

C-I-4-Evaluation semi-empirique de $\bar{\nu}_p$ pour la fission induite par neutrons rapides.

Le calcul des assemblages fissiles à neutrons rapides nécessite la connaissance du nombre moyen $\bar{\nu}_p$ de neutrons prompts émis dans la fission induite dans les transactinides par des neutrons d'énergie E inférieure à 15 MeV . Cependant, certains noyaux ont une vie trop courte pour qu'une mesure de la loi $\bar{\nu}_p = f(E)$ soit actuellement envisageable . C'est pour cette raison que nous avons développé une systématique des lois $\bar{\nu}_p = f(E)$, essentiellement basée sur les mesures réalisées au Service PN sur les noyaux ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu [1], [2] dans la gamme d'énergie 0,2-15 MeV . Pour cela, nous avons admis que $\bar{\nu}_p$ variait linéairement avec l'énergie d'excitation dans cette gamme d'énergie . En particulier, les faibles écarts à une loi linéaire, dus aux réactions (n,n'f) et (n,2n'f) dont les seuils se situent respectivement vers 6 et 12 MeV, ont été systématiquement négligés .

Les lois $\bar{\nu}_p = f(E)$ sont donc représentées par des droites d'équation :

$$\bar{\nu}_p = A (E - E_S) + \bar{\nu}_S \quad (1)$$

Dans cette expression, la pente A et la valeur $\bar{\nu}_S$ de $\bar{\nu}_p$ au seuil de fission E_S dépendent du nombre N de neutrons et du nombre Z de protons du noyau cible . Les valeurs de E_S ont été déterminées expérimentalement pour de nombreux isotopes [3] [4] [5] [6] [7].

Sur les figures 1 et 2 sont portées respectivement les valeurs de A et de $\bar{\nu}_S$ en fonction de N, pour les différents isotopes étudiés au Service PN . Ces valeurs ont été obtenues à partir de la formule (1) par la méthode des moindres carrés . Pour faciliter l'ajustement, la valeur expérimentale de $\bar{\nu}_S$ de ^{232}Th [8] a été également portée sur la figure 2 .

Dans la limite de la précision expérimentale, la pente A est indépendante de Z et varie linéairement avec N (figure 1) . La méthode des moindres carrés donne le résultat :

$$A = 0,1495 + 0,0032 (N - 145) \quad (2)$$

La figure 2 montre que \bar{v}_S est pratiquement constant pour une valeur de Z et une parité de N données . Les valeurs moyennes correspondantes ont été portées sur la figure 3 en fonction de Z .

La variation de \bar{v}_S avec la parité de N est $\Delta\bar{v}_S = 0,185 \pm 0,035$ pour les isotopes de Pu et $\Delta\bar{v}_S = 0,165 \pm 0,016$ pour les isotopes de U . Nous la supposons indépendante de Z et la valeur moyenne $\Delta\bar{v} = 0,169$ est introduite dans la loi $\bar{v}_S = f(N,Z)$ sous la forme $0,084 (-)^N$.

Pour une parité de N donnée , \bar{v}_S varie linéairement avec Z (figure 3) et la pente est indépendante de cette parité dans la limite des barres d'erreur . La méthode des moindres carrés donne pour cette pente $(\Delta\bar{v}_S/\Delta Z) = 0,206$. La valeur \bar{v}_S de \bar{v}_p au seuil de fission E_S peut donc s'exprimer par la loi :

$$\bar{v}_S = 2,775 + 0,084 (-)^N + 0,206 (Z - 94) \quad (3)$$

en choisissant le noyau cible ^{239}Pu comme noyau de référence .

La valeur de \bar{v}_p en fonction de l'énergie E des neutrons incidents pour un noyau cible comprenant N neutrons et Z protons et ayant un seuil de fission E_S peut donc s'écrire :

$$\bar{v}_p = \bar{v}_S + A(E - E_S) = 2,775 + 0,084 (-)^N + 0,206(Z - 94) + \left[0,1495 + 0,0032(N - 145) \right] (E - E_S) \quad (4)$$

Cette expression permet de retrouver à mieux de 3% les différentes valeurs de \bar{v}_p publiées pour les isotopes de Th, U, Pu [8] . Elle devrait donc reproduire avec la même précision les valeurs de \bar{v}_p des isotopes de ces noyaux pour lesquels il n'existe pas de mesures . Son extension aux isotopes de Pa et de Np, pour lesquels aucune mesure n'a été réalisée, est plus hasardeuse, car il n'est pas exclu que \bar{v}_p dépende également de la parité de Z .

Pour $Z > 94$, seules des mesures de \bar{v}_p pour la fission thermique ont été réalisées . Le tableau I permet de comparer les valeurs expérimentales \bar{v}_{th} de \bar{v}_p pour la fission thermique aux prévisions de la loi (4) pour l'ensemble des noyaux étudiés .

Les valeurs calculées sont nettement plus basses que les valeurs mesurées pour les noyaux ayant $Z > 94$. Contrairement à ce qui est observé pour les isotopes de U et de Pu on constate que les valeurs de $\bar{\nu}_{th}$ diffèrent sensiblement pour les isotopes ^{243}Cm et ^{245}Cm , ce qui semble indiquer dans ce cas une dépendance de $\bar{\nu}_{th}$ avec N. Ceci est à rapprocher des variations des valeurs $\bar{\nu}_{sp}$ de $\bar{\nu}_p$ mesurées pour la fission spontanée [8] [9] [10] et portées en fonction de N sur la figure 4 : ces valeurs sont à peu près indépendantes de N pour les isotopes de U et de Pu tandis qu'elles varient linéairement avec N pour les isotopes de Cm et de Cf. Dans la limite de $\pm 3\%$, elles sont données par les relations :

$$Z \leq 94 \quad \bar{\nu}_{sp} = 2,134 + 0,085 (Z-94)$$

$$94 < Z \leq 98 \quad \bar{\nu}_{sp} = 2,120 + 0,172 (Z-94) + 0,115 (N-146)$$

Par analogie, l'expression (3) de $\bar{\nu}_s$ a été modifiée pour $Z > 94$ en incluant un terme dépendant de N. Cette nouvelle formulation a été déterminée par la méthode des moindres carrés à partir des résultats expérimentaux, en admettant la validité de l'expression (2) de la pente A au delà de $Z = 94$. Pour $94 < Z \leq 98$ la valeur de $\bar{\nu}_p$ s'exprime alors par la relation :

$$\bar{\nu}_p = 2,835 + 0,084 (-)^N + 0,140 (Z-94) + 0,153 (N-145) + \left[0,1495 + 0,0032 (N-145) \right] (E-E_S) \quad (5)$$

Les valeurs $\bar{\nu}_{th}$ de $\bar{\nu}_p$ pour la fission thermique, calculées par cette formule pour $94 < Z \leq 98$ sont reportées dans le tableau I. Elles sont en accord à $\pm 3\%$ avec les valeurs expérimentales, même pour les isotopes de Am de Z impair. Ce dernier point semble montrer que les variations de $\bar{\nu}_p$ en fonction de N et Z sont peu sensibles à la parité de Z. Cependant l'absence de données expérimentales pour la fission par neutrons rapides des noyaux de la région $94 < Z \leq 98$ ne permet pas d'attribuer à la formule (5) une précision meilleure que 10%.

Au delà de $Z = 98$, l'influence de la fission symétrique ne permet plus d'utiliser la formule (5). En effet, dans ce cas les fragments formés sont voisins de noyaux magiques donc peu déformés : ils émettent en moyenne moins de neutrons que les fragments de la fission asymétrique.

(R. BOIS, J. FREHAUT)

REFERENCES

- [1] - M. SOLEILHAC, J. FREHAUT, J. GAURIAU, Journal of Nuclear Energy 23 (1969) 257 .
- [2] - J. FREHAUT, G. MOSINSKI, R. BOIS, M. SOLEILHAC, Rapport CEA-R-4626, 1974 .
- [3] - B.B. BACK, O. HANSEN, H.C. BRITT, J.D. GARRET, LA-UR-73 (1973), 1762 .
- [4] - B.B. BACK, O. HANSEN, H.C. BRITT, J.D. GARRET, B. LEROUX, Physics and Chemistry of fission, AIEA, Rochester 1973, Vienne 1974, I, 3 .
- [5] - Rapport CCDN, EANDC 95 U (1974) .
- [6] - BNL 325, Second Edition, Supplément n° 2 .
- [7] - J.A. NORTHRUP, R.H. STOKES, K. BOYER , Phys. Rev. 115 (1959) 1277 .
- [8] - F. MANERO, V.A. KONSHIN, Atomic Energy Review 10, AIEA, Vienne (1972) 637 .
- [9] - D.M. DAKOVSKII, Yu. A. LAZAREV, Yu. Ts. OGANESYAN, Sov. J. Nucl. Phys. 18 (1974) 371 .
- [10] - D.M. DAKOVSKII, Yu. A. LAZAREV , Yu. Ts. OGANESYAN, G.V. BUKLANOV, Sov. J. Nucl. Phys. 17 (1973) 360 .

Noyau cible	Mesure	Calcul	
	$\bar{\nu}_{th} \pm \Delta\bar{\nu}$	$\bar{\nu}_{th}^*$	$\bar{\nu}_{th}^{**}$
$^{229}_{Th}$	$2,02 \pm 0,10$	1,95	-
$^{233}_{U}$	$2,46 \pm 0,01$	2,39	-
$^{235}_{U}$	$2,39 \pm 0,01$	2,37	-
$^{238}_{Pu}$	$2,87 \pm 0,02$	2,79	-
$^{239}_{Pu}$	$2,86 \pm 0,01$	2,83	-
$^{241}_{Pu}$	$2,90 \pm 0,02$	2,82	
$^{241}_{Am}$	$3,10 \pm 0,02$	2,92	3,07
$^{242}_{Am}$	$3,24 \pm 0,02$	2,99	3,29
$^{243}_{Cm}$	$3,40 \pm 0,05$	3,23	3,47
$^{245}_{Cm}$	$3,80 \pm 0,03$	3,22	3,76
$^{249}_{Cf}$	$4,53 \pm 0,21$	3,68	4,40
$^{249}_{Cf}$	$4,05 \pm 0,04$	3,68	4,40

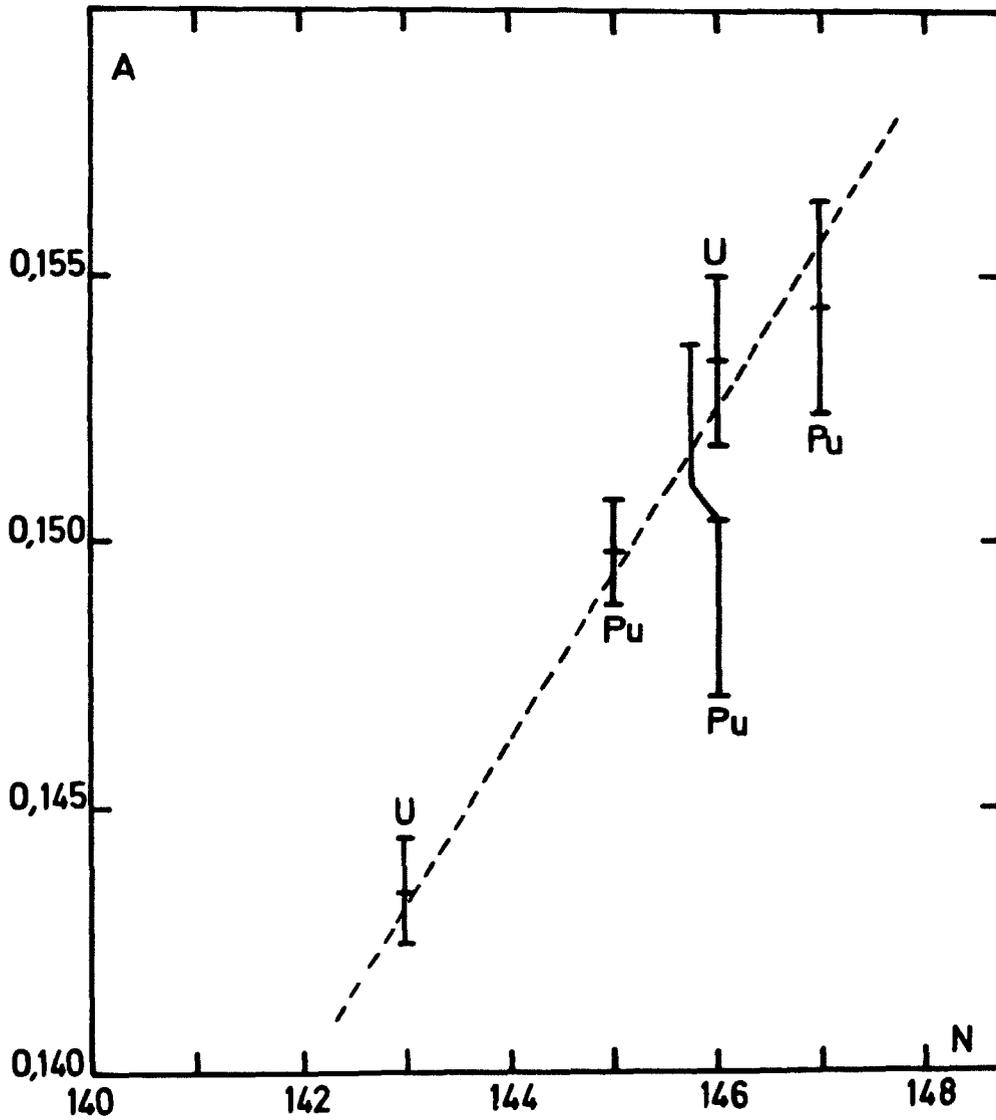
C-I-4-TABLEAU I

Comparaison des valeurs mesurées et des valeurs calculées de $\bar{\nu}_p$ pour la fission thermique .

* Valeurs calculées à partir de l'expression (4)

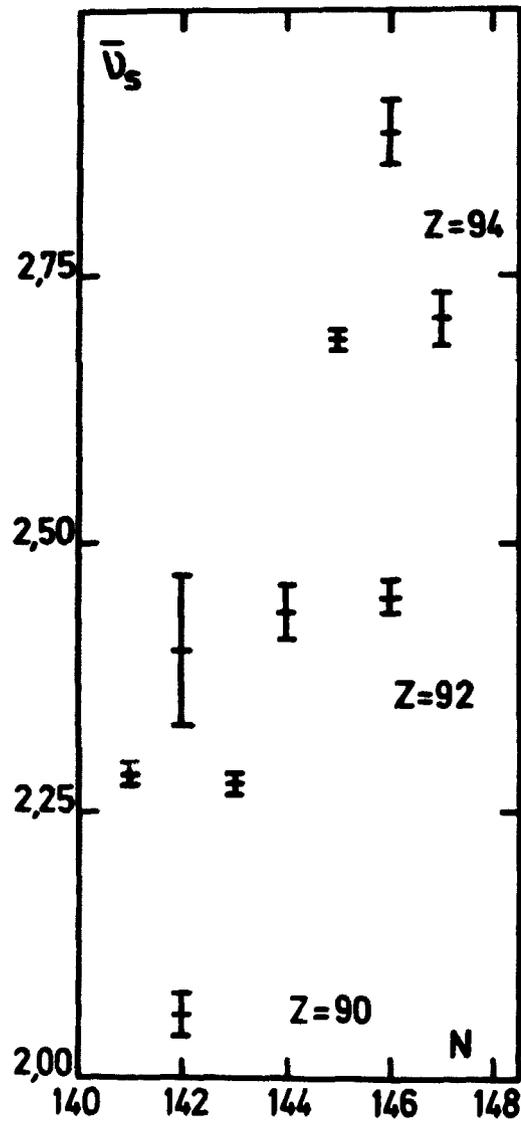
** Valeurs calculées à partir de l'expression (5)

Les valeurs expérimentales sont tirées de la compilation de F. MANERO et V.A. KONSHIN [8] .



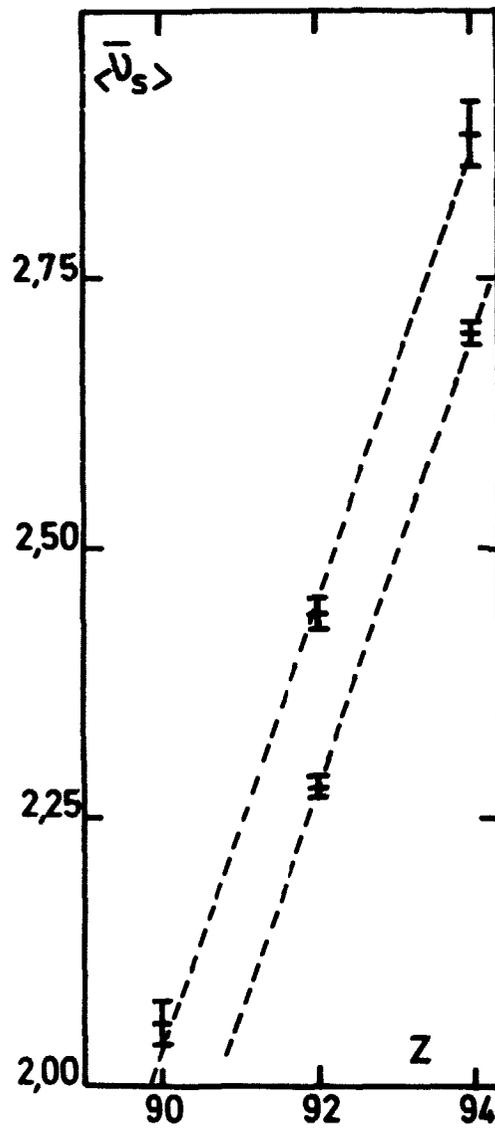
C-I-4-FIGURE 1

Variation de la pente $A = \frac{\Delta v p}{\Delta E}$ en fonction du nombre N de neutrons du noyau cible . La droite correspond à un ajustement par la méthode des moindres carrés .



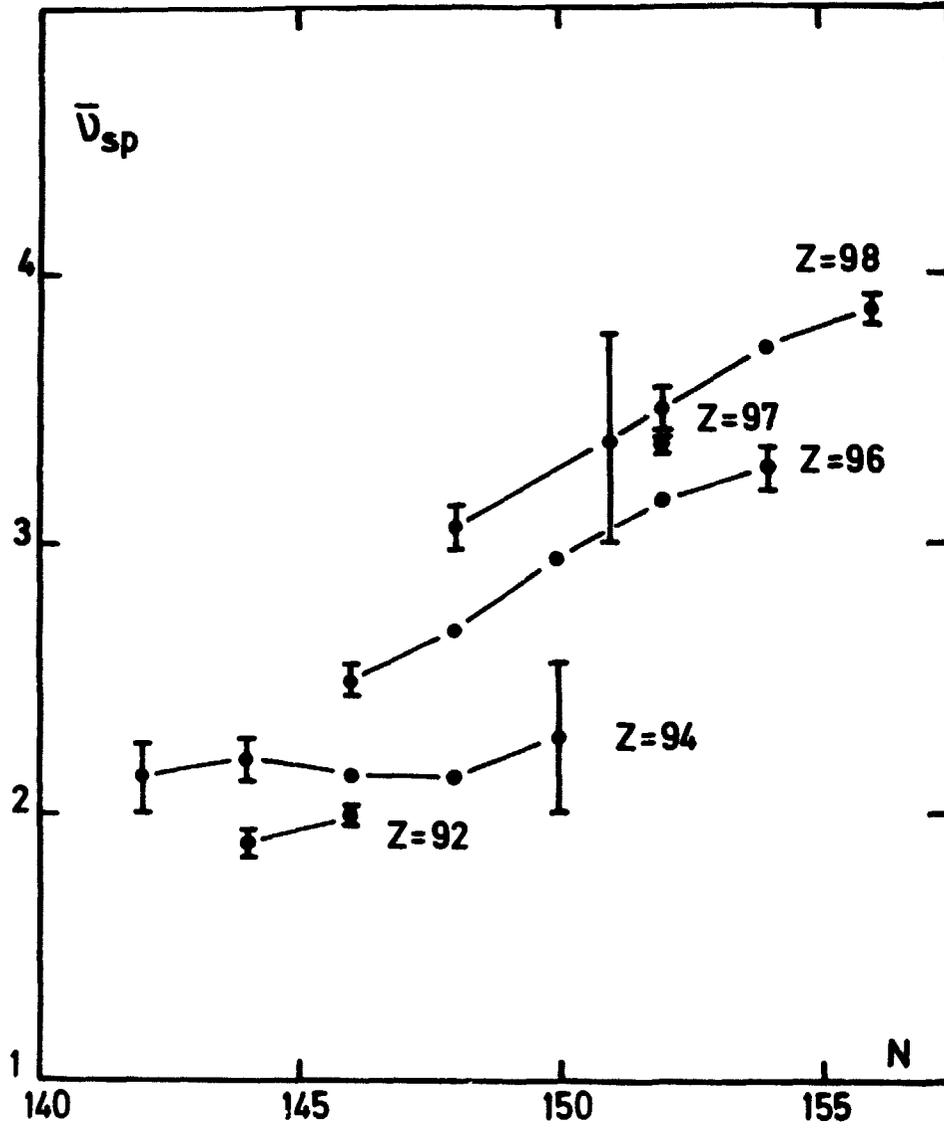
C-I-4-FIGURE 2

Variation de la valeur $\bar{\nu}_s$ de $\bar{\nu}_p$ au seuil de fission en fonction du nombre N de neutrons du noyau cible .



C-I-4-FIGURE 3

Variation pour une parité de N donnée de la valeur moyenne $\langle \bar{v}_s \rangle$ de \bar{v}_p au seuil de fission en fonction du nombre Z de protons du noyau cible . Les droites correspondent à un ajustement par la méthode des moindres carrés pour chaque parité de N .
La droite supérieure correspond aux valeurs paires de N .



C-I-4-FIGURE 4

Variation des valeurs expérimentales $\bar{\nu}_{Sp}$ de $\bar{\nu}_p$ pour la fission spontanée en fonction du nombre N de neutrons du noyau fissionnant .