaire en fonction de l'énergie; on échantillonne uniformément entre 0 et 2π pour l'angle azimutal. Ces deux angles fournissent le cosinus directeur de la direction de propagation des neutrons. La caractérisation des neutrons de source étant ainsi achevée, MCNP considère, dans la phase suivante, les différents événements susceptibles de se produire:

- *1^{ère} collision dans le générateur.* La collision peut être une capture, un choc élastique ou inélastique. Dans le premier cas, l'histoire du neutron s'achève et l'on en génère un nouveau. Si le choc est élastique, on échantillonne l'énergie et le cosinus directeur du neutron diffusé, en respectant la cinématique du choc. Dans le cas inélastique, on examine s'il est du type (n, n') , $(n, 2n)$ ou $(n, 3n)$, puis les caractéristiques du ou des neutrons secondaires sont déterminées; chacun de ces neutrons secondaires est alors suivi à son tour.
- *1^{ère} collision en dehors du générateur.* La collision peut avoir lieu dans les parois de la cavité, ou dans le détecteur (cavité vide). Les parois de la cavité de LOTUS ont une épaisseur de 2,2m, ce qui pourrait nécessiter de suivre les neutrons pendant des temps relativement longs, avant qu'ils ne soient capturés ou rétrodiffusés vers la cavité. Afin de limiter le temps CPU, on utilise une technique de réduction de variance, dite de "roulette russe": au-delà d'une profondeur de pénétration de 50 cm, les neutrons ayant franchi cette limite ne sont plus tous suivis; ceux qui le sont encore, sont alors affectés d'une importance plus grande, compatible avec la conservation du poids statistique global.

Résultats

Cas 1: cavité vide, détecteur loin de la source. Les résultats sont reportés sur la Fig. 4, qui donne le spectre à 60 cm du générateur, dans le domaine 1–15 MeV. On constate qu'il y a bon accord entre MCNP et les valeurs mesurées (spectromètre NE213), alors que DOT3.5 donne des valeurs systématiquement plus faibles dans le domaine inférieur des énergies. Cela s'explique par l'effet de raies mentionné plus haut: il aurait fallu considérer un nombre beaucoup plus grand de directions pour "transporter" suffisamment bien les neutrons diffusés dans le générateur jusqu'au détecteur. Comme, cependant, l'approximation utilisée (S_{16}) correspond déjà à 1 million de mots de mémoire centrale du CRAY-1S, on voit que l'approche DOT3.5 ne convient pas dans ce cas.

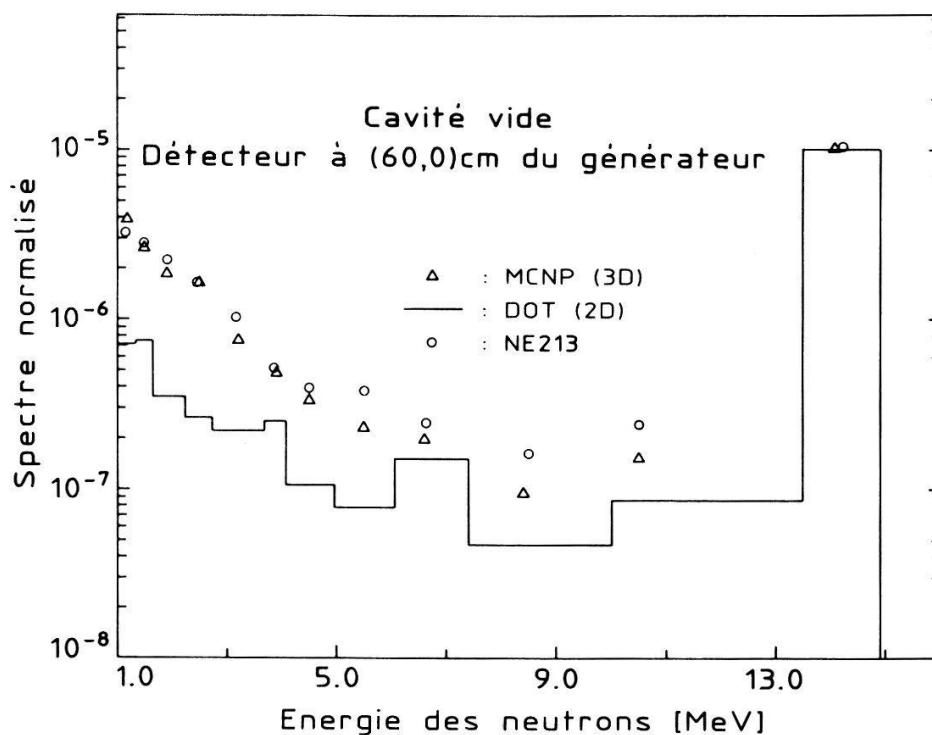


Figure 4
Spectre neutronique dans le cas de la cavité vide. Détecteur à 60 cm.

Temps CPU approximatifs:

- MCNP; 30 mailles spatiales; 60 mailles (E); statistique 1,5 million d'évènements: 4 h,
- DOT 3.5; 32 000 mailles spatiales; 18 mailles (E); 160 mailles angulaires: 40 minutes.

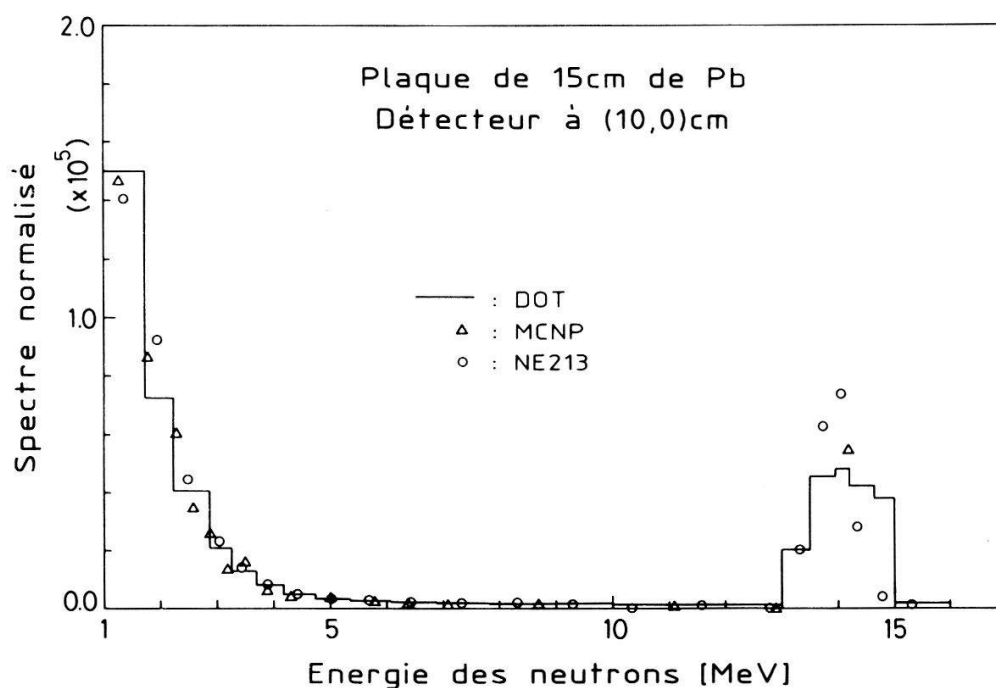


Figure 5
Spectre neutronique derrière la plaque de plomb.

Cas 2: Plaque de plomb entre le générateur et le détecteur; détecteur près de la plaque. Comme le montre la Fig. 5, il y a bon accord entre DOT, MCNP et les valeurs mesurées. L'effet de raies paraît être négligeable; on peut l'expliquer en observant que, dans ce cas, la source "vue" par le détecteur est essentiellement formée par la plaque de plomb, située à faible distance.

Spectrométrie à neutrons rapides

Comme on l'a indiqué plus haut, notre objectif dans ce domaine était de développer un spectromètre de petites dimensions, susceptible d'être monté à l'intérieur des couvertures et capable de supporter un flux relativement élevé. La méthode des protons de recul était tout indiquée, elle a fait l'objet de développements de la part de plusieurs groupes [7]; on l'appelle "NE213" d'après le nom du scintillateur liquide le plus utilisé.

Dans cette méthode, le spectre des neutrons incidents est déterminé à partir du spectre de protons de recul provenant de la diffusion élastique ($n - p$) dans le scintillateur. Pour arriver à ce résultat, il est nécessaire de déconvoluer le spectre des protons. En fait, il est bien connu que, pour une énergie de neutron donnée, E_0 , les énergies des protons de recul sont distribuées à peu près uniformément entre 0 et E_0 , ceci en raison de la diffusion (n, p) presque isotrope, à des énergies de 14 MeV et moins. La *fonction de réponse* attendue présente donc une forme à peu près rectangulaire. Cependant, les effets liés à la géométrie du détecteur, tels que la diffusion multiple ou la perte de protons, causent des distorsions importantes à cette forme. Il est donc nécessaire de bien connaître cette fonction de réponse, dans tout le domaine des énergies.

Un avantage du NE213 réside dans sa capacité de différencier les neutrons des gammas, par la méthode de la discrimination de forme. Les pouvoirs d'ionisation différents des protons de recul et des électrons Compton provoquent, en effet, des transitions radiatives dans le scintillateur qui causent une différence dans le temps de décroissance de la scintillation. En mesurant ce temps pour chaque impulsion issue du détecteur, on peut ainsi discriminer les différents types de particules. Cette propriété est très importante pour éliminer le bruit de fond des gammas.

Nous nous sommes concentrés sur le développement de minispectromètres comportant une cellule de forme cylindrique de 1,3 cm de diamètre et de 1,3 cm de hauteur (spectromètre "standard": environ 5 cm \times 5 cm). Ces dimensions sont limitées par la portée de 3 mm environ des protons à 14 MeV dans le scintillateur. Avec des cellules plus petites, le nombre de protons s'échappant de celles-ci augmente, ce qui provoque des distorsions dans la fonction de réponse. Le photomultiplicateur associé à cette cellule (R-1213 de 19 mm de diamètre fabriqué par Hamamatsu), avec son diviseur, a pu être logé dans un tube de 25 mm de diamètre.

La capacité de différencier les gammas des neutrons constitue un test critique. Nous avons mesuré cette propriété en utilisant la technique de

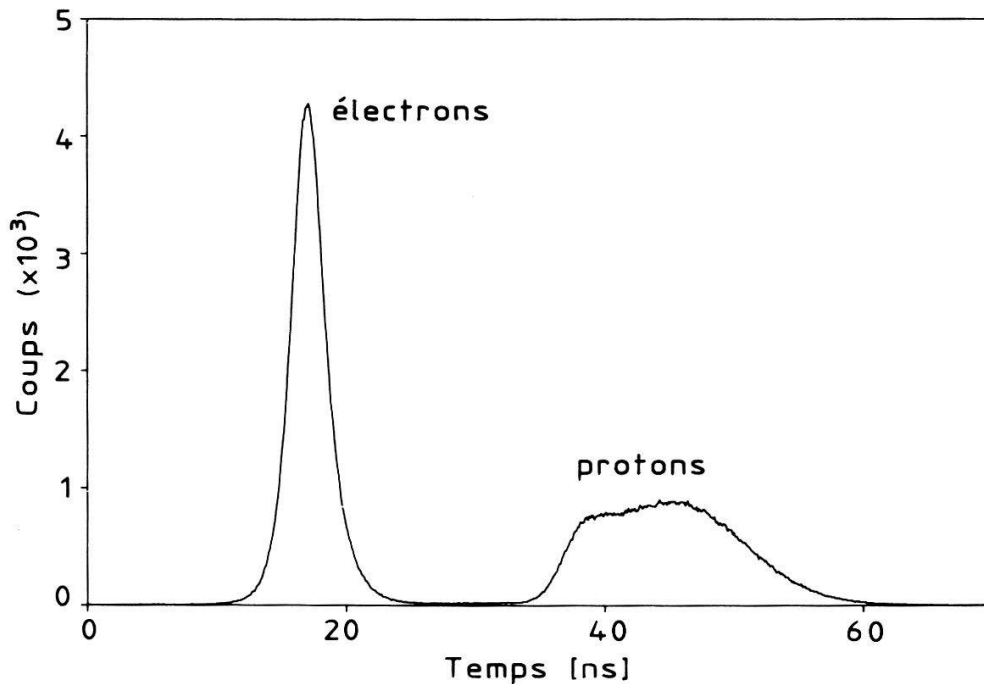


Figure 6
Discrimination gammas-neutrons (source Pu/Be). Mini-spectromètre NE213.

“zero-crossing”, avec une source de neutrons Pu/Be. Sur la Fig. 6, on a représenté un spectre temporel, pour un seuil de 0.15 MeV (énergie d’électron). On constate une très bonne discrimination entre les électrons Compton (gammas) et les protons de recul (neutrons). Ces résultats sont, en fait, meilleurs que ceux normalement obtenus avec un spectromètre “standard” (5 cm × 5 cm) (voir par exemple Réf. [8]), probablement en raison des petites dimensions du PM (diminution de la dispersion et de la différence du temps de transit).

Pour la déconvolution des spectres, nous avons calculé les fonctions de réponse en utilisant un code Monte-Carlo (05S), simulant les interactions dans la cellule. Ceci a été fait pour 81 énergies entre 0.2 et 21 MeV. Afin de contrôler ces calculs, nous avons aussi mesuré ces fonctions, à quelques énergies (14.3, 9.7 et 7 MeV), en utilisant un faisceau de neutrons au SIN, développé dans ce but [9]. L’analyse de ces données est encore en cours, mais les résultats préliminaires semblent bien concorder avec ceux du programme Monte-Carlo.

La Fig. 7 montre un spectre mesuré à l’intérieur du “Lithium Blanket Module”, à une intensité de source relativement faible, de 10^{11} n/s. Il devrait être possible d’augmenter cette valeur d’un facteur de 5 à 6 en améliorant encore l’électronique, limitée actuellement à un taux de comptage de 30 K cps environ.

Parallèlement au développement du mini-NE213, nous étudions un autre spectromètre, basé sur la diffusion élastique ($n-d$) dans des scintillateurs deutérés, tels que le NE230 [7]. Ceux-ci diffèrent du NE213 simplement par le fait que l’hydrogène est remplacé par du deutérium. Cette idée a déjà été utilisée dans quelques expériences de physique fondamentale, mais n’a pas été appliquée, jusqu’à maintenant, à la fusion.

L’utilisation de deutons a deux avantages:

- (1) grâce à la portée plus petite du deuton (env. 1 mm à 12 MeV, énergie maximale d’un deuton de recul provenant d’une diffusion avec un

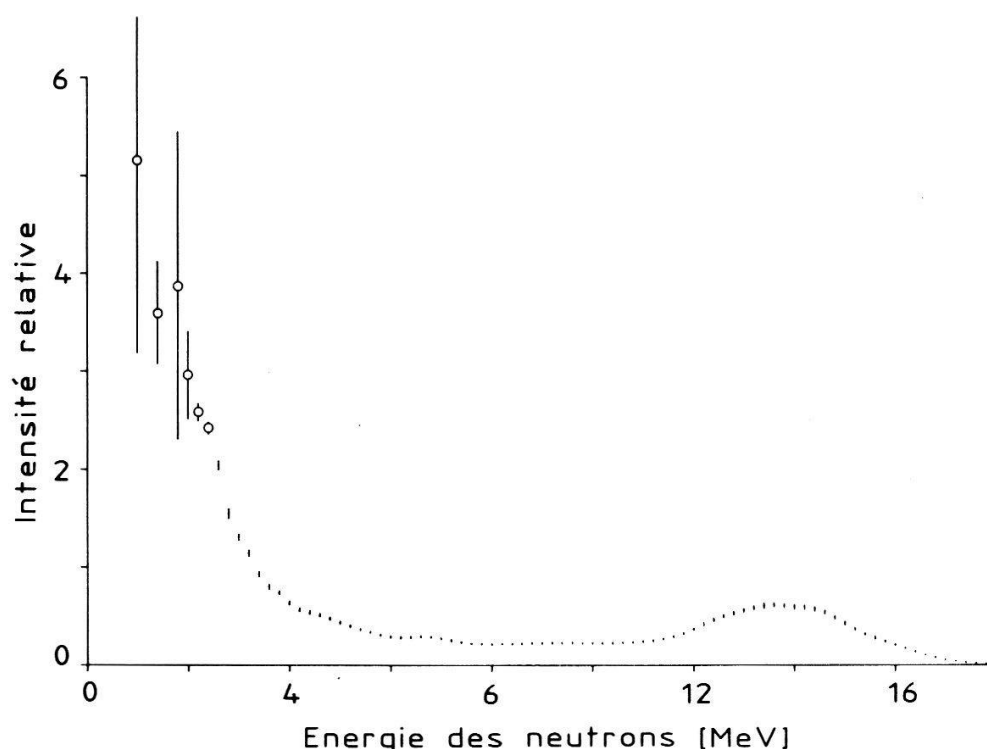


Figure 7
Spectre typique à l'intérieur du module LBM. Mini-spectromètre NE213.

neutron de 14 MeV), le volume du détecteur peut être encore réduit, ce qui permet donc de l'utiliser à plus haut flux.

- (2) la section efficace différentielle de diffusion ($n - d$) est plus petite que pour les protons et présente une forme pointue aux petits et grands angles; il en résulte une fonction de réponse qui n'est plus plate, mais dont les valeurs à basse et haute énergie sont également plus élevées. La déconvolution des spectres devrait en être améliorée, en évitant certaines difficultés rencontrées avec le NE213 (oscillations et valeurs négatives).

Le NE230 présente, cependant, un pouvoir de discrimination inférieur à celui du NE213, ce qui limite les énergies mesurables à des valeurs supérieures à env. 2–3 MeV. De plus, il faut tenir compte des réactions inélastiques dans lesquelles le deuton est dissocié en neutron et proton. Selon Pauletta [10], la technique de "zero-crossing" ne permet pas de discriminer entre deutons et protons; nous étudions actuellement une autre méthode, procédant par intégration de charge [11].

REFERENCES

- [1] "Lithium blanket module program at the LOTUS neutron source facility". Proceedings of the "Seventh topical meeting on the technology of fusion energy" (Reno, Nevada, June 15–19, 1986). Contributions by EPFL, PPPL, EIR.
- [2] A. KUMAR, S. AZAM, P. A. HALDY, W. R. LEO, D. V. S. RAMAKRISHNA (BARC, Inde), C. SAHRAOUI, J. P. SCHNEEBERGER and G. L. WOODRUFF, (Univ. Washington, USA): Progress report on the "LOTUS" fusion blanket experimental program. Présenté à la "4ème Conf. Intern. sur les systèmes nucléaires avancés", Madrid, 30 juin-4 juillet 1986 (rapport interne LPR 142, 1986).

- [3] "LOTUS Blanket Experimental Program", Triennial research report, Laboratory of reactor physics, EPFL, February 1987.
- [4] J. F. BRIESMEISTER, editor, "MCNP – A General Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport, version 3A", Los Alamos National Laboratory, report LA-7396-M, Rev. 2 (September 1986).
- [5] W. A. RHOADES et F. R. MYNATT, "The DOT-III: Two Dimensional Discrete Ordinates code", Oak Ridge National Laboratory TM-4280 (1979).
- [6] G. MCKINNEY et G. L. WOODRUFF, "The U.W. MCNP Source Patch for the EPFL Haefely Source", Progress Report on EPFL (Swiss), Fusion–Fission Hybrid Experiment, DOE/ER/52125-3 (June 1986).
- [7] M. CHATELIER, J. IDMTAL, A. LAGATTU and A. LEPERS, Nucl. Instr. and Meth. 190, 107 (1981).
- [8] E. BOVET, P. BOSCHUNG and J. ROSSEL, Nucl. Instr. and Meth. 101, 315 (1972).
- [9] W. R. LEO and J. P. SCHNEEBERGER, SIN proposal Z-86–01.1 (1986).
- [10] G. PAULETTA, Ph.D. thesis, University of Capetown, South Africa 1973, unpublished.
- [11] F. D. Brooks, Nucl. Instr. and Meth. 4, 151 (1959).