

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE des Science

DEPARTEMENT de physique

N° :/2018.....



DOMAINE : Sciences de la matière

FILIERE : Physique

OPTION : PHYSIQUE THEORIQUE

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Par: NAIDJI Saloua

Intitulé

**Évaluation empirique des sections efficaces de la
réaction (n, ³He)**

Soutenu le 26 /06 /2018 devant le jury composé de

N.Amrani	Université de Setif-1	Encadreur
S.Nehaoua	Université de M'sila	Co-Encadreur
S.Kalli	Université de M'sila	Président
S.Medjedel	Université de M'sila	Examineur
A.Metatla	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2017/2018

Remerciements

Tout d'abord, je voudrais remercier Dieu(Allah), sans son aide ce travail n'aura pas abouti.

Ensuite, Je remercie papa et Mama car ils étaient et sont toujours une source d'encouragement et de soutien pour moi.

*Je remercie mon encadreur Pr. **AMRANI Naima** professeur à l'université Sétif-1, ainsi mon Co-encadreur Dr.**NEHAOU ASamra**, Maitre de conférence à l'université de Msila.*

*Je remercie ainsi que mes professeurs, qui m'ont enseigné pendant mes études à l'université de Msila en particulier Dr.**KALI Siham** Maitre de conférence à l'université de Msila*

*Je remercie également Dr.**Sohaib Medjedel** Maitre de conférences Habilité à l'université de Msila.*

*Je remercie également Dr.**A .Metatla** Maitre de conférences à l'université de Msila
Pour avoir acceptés de juger ce travail.*

Je remercie mes amis et camarades de classe qui sont ma deuxième famille.

Dédicace

Je voudrais dédier ce travail simple à Papa, Maman, mes frères et ma sœur.

Et aussi à mes amis surtout les amis de l'étude.

Sommaire

Introduction général	2
----------------------------	---

Chapitre I : Réactions nucléaires

I.1 Réaction nucléaire (x , y)	5
I.2 Réactions nucléaires induite par un neutron	5
I.2.1 Neutron.....	5
I.2.2 Classification des neutrons.....	6
a. Les neutrons thermiques.....	7
b. Les neutrons épi-thermiques.....	7
c. Les neutrons intermédiaires	7
d. Les neutrons rapides.....	7
I.3 Type d'interaction de neutron avec la matière	8
I.3.1 La diffusion.....	8
a. La diffusion élastique	8
b. La diffusion inélastique	9
I.3.2 Absorption	9
a. La fusion	9
b. La fission	10
I.3.3 La capture radiative.....	11
I.3.4 La capture non radiative.....	12
I.4.1 Section efficace microscopique.....	13
I.4.2 Section efficace macroscopique	15

Chapitre II : Réaction nucléaire ($n, {}^3\text{He}$)

II.1 Introduction	17
II.2 Réaction nucléaire ($n, {}^3\text{He}$).....	17

II.3 Difficulté de mesurer la section efficace	18
II.4 Energie de neutron 14 MeV et 20 MeV	18
II.5 les valeurs expérimentales	19
6.1 Qu'est-ce que EXFOR?	19
6.2 Comment utiliser EXFOR.....	20

Chapitre III : Formules empiriques et semi empiriques proposées pour générer la section efficace de la réaction (n,3He)

III.1 Introduction	22
III.1 Les modèles nucléaires	24
III.2 Les formules empiriques	25
III.3 Les formule semi empirique	27
2 Test des formulées proposées.....	28

Chapitre IV : formule empirique proposé pour le calcul de la section efficace (n,3He)

Résultats et discussion

IV.1 Introduction	30
IV.2 Formule empirique pour la section efficace (n, 3He)	30
IV.3 Variation de l'énergie de la réaction (n,3He)	31
IV.4 Calcul des rapports $\frac{\sigma_{exp}}{\sigma_{ne}}$ et $\frac{\Delta\sigma_{exp}}{\sigma_{ne}}$	33
IV.5 Formule empirique proposée	34
IV.6 Résultats et discussion	37
IV.7 Calcul des paramètres statistiques Σ et χ^2	40
Conclusion	41
Références BIBOUTIQUE.....	43

Liste des figures

Figure I.1 :Diffusion élastique d'un neutron sur un noyon.....	8
Figure I.2 : Fusion des noyaux légers.....	10
Figure I.3 : Fission de l'U ²³⁵	11
Figure I.4 : schéma d'interaction du neutron avec un noyau cible de surfaceapparente σ	13
Figure I.5 : un faisceau incident de neutrons mono énergétiques sur une cible mince.....	15
Figure III.1 :Spectre d'émissions typique dans une réaction nucléaire	24
Figure IV.1 : Valeur de la réaction O (MeV) des cibles utilisées dans nos calculs	32
Figure IV.2 :Les rapport $\frac{\sigma_{exp}}{\sigma_{ne}}$ et $\frac{\Delta\sigma_{exp}}{\sigma_{ne}}$ en fonction de l'énergie de Q.....	34
Figure IV.3 :Les rapports $\frac{\sigma_{exp}}{\sigma_{cal(1)}}$ et $\frac{\sigma_{exp}}{\sigma_{cal(2)}}$ obtenus pour les 13 cibles étudiées en fonction de l'énergie da la réaction Q.....	37
Figure IV.4 Sections efficaces calculées $\sigma_{cal(2)}$ par notre formule et celle par M. Yigit [9] $\sigma_{cal(1)}$ avec celle mesurées en fonction de Q (MeV)	39

Liste des tableaux

Tableau I.1 : les Propriétés des neutrons.....	6
Tableau I.2 : Classification des neutrons en fonction de leur énergie.....	6
Tableau II.1 :réactions possibles (n,3He).....	18
Tableau II.2 :les section efficace mesurées par Qaim ,Csikai et Szalay ,Diksic et al.....	19
Tableau III.1 : les section efficace mesurées par Qaim ,Csikai et Szalay ,Diksic et al.....	23
Tableau III.2 :les formule empiriques et semi empiriques avec le paramètre de test x^2	28
Tableau IV.1 : formule empiriques de section efficace du (n,3He).....	31
Tableau IV.2 : résultats de calcul des rapports $\frac{\sigma_{exp}}{\sigma_{ne}}$ et $\frac{\Delta\sigma_{exp}}{\sigma_{ne}}$	33
Tableau IV.3 : les rapports $\frac{\sigma_{exp}}{\sigma_{cal(1)}}$ et $\frac{\Delta\sigma_{exp}}{\sigma_{cal(2)}}$ obtenues pour les 13 cible étudiées... ..	36
Tableau IV.4 : les sections efficaces calculées par notre formule $\sigma_{cal(2)}$ et celle calculée par la formule de M. Yigit [9] $c\sigma_{cal(1)}$ avec celles mesurées $\sigma_{exp}(n, 3He)$	38
Tableau IV.5 : le paramètre x^2 des formules empirique	40

Introduction général

Introduction général

L'étude des réactions nucléaires induites par neutrons rapides, présente un grand intérêt dans le domaine de la technologie des réacteurs et de la structure nucléaire. L'étude concerne particulièrement l'étude des sections efficaces des réactions neutroniques induites par des neutrons rapides (14,6 MeV à 20 MeV). En physique des futurs réacteurs de fusion les mesures des sections efficaces des réactions induites par neutrons rapides sont d'une importance fondamentale. En effet, ces mesures servent à valider les différentes paramétrisations des modèles théoriques afin de pouvoir extrapoler le calcul théorique à des cas non accessibles expérimentalement (20 MeV).

Les données expérimentales nous permettent de vérifier et d'évaluer des modèles nucléaires, conçus pour l'analyse des interactions nucléaires. Ces modèles théoriques permettent à leur tour de prédire des données qui ne sont pas accessibles à l'expérience. La combinaison entre les deux approches théorique et expérimentale permet d'aboutir à des études systématiques pour des évaluations fiables et rapides des données nucléaires.

Dans ce travail une évaluation basée sur la formule empirique de M. Yigit [1] est proposée en considérant l'effet direct de l'énergie de la réaction neutronique ($n, {}^3\text{He}$) ainsi que la dépendance directe avec l'énergie non élastique. Un programme en fortran a été utilisé pour ajuster les paramètres de cette formule empirique. Cette évaluation l'étude de la section efficace de 13 cibles de nombre de masse entre 31 et 187. Cela pour une énergie des neutrons de 14,6 MeV. Comparés aux résultats expérimentaux extraits de la Bibliothèque (EXFOR), ces nouveaux paramètres améliorent les calculs et les rapprochent de ceux expérimentaux.

Ce manuscrit se subdivise en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, on présente les réactions nucléaires et les réactions neutroniques en investiguant les propriétés du neutron qui lui permettent d'accéder au champ nucléaire du noyau en ignorant son cortège électronique, ensuite on définit la section efficace qui nous s'informe sur la probabilité de la réalisation de la réaction nucléaire.

Dans le second chapitre, on présente la réaction étudiée qui produit de l'Hélium-3 en bombardant une cible lourde ou moyennement lourde, et on présente les données expérimentales qui existent, ces mesures peuvent pousser les théoriciens à améliorer les formules proposées.

Au troisième chapitre, on présente les formules empiriques et semi empiriques qui existent actuellement pour générer les sections efficaces de la réaction neutroniques ($n, {}^3\text{He}$).

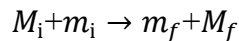
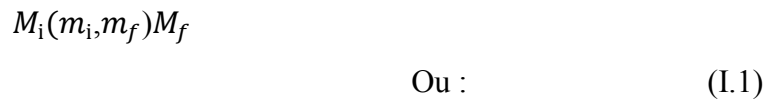
Dans le quatrième chapitre, on présente notre évaluation de la formule empirique de M. Yigit [1]. Les résultats de notre travail sont envisagés avec les mesures expérimentales et ceux trouvés par M. Yigit [1].

Chapitre I

Réactions nucléaires

I.1 Réaction nucléaire (x,y)

Quand deux noyaux M_i et m_i se rapprochent suffisamment, jusqu'à une distance égale à la portée de la force nucléaire, une réorganisation des nucléons peut avoir lieu. Les réactants sont la particule m_f et un noyau final M_f qui est dans son état fondamental ou excité, On note cette réaction par [2] :



Les produits de la réaction nucléaire peuvent différer des réactants, donc il résulte de la collision des nouveaux composants :



I.2 Réactions nucléaires induite par un neutron

Une réaction nucléaire neutronique est le processus dans lequel un neutron interagit avec un noyau en donnant deux ou plusieurs particules.

Parfois, si un noyau interagit avec un autre noyau ou une autre particule sans changer la nature du nucléide, le processus est référé à une diffusion nucléaire plutôt qu'à une réaction nucléaire neutronique [3], la diffusion du neutron peut être élastique ou inélastique. La réaction nucléaire neutronique peut provoquer une transformation du nucléide cible en un autre nucléide en absorbant le neutron incident.

I.2.1 Neutron

Un neutron est une particule qui ne porte pas de charge électrique, il est neutre, ce qui le rend la particule appropriée pour bombarder les atomes et atteindre leurs noyaux. Il a une masse égale à celle du proton, à l'extérieur du noyau le neutron est libre, Il vit en moyenne pendant 15 minutes, puis se désintègre automatiquement en un proton et un électron et un antineutrino.

L'équation de la désintégration du neutron est donné par :



Charge électrique	$q_n = 0$
Taille	$r_n \sim 1 \text{ Fermi} = 0.1 \text{ barn}$
Structure interne quarks	ddu
Spin	$s_n = \frac{1}{2}$
Moment dipolaire magnétique	$\mu_n / \mu_p = -0,68497935$
Moment dipolaire électrique	0
Durée de vie	$\tau_n = 885,5 \pm 1,0 \text{ s}$

Tableau I.1 : Propriétés du neutron [4]

I.2.2 Classification des neutrons

Plusieurs réactions nucléaires produisent des faisceaux de neutrons. Les neutrons sont produits avec des énergies : élevée, moyenne ou faible. À la différence des particules chargées, les neutrons ne peuvent être accélérés mais peuvent être ralentis par chocs successifs sur des noyaux généralement légers tels que l'hydrogène ou le graphite. Ce processus de ralentissement est appelé modération. Les neutrons peuvent être classifiés selon leurs énergies comme indiqué au tableau I.2.

Classification	Énergie
Neutrons thermiques	$0,025 \text{ eV} \leq E_n \leq 0,4 \text{ eV}$
Neutrons épi-thermiques	$0,4 \text{ eV} < E_n \leq 100 \text{ eV}$
Neutrons intermédiaires	$100 \text{ eV} < E_n \leq 200 \text{ keV}$
Neutrons rapides	$200 \text{ keV} < E_n \leq 10 \text{ MeV}$
Neutrons relativistes	$E_n \geq 10 \text{ MeV}$

Tableau I.2 : Classification des neutrons en fonction de leur énergie.

a. Les neutrons thermiques

Les neutrons thermiques sont les neutrons qui ont une énergie cinétique qui leur permet d'être en équilibre thermique avec les noyaux du milieu modérateur. Leur spectre est décrit par la distribution de Maxwell-Boltzmann. La distribution de vitesses des neutrons est donnée alors par l'expression

$$n(v)dv = \frac{4n_{th}v^2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{m}{2kT}\right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{1mv^2}{2kT}} dv \quad (I.4)$$

où :

n_{th} : est la densité neutronique totale, m : la masse du neutron.

k : la constante de Boltzmann .

T : est la température absolue de neutron

v : la vitesse de neutron

L'énergie cinétique la plus probable des neutrons thermiques est alors donnée par:

$$E_n = k. T = \frac{1}{2} mv^2 \quad (I.5)$$

Elle correspond à une vitesse des neutrons de 2200 m/s, et vaut 0,0253 eV à la température ambiante ($T=20^\circ\text{C}$). L'énergie cinétique moyenne des neutrons se situe autour de cette valeur la plus probable.

La limite supérieure de l'énergie au-dessous de laquelle ils sont considérés comme des neutrons thermiques est de 0,4 eV, cette valeur correspond au changement remarquable observé à la section efficace d'absorption du cadmium (Cd).

b. Les neutrons épi-thermiques

Les neutrons épi-thermiques sont les neutrons qui ont une énergie allant de 0,4 eV jusqu'à environ 100 eV.

c. Les neutrons intermédiaires

Les neutrons intermédiaires sont les neutrons qui résultent des collisions entre les neutrons rapides et les noyaux des éléments du matériau. Ils sont situés dans la gamme d'énergie entre 100 eV et 200 keV.

d. Les neutrons rapides

Les neutrons rapides sont ceux dont l'énergie est supérieure à 200 keV.

I.3 Type d'interaction de neutron avec la matière :

I.3.1 Diffusion

Il y'a deux formes de diffusion : diffusion élastique et diffusion inélastique.

a. Diffusion élastique

Le neutron incident est dévié de sa trajectoire initiale, l'interaction se réduit à un simple transfert d'énergie cinétique. L'énergie totale du système neutron-noyau étant conservée, une partie de l'énergie cinétique du neutron incident est transférée au noyau cible sous forme d'énergie de recul (Figure I.1).

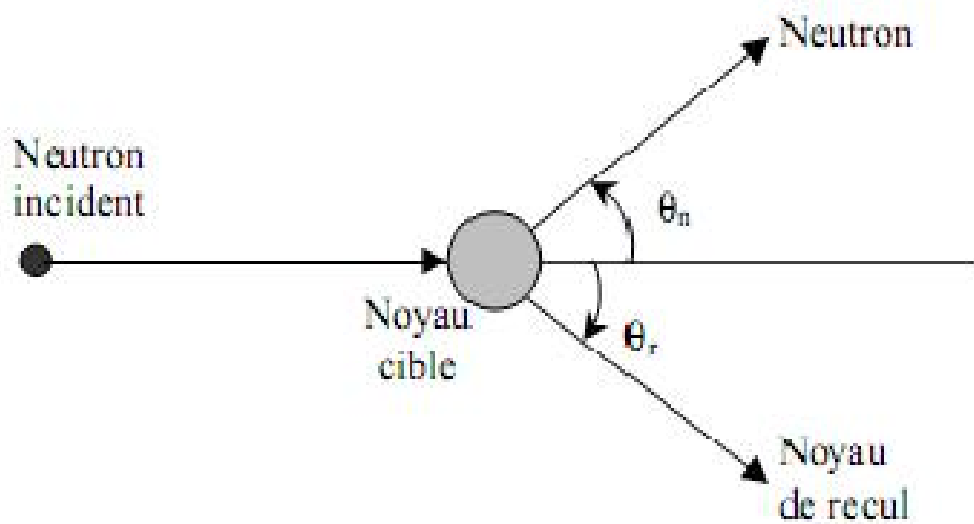


Figure I.1 : Diffusion élastique d'un neutron sur un noyau

La nature des particules est conservée, le noyau de recul reste dans son état fondamental. L'équation de la diffusion élastique s'écrit :



Ce type d'interaction constitue le principal mécanisme de perte d'énergie du neutron dans les domaines d'énergie intermédiaire et rapide. L'énergie du neutron diffusé dépend de l'angle de diffusion.

L'énergie maximale transférée est :

$$E_{\text{max transféré}} = \frac{4mM}{(m+M)^2} E_n \quad (\text{I.7})$$

Tel que :

m : étant la masse du neutron

M : la masse du noyau ralentisseur

E_n : l'énergie du neutron incident

La perte d'énergie moyenne du neutron est donc d'autant plus grande que le noyau cible est léger. L'hydrogène présente le meilleur ralentisseur pour les neutrons rapides où la valeur maximale de l'énergie transférée est atteinte.

b. Diffusion inélastique

La diffusion inélastique s'effectue par l'absorption du neutron incident formant ainsi un noyau composé qui se désintègre en émettant un neutron et laissant le noyau résiduel dans un état excité. Ce noyau revient à l'état fondamental par l'émission d'un ou de plusieurs photons. Cette réaction est représentée par l'équation



Dans cette réaction, la quantité de mouvement et l'énergie totale sont conservées, mais l'énergie cinétique du système ne l'est plus. En effet, une partie de l'énergie cinétique du neutron incident est cédée au noyau sous forme d'énergie d'excitation [5].

I.3.2 Absorption

Dans cette réaction, le neutron est complètement absorbé par la cible, et participe dans des réactions plus compliquées qui sont :

a. La fusion

La fusion est une réaction nucléaire dans laquelle les noyaux sont réunis en donnant naissance à un noyau plus grand. À cause de la force coulombienne répulsive, les deux noyaux doivent avoir une énergie cinétique suffisante pour surmonter la barrière coulombienne. La fusion nucléaire peut avoir lieu, avec des énergies cinétiques raisonnables, seulement pour les noyaux légers. La fusion est un des processus les plus importants dans le soleil et sa source d'énergie principale (Figure I.2).

Exemple :



Pas de la barrière coulombienne mais les neutrons libres sont rares

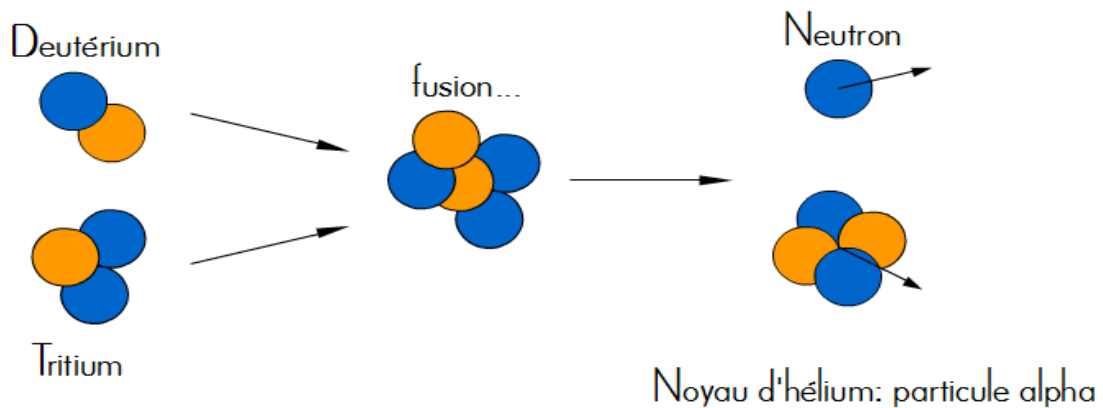
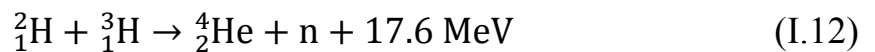
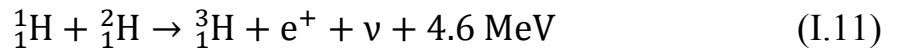
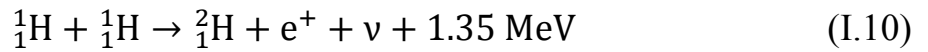
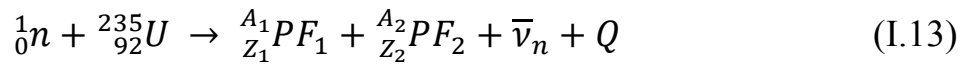


Figure I.2: Fusion des noyaux légers

b. La fission

La fission est une réaction d'absorption particulière. Elle peut être provoquée ou spontanée, dans la fission spontanée le un noyau parent se brise en deux noyaux fils de masses approximativement égales sans action externe [6]. Mais dans la fission provoquée une source de neutrons est nécessaire pour induire la réaction de fission des noyaux fissiles ou fertiles. La fission est une source d'énergie très élevée (de l'ordre de 200MeV), elle est accompagnée par l'émission d'un ou de plusieurs neutrons rapides, la grande partie de cette énergie est portée par les fragments de fission et le reste est cédée aux neutrons sous forme d'une énergie cinétique.

Exemple : la fission de l'uranium235 ou du plutonium 239 facilement réalisable, par des neutrons thermiques. La réaction de fission de l'uranium 235 par exemple est donnée par :



où :

$\bar{\nu}_n$ représente le nombre moyen de neutrons émis au cours de la fission ($\bar{\nu}_n \approx 2,5$).

Q : L'énergie libérée

${}_{Z_2}^{A_2}\text{PF}_2$: noyau de produit de fission

${}_{Z_1}^{A_1}\text{PF}_1$: noyau de produit de fission

Les neutrons obtenus par fission ont un spectre en énergie qui suit une distribution de Maxwell centré autour de 2MeV (Figure I.3).

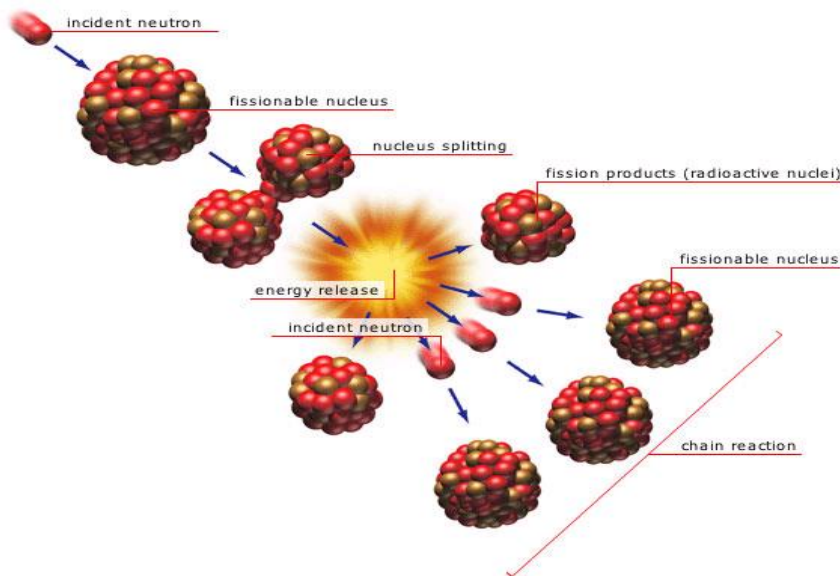


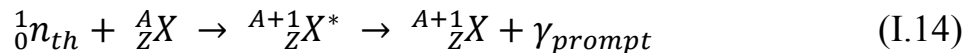
Figure I.3 : Fission de l' U^{235}

I.3.3. Capture radiative

La capture neutronique radiative s'effectue avec la formation d'un noyau composé par l'absorption d'un neutron incident. Dans le centre de masse, le noyau ainsi formé possède une énergie d'excitation élevée qui est la somme de l'énergie cinétique du neutron incident et de son énergie de liaison dans le noyau composé.

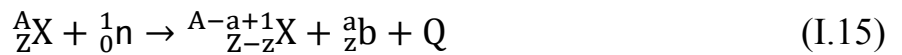
La désexcitation de ce noyau peut s'effectuer par l'émission d'un seul photon très énergétique appelé gamma prompt, ou progressivement par passage par des niveaux d'excitation intermédiaires, avec émission de plusieurs photons caractéristiques (on parle alors de cascade).

La réaction de capture radiative (dont la probabilité est la plus élevée pour les neutrons thermiques) est :



I.3.4. Capture non radiative

Dans ce type d'interaction, le noyau composé formé par l'absorption du neutron incident émet une particule ou plusieurs particules. Les réactions du type (n, p), (n, α)...etc se produisent plus facilement avec les noyaux légers. Les neutrons qui provoquent ces réactions possèdent généralement des énergies élevées, à l'exception des réactions ${}^{10}\text{B} (n,\alpha){}^7\text{Li}$, ${}^6\text{Li} (n, \alpha){}^3\text{He}$. Ces réactions sont représentées par l'équation :



Q étant la chaleur de la réaction en MeV et b la particule légère émise (n, p, ${}^3\text{He}$ d, α , t...)

I.4. Section efficaces

I.4.1. Section efficace microscopique

Il est nécessaire de pouvoir quantifier les réactions nucléaires, c'est-à-dire de déterminer les probabilités qu'elles aient lieu. La section efficace microscopique est la probabilité de rencontrer un seul noyau de surface apparente σ dans une surface unité de 1 cm^2 comme schématisée sur la (Figure I.4)

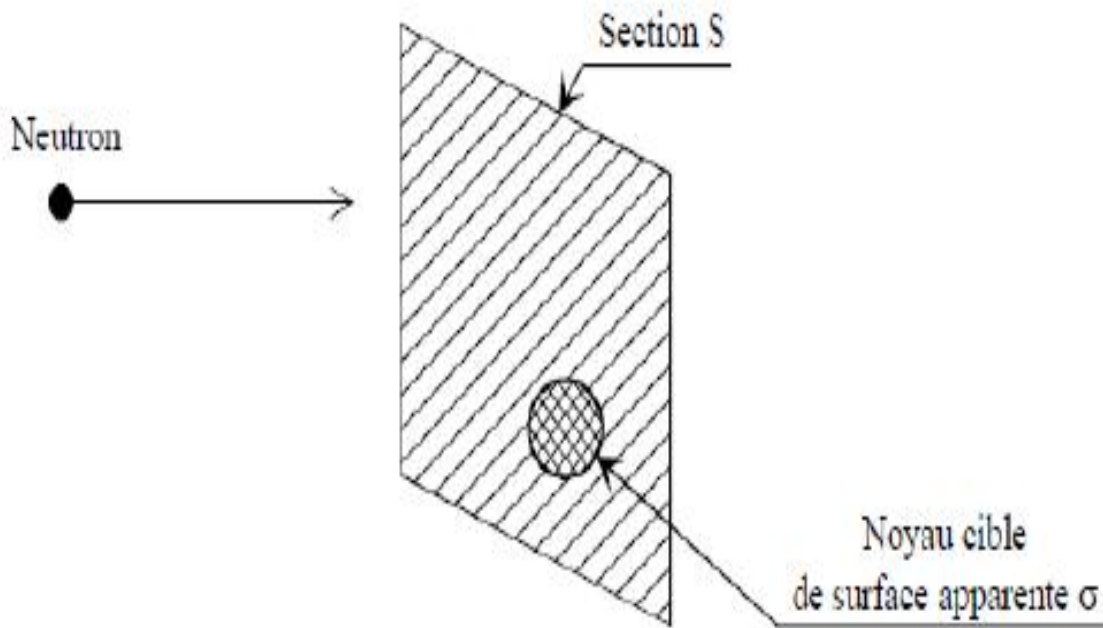


Figure I.4 : Schéma d'interaction du neutron avec un noyau cible de surface apparente σ .

La section efficace microscopique dépend de la nature du noyau cible, de la vitesse du neutron et de la nature de l'interaction qui en résulte. Cette possibilité de réaction est évaluée comme un «espace privilégié» autour du noyau où une grande surface signifie une forte probabilité d'interaction. La section nucléaire est mesurée en centimètres carrés. On utilise une sous unité qui est le barn tel que : $1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$.

Le taux de réaction R est donné par:

$$R = n \cdot \Phi \cdot \sigma \quad (\text{I.16})$$

Où :

Φ : le flux

n : le nombre total de noyaux cibles.

σ : section efficace

$$\sigma = \frac{R}{\Phi n} \quad (\text{I.17})$$

N : Nombre de particules produites /par unité de temps [7]

Les différentes sections efficaces que nous pouvons avoir sont les suivantes :

σ_f : section efficace de fission.

σ_e : section efficace de diffusion élastique.

σ_{in} : section efficace de diffusion inélastique.

σ_s :section efficace de diffusion,
 σ_y :section efficace de capture,
 σ_a :section efficace d'absorption,
 σ_{ne} :section efficace non élastique,
 σ_t :section efficace totale.

avec :

$$\sigma_s = \sigma_e + \sigma_{in} \quad (I.19)$$

$$\sigma_a = \sigma_t - \sigma_s \quad (I.20)$$

$$\sigma_{ne} = \sigma_t - \sigma_e \quad (I.21)$$

$$\sigma_t = \sigma_s + \sigma_e + \sigma_y + \sigma_{n,\alpha} + \sigma_{n,2n} + \sigma_{n,3n} + \dots \quad (I.22)$$

La section efficace totale est la somme des sections efficaces pour les différents processus [8].

I.4.2. Section efficace macroscopique

On considère la transmission d'un faisceau de neutrons à travers une cible épaisse (Figure I.5), d'intensité initiale I_0 , la couche contenant les noyaux cibles est d'épaisseur x et de densité atomique N , la section efficace totale σ_t de toutes les réactions possibles des neutrons avec les noyaux de la couche mince, l'intensité finale I du faisceau neutronique est exprimé par :

$$I = I_0 \exp(-N\sigma_T x) \quad (I.23)$$

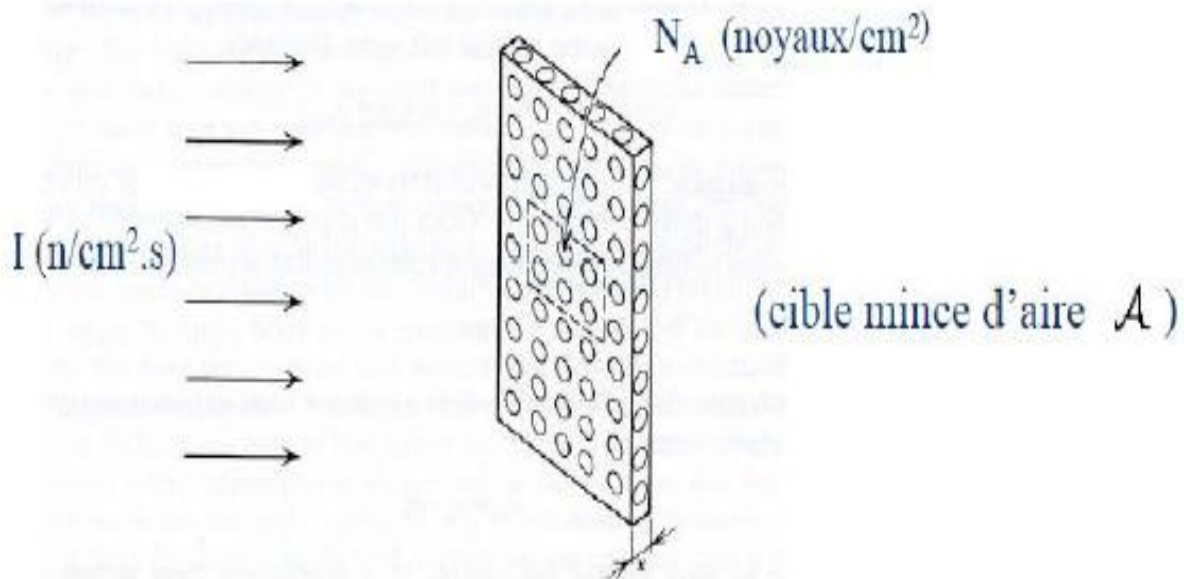


Figure I.5 : Faisceau incident de neutrons mono énergétiques sur une cible mince

On définit alors la section efficace macroscopique (cm^{-1}) telle que :

$$\sum_t = N\sigma_T \quad (\text{le nombre d'interaction par cm})$$

Où :

N: densité atomique

σ_T : section efficace totale

La notion de section efficace est nécessaire pour quantifier le nombre de réactions résultant de l'interaction entre un flux de particules et une cible. Elle peut être «microscopique» quand elle est caractéristique du «noyau-cible» individuel, où «macroscopique» quand elle caractérise un matériau contenant un grand nombre de noyaux-cibles.

Chapitre II

Réaction nucléaire (n, ³He)

II.1 Introduction

Les sections efficaces de neutrons sont les quantités exigées pour étudier des réactions induites par des neutrons. Parmi ces réactions on focalise notre étude sur la réaction ($n, {}^3\text{He}$), où une cible lourde ou moyennement lourde est bombardée par un neutron rapide (d'énergie de 14,5 MeV), cette réaction nucléaire destructible réalisable que dans les réacteurs nucléaires et rend aussi la mesure de la section efficace difficile ou généralement impossible. Ce qui explique l'existence de quelques valeurs expérimentales de la section efficace.

Les sections efficaces ont été mesurées au cours des années 70 par plusieurs techniques qui sont continuellement en développement pour avoir plus de valeurs expérimentales, ainsi de les améliorer avec leur précision.

Les données de section de réaction nucléaire induite par neutrons sont très importantes pour plusieurs études, telles que la technologie des réacteurs de fusion, le calcul des taux de transmutation nucléaire, et l'étude de radioprotection concernant les dommages dus aux rayonnements et à la formation de gaz au sein des réacteurs nucléaires [9].

En outre, la section efficace de l'interaction est très importante pour la technologie de blindage, de l'activation et aussi des applications médicales [10].

II.2. Réaction nucléaire ($n, {}^3\text{He}$)

Dans la réaction ($n, {}^3\text{He}$) un noyau moyennement lourd ou lourd est bombardé par des neutrons rapides ($\sim \text{MeV}$), un atome de nombre de masse $A-2$ et un atome d'hélium sont issus de cette réaction. Expérimentalement le contrôle et la réalisation de cette réaction est difficile ou impossible, ce qui rend aussi difficile la mesure de la section efficace de cette réaction. Donc peu de résultats expérimentaux existent, et en parallèle peu de calcul aussi. Quelques réactions possibles avec des cibles bien déterminées sont données dans le tableau II.1.

$^{31}_{15}\text{P}(n, ^3_2\text{He})^{29}_{13}\text{Al}$
$^{41}_{19}\text{K}(n, ^3_2\text{He},)^{39}_{17}\text{Cl}$
$^{45}_{21}\text{Sc}(n, ^3_2\text{He})^{43}_{19}\text{K}$
$^{59}_{27}\text{Co}(n, ^3_2\text{He})^{57}_{25}\text{Mn}$
$^{63}_{29}\text{Cu}(n, ^3_2\text{He})^{61}_{27}\text{Co}$
$^{75}_{33}\text{As}(n, ^3_2\text{He})^{73}_{31}\text{Ga}$
$^{93}_{41}\text{Nb}(n, ^3_2\text{He})^{91}_{39}\text{Y}$
$^{142}_{58}\text{Ce}(n, ^3_2\text{He})^{140}_{56}\text{Ba}$
$^{159}_{65}\text{Tb}(n, ^3_2\text{He})^{157}_{63}\text{Eu}$
$^{169}_{69}\text{Tm}(n, ^3_2\text{He})^{167}_{65}\text{Ho}$
$^{187}_{73}\text{Ta}(n, ^3_2\text{He})^{179}_{71}\text{Lu}$
$^{187}_{75}\text{Re}(n, ^3_2\text{He})^{185}_{73}\text{Ta}$
$^{209}_{83}\text{Bi}(n, ^3_2\text{He})^{207}_{81}\text{Tl}$

Tableau II.1 : réactions possibles (n, ^3He)

II.3. Difficulté de mesurer la section efficace

Il s'avère que les sections efficaces sont difficiles à mesurer, parce que les sections efficaces (n, ^3He) ont des valeurs minimales (quelques μb). Les calculs théoriques sont poussés pour vérifier, évaluer, corriger et aussi prédire en cas d'inexistence des valeurs expérimentales de la section efficace. Ces calculs s'appuient sur des modèles nucléaires, et vis versa l'expérience améliore ces modèles et les processus utilisés pour décrire le phénomène entre l'absorption du neutron et l'éjection des produits de la réaction neutronique.

II.4. Energie de neutron 14,6 MeV et 20 MeV

Nous ne pouvons pas augmenter l'énergie neutronique plus de 14,6 MeV parce que la particule chargée émise par la réaction du neutron rapide émis causera de graves dommages aux matériaux de construction, en particulier dans les réacteurs à flux neutronique élevé [10].

Dans ce travail, on prend l'énergie du faisceau neutronique égale à 14,6 MeV et 20 MeV.

II.5. Les valeurs expérimentales

Les résultats ci-dessous (Tableau II.2) représentent les résultats expérimentaux de la section efficace avec l'erreur absolue, ces mesures sont réalisées par [1] Qaim(1974), Csikai et Szalay(1965), Diksic et al(1974). Les valeurs correspondants de l'énergie de réaction Q est aussi données en MeV et qui sont entre -6 MeV et 13 MeV, sa valeur négative indique que ces des réactions neutroniques sont absorbantes, cette énergie est donnée sous forme d'une énergie cinétique des neutrons.

noyaux cibles	produits de réaction	Valeurs Q (MeV)	$\Delta\sigma(n, {}^3\text{He})$ (μb)	$\sigma_{exp}(n, {}^3\text{He})$ (μb)	Références
${}^{31}_{15}\text{P}$	${}^{29}_{13}\text{Al} + {}^3_2\text{He}$	-13.095	6.5	13	Qaim(1974)
${}^{41}_{19}\text{K}$	${}^{39}_{19}\text{Cl} + {}^3_2\text{He}$	-12.619	3	6	Qaim(1978)
${}^{45}_{21}\text{Sc}$	${}^{43}_{19}\text{K} + {}^3_2\text{He}$	-11.355	4	8.6	Qaim(1974)
${}^{59}_{27}\text{Co}$	${}^{57}_{25}\text{Mn} + {}^3_2\text{He}$	-11.602	2.1	4.6	Qaim(1974)
${}^{63}_{29}\text{Cu}$	${}^{61}_{27}\text{Co} + {}^3_2\text{He}$	-9.541	2	4	Qaim(1978)
${}^{75}_{33}\text{As}$	${}^{73}_{31}\text{Ga} + {}^3_2\text{He}$	-10.194	1.9	3.5	Qaim(1974)
${}^{93}_{41}\text{Nb}$	${}^{91}_{39}\text{Y} + {}^3_2\text{He}$	-7.721	1.5	3.1	Qaim(1974)
${}^{133}_{55}\text{Cs}$	${}^{131}_{53}\text{I} + {}^3_2\text{He}$	-7.488	3	5	Csikai et Szalay(1965)
${}^{142}_{58}\text{Ce}$	${}^{140}_{56}\text{Ba} + {}^3_2\text{He}$	-8.122	1.3	3.3	Qaim(1978)
${}^{159}_{65}\text{Tb}$	${}^{157}_{63}\text{Eu} + {}^3_2\text{He}$	-6.933	1.8	4.6	Qaim(1978)
${}^{169}_{69}\text{Tm}$	${}^{167}_{67}\text{Ho} + {}^3_2\text{He}$	-5.854	2	4	Qaim(1978)
${}^{181}_{73}\text{Ta}$	${}^{179}_{71}\text{Lu} + {}^3_2\text{He}$	-6.240	1.5	3.4	Qaim(1974)
${}^{185}_{75}\text{Re}$	${}^{183}_{73}\text{Ta} + {}^3_2\text{He}$	-6.682	3	4	Diksic et al(1974)

Tableau II.2 :Section efficace mesurées par Qaim, Csikai et Szalay, Diksic et al

II.6 EXFOR

6.1 Qu'est-ce que EXFOR?

EXFOR est la bibliothèque numérique de stockage, d'échange de données de réaction nucléaire expérimentale. La bibliothèque est le fruit d'une coopération mondiale, à savoir le réseau international des centres de données des réactions nucléaires(NRDC), d'érigée par la Section des données nucléaires (NDS) de l'AIEA.[11]

En mai 2008, la base de données EXFOR contient environ 17 000 œuvres environ 129 000 tables de données, représentant :

- Les données expérimentales concernant les réactions neutroniques induites par des neutrons de faible énergie.
- les données des réactions induites par des particules chargées.
- Quelques mesures pour des réactions nucléaires induites par : des photons, des ions lourds et des neutrons énergétiques.

6.2. Comment utiliser EXFOR

L'accès aux données de l'EXFOR est facile, il suffit de savoir que :

- Une «entrée» EXFOR est identifiée par un numéro d'accession et une date.
- Chaque entrée EXFOR est divisée en un certain nombre de sous-entrées (ensembles de données) contenant les tables de données. Une sous-entrée est identifiée par un numéro de sous-enregistrement.
- EXFOR est conçu pour la flexibilité, pour répondre aux divers besoins des centres nucléaires de données de réaction et de permettre la compilation de type très divers de quantités tout en rendant possible le traitement informatisé des données.
- Les compilations sont faites autant que possible de l'auteur représentations des quantités et des unités de données initialement publiées , éviter les erreurs lors de la saisie des données et faciliter la comparaison avec la publication originale .
- EXFOR est une compilation des données expérimentales publiées par l'auteur .Alors que le format permet l'inclusion de données normalisées à jour valeurs standard (avec la documentation appropriée), cette tâche est normalement laissée aux données les évaluateurs qui examinent systématiquement les travaux expérimentaux.
- EXFOR n'est pas une collection de valeurs recommandées pour chaque réaction mais contient généralement les résultats de différents auteurs pour la même réaction qui peut ou ne peut pas être d'accord. La tâche de recommander la meilleure s'appelle :l'évaluation. Leur travail est largement basé sur les données expérimentales d'EXFOR et leurs résultats sont recueillis fichiers de données évalués tels que ENDF / B, JEFF, JENDL, etc., la plupart d'entre eux disponible.

Chapitre III

Les formules empiriques et semi empirique

III.1 Introduction

Dans ce chapitre on donne, les meilleurs formules et les plus récentes présentés pour reproduire des données expérimentales de la section efficace de la réaction neutronique ($n, {}^3\text{He}$), ou les prédire dans des énergies très élevée (~ 20 MeV) ou l'expérience resté incapable de les mesurées pour des problème de radioprotection. Ces formules sont : empiriques (ou la description de la réaction s'appuie sur le modèle du noyau composé et le modèle d'évaporation) ou semi empirique (qui utilise le modèle de pré-équilibre). Ces formules ont été proposées pour une énergie de neutron égale à 14,6 MeV et pour des noyaux cibles avec un nombre de masse compris entre $A=36$ et $A=187$. Plusieurs formules empiriques ou semi empiriques ont été proposées par Lishan et Yuling (1992), Atosoy et Dokmen (1995), Qaim et al. (1980), Yettou et Belgaid (2014), Broeders et Konobeyev (2007), Aydin et al. (2008b) et Bolukdemir et al. (2010).

Le tableau suivant présente les sections efficaces mesurées qui existent pour 13 cibles, avec l'énergie de la réaction neutronique ($n, {}^3\text{He}$), l'énergie du neutron incident :

noyaux cibles	produits de réaction	Valeurs Q (MeV)	$\Delta\sigma$ (μb)	σ_{exp} (μb)	Références	énergie seuil (MeV)	énergie du projectile
$^{31}_{15}P$	$^{29}_{13}Al + ^3_2He$	-13.095	6.5	13	Qaim(1974)	13.5	14.6
$^{41}_{19}K$	$^{39}_{19}Cl + ^3_2He$	-12.619	3	6	Qaim(1978)	12.9	14.6
$^{45}_{21}Sc$	$^{43}_{19}K + ^3_2He$	-11.355	4	8.6	Qaim(1974)	11.6	14.6
$^{59}_{27}Co$	$^{57}_{25}Mn + ^3_2He$	-11.602	2.1	4.6	Qaim(1974)	11.8	14.6
$^{63}_{29}Cu$	$^{61}_{27}Co + ^3_2He$	-9.541	2	4	Qaim(1978)	9.69	14.6
$^{75}_{33}As$	$^{73}_{31}Ga + ^3_2He$	-10.194	1.9	3.5	Qaim(1974)	10.3	14.6
$^{93}_{41}Nb$	$^{91}_{39}Y + ^3_2He$	-7.721	1.5	3.1	Qaim(1974)	7.8	14.6
$^{133}_{55}Cs$	$^{131}_{53}I + ^3_2He$	-7.488	3	5	Csikai et Szalay(1965)	7.54	14.6
$^{142}_{58}Ce$	$^{140}_{56}Ba + ^3_2He$	-8.122	1.3	3.3	Qaim(1978)	8.18	14.6
$^{159}_{65}Tb$	$^{157}_{63}Eu + ^3_2He$	-6.933	1.8	4.6	Qaim(1978)	6.97	14.7
$^{169}_{69}Tm$	$^{167}_{67}Ho + ^3_2He$	-5.854	2	4	Qaim(1978)	5.88	14.6
$^{18}_{73}Ta$	$^{179}_{71}Lu + ^3_2He$	-6.240	1.5	3.4	Qaim(1974)	6.27	14.6
$^{18}_{75}Re$	$^{18}_{73}Ta + ^3_2He$	-6.682	3	4	Diksic et al(1974)	6.71	14.6

Tableau III.1 : Section efficaces mesurées par Qaim ,Csikai et Szalay ,Diksic et al.

III.2. Modèles nucléaires

Le neutron peut exciter le noyau cible, ce qui génère autant de pics de diffusion que d'états accessibles. On parle, dans ce cas, d'interaction directe et on utilise le **modèle optique** à voies couplées qu'on interprète par le modèle de DWBA (distorted-wave born approximation).

Le neutron peut aussi être absorbé par le noyau cible, le noyau résultant de cette réaction peut être excité et se déexcite en émettant des particules. Ces particules auront une énergie d'émission faible. On observe un spectre d'évaporation qui est décrit par le **modèle du noyau composé**. Alors, que les réactions directes correspondent à des processus rapides, l'évaporation correspond à un processus lent durant lequel le système (cible + projectile) a le temps de s'équilibrer pour former un noyau composé.

Entre ces deux cas extrêmes existe une zone de recouvrement décrite par le **modèle de pré-équilibre**, pour des énergies allant jusqu'à 100 MeV.

Le calcul des sections efficaces nécessite une prise en compte des trois processus afin de traiter de manière cohérente l'ensemble des voies ouvertes [7].

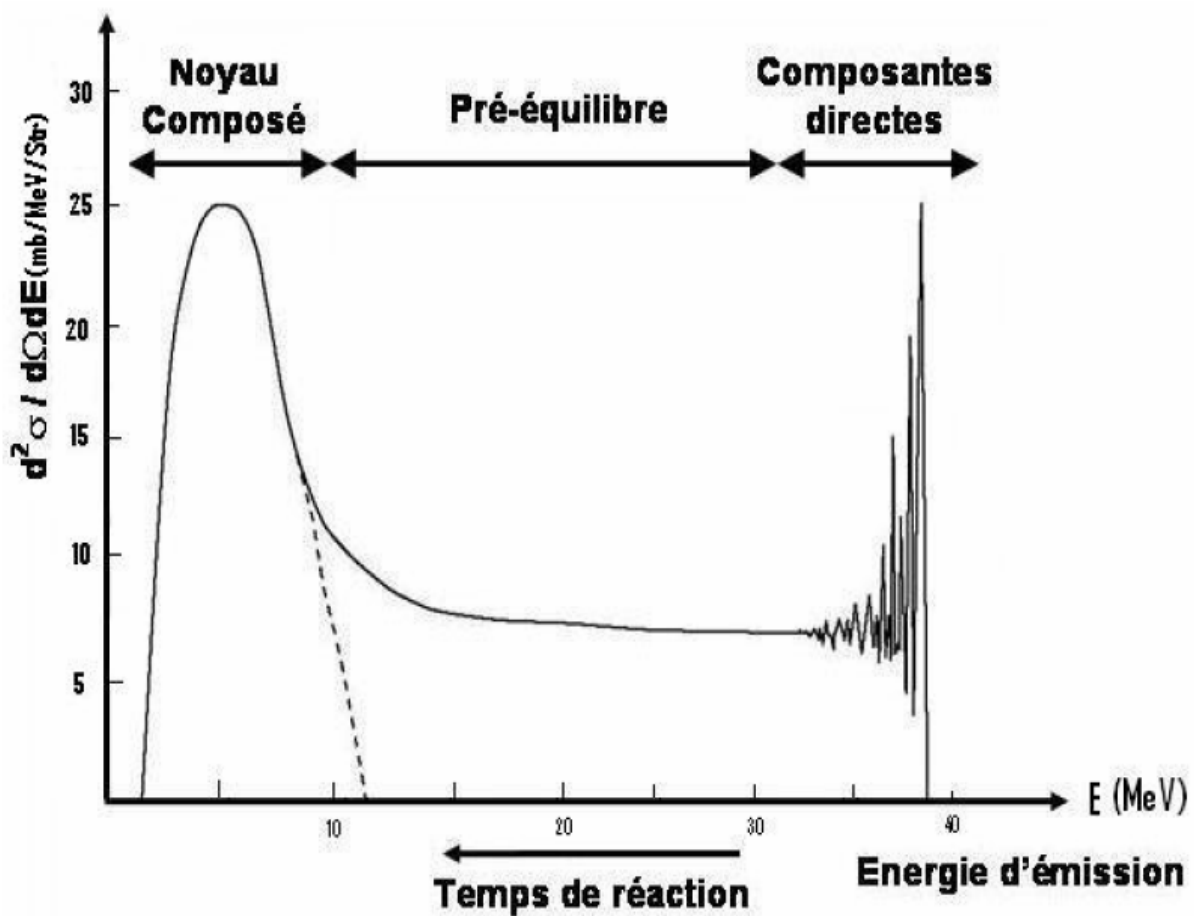


Figure III.1: Spectre d'émissions typique dans une réaction nucléaire

III.3. Les formules empiriques

Des modèles nucléaires sont souvent nécessaires pour fournir une estimation des sections efficaces des réactions induites par neutrons, en particulier si des données expérimentales sont indisponibles en raison des difficultés expérimentales.

Dans la littérature, des études systématiques ont été réalisées pour le calcul des sections efficaces de la réaction (n,3He) autour de 14 MeV.

Les formules empiriques contiennent en règle générale la dépendance exponentielle des sections efficaces avec le nombre de neutrons et de protons dans les noyaux. La formule empirique donnée par Levkovskii(1964) a montré que la dépendance directe de la section efficace de réaction en fonction du paramètre d'asymétrie $(N-Z)/A$. Les sections efficaces $\sigma(n, x)$ empiriques des réactions induites par les neutrons rapides peuvent être approximativement données par formule de Levkovskii[1].

$$\sigma(n, x) = C \sigma_{in} e^{(a.s)} \quad (\text{III.1})$$

Avec :

C, a : sont les paramètres d'ajustement à fixer pour générer les données expérimentales.

$s=(N-Z)/A$: paramètre d'asymétrie

σ_{in} est la section efficace inélastique donnée par:

$$\sigma_{in} = \pi r_0^2 \left(A^{1/3} + 1 \right)^2 \quad (\text{III.2})$$

$$r_0^2 = 1.2 \text{ fm} ,$$

A noter que cette formule réussit à décrire des réactions neutroniques (n,3He), (n,4He) ou des (n,p).

L'étude systématique de la section efficace de la réaction (n,³He) a été effectuée par Qaim[12].

En 1978, Qaim a suggéré une formule empirique de la section efficace des réactions (n, ³He) dépendante du paramètre d'asymétrie $(N - Z)/A$. Elle peut être obtenue en utilisant seulement le modèle simple d'évaporation sans prendre en compte le moment angulaire[12] :

$$\sigma(n, 3He) = 0.08475 \left(A^{1/3} + 1 \right)^2 \exp(-1.6467(N - Z)/A) \quad (\text{III.3})$$

En 1987, Qaim a suggéré une autre relation [13]

$$\sigma(n, 3He) = 0.54 \left(A^{1/3} + 1 \right)^2 \exp(-10(N - Z)/A) \quad (\text{III.4})$$

D'autre part, Lishan et Yuling (1992) ont proposé que la section efficace systématique des réactions (n, ^3He) à l'énergie 14,6 MeV puisse être exprimée en fonction du paramètre d'asymétrie en utilisant deux paramètres comme suit [1] :

$$\sigma(n, ^3\text{He}) = 0.918 \left(A^{1/3} + 1 \right)^2 \exp(-11.338(N - Z)/A) \quad (\text{III.5})$$

En 1995, Atasoy et Dokmen[14] ont proposé une expression empirique pour prédire les sections efficaces de la réaction (n, ^3He) ,ils ont étudié la dépendance de la section efficace du (n, ^3He) en fonction de l'excès des neutrons du noyau cible (N-Z) et la différence entre l'énergie cinétique du neutron et l'énergie d'excitation du noyau cible ($E_n - E_{th}$) :

$$\sigma(n, ^3\text{He}) = a e^{-b(N-Z)} (E_n - E_{th}) \quad (\text{III.6})$$

Où :

a,b : sont des paramètres d'ajustement ($a=2.774 \mu\text{b}/\text{MeV}$ et $b=0.0526$ pour $1 < (N-Z) < 43$).

En 2015, Mustafa Yigita proposé une nouvelle formule donnant une dépendance exponentielle avec la valeur Q des réactions nucléaires (n, ^3He)[1], elle est basé sur le modèle statistique, la valeur de la réaction Q contient l'effet de parité, elle est donnée comme suit :

$$\sigma(n, ^3\text{He}) = 0.0042 \left(A^{1/3} + 1 \right)^2 \exp(-0.375 Q) \quad (\text{III.7})$$

III.4. Les formules semi empiriques

L'approche semi-empirique de la systématique des réactions nucléaires a été proposée pour des énergies du neutron de 14,6 MeV et 20 MeV, elle est basé sur l'utilisation du modèle exciton de pré-équilibre pour des noyaux cible de nombre de masse $A \geq 40$.

En 2006, Broeders et al. ont suggéré une relation semi-empirique suivante :

$$\sigma(n, ^3\text{He}) = \pi r_0^2 \left(A^{1/3} + 1 \right)^2 A^{-2.3} \left(1.6534 \frac{N-Z+1}{A} + 0.15257 \right)^2 \quad (\text{III.8})$$

Où :

$$r_0 = 1.3 \text{ fm}$$

En 2010, Bolukdemir et al. ont proposé une formule qui prend en compte la section efficace non élastique donnée par le modèle optique, cela et pour des énergies du neutron allant de 14 MeV jusqu'à 15 MeV, ils écrivent la section efficaces du (n, ^3He) comme suivent :

$$\sigma(n, ^3\text{He}) = C \sigma_{ne-opt} e^{b/s} \quad (\text{III.9})$$

b et s sont les paramètres d'ajustement déterminés par la méthodes des moindres carrés.

S est le paramétré d'asymétrie.

σ_{ne-opt} est la section efficace non élastique optique.

En 2014, L.Yettou et M.Belgaid ont obtenu une formule semi-empirique en dominant l'effet coulombien et l'effet de la diffusion coulombienne, cette formule contient trois paramètres [15]:

$$\sigma_{(n,3He)} = C_1 \left(1 + A^{1/3}\right)^2 \exp \left[C_2 \left(\frac{Z-1}{A^{1/3}}\right) + C_3 \left(\frac{Z-1}{A^{4/3}}\right)^3 \right] \quad (\text{III.10})$$

Où :

$\frac{Z-1}{A^{1/3}}$: terme de l'effet de coulomb

$\left(\frac{Z-1}{A^{4/3}}\right)^3$: terme de l'effet de la diffusion coulombienne.

Les paramètres C_1, C_2 et C_3 sont fixés respectivement égaux à : 0,05583 , -0,42631 , -61,492 .

1. Test des formulées proposées

Des mesures statistiques sont utilisées pour tester les formules empiriques et semi empiriques proposées tableau III.2, la meilleure formule a une valeur minimale de Σ défini par:

$$\Sigma = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\sigma_{exp}^i - \sigma_{cal}^i}{\Delta \sigma_{exp}^i} \right)^2 \quad (\text{III.11})$$

Avec : Σ est le Paramètre du moindre carrée

N est le nombre des cible prises dans le calcul.

σ_{exp}^i est la section efficace mesurée pour la cible i

$\Delta \sigma_{exp}^i$ est l'erreur absolue correspondante.

σ_{cal}^i est la section efficace calculée pour la cible i.

Le second paramètre de test est χ^2 défini par :

$$\chi^2 = \frac{\Sigma}{N - n_0} \quad (\text{III.12})$$

Où : χ^2 : paramètre des échantillons .

N=nombre des cibles, $n_0 = 3$, est nombre de paramètres d'ajustement.

Ces deux paramètres de test Σ et χ^2 sont donnés pour les différentes formules empiriques et semi empiriques présentées dans ce chapitre dans le tableau III.2

lecteur	Régine nombre da masse	Formule de sections	x^2	Σ
Formule proposée	$31 \leq A \leq 187$	$\sigma(n, 3He) = 0.009 (A^{1/3} + 1)^2 \exp(-0.31 * Q + 0.2)$	0.72	7.20
Mostafa (2015)	$31 \leq A \leq 187$	$\sigma(n, 3He) = 0.0042 (A^{1/3} + 1)^2 \exp(-0.375Q)$	0.93	10.23
Broeders et konobeyev(2007)	$31 \leq A \leq 187$	$\sigma(n, 3He) = \pi r_0 (A^{1/3} + 1)^2 A^{-2.3} \left(1.6534 \frac{N - Z + 1}{A} + 0.15257 \right)$	1.51	16.61
Qaim(1978)	$31 \leq A \leq 187$	$\sigma(n, 3He) = 0.08475 (A^{1/3} + 1)^2 \exp\left(-1.6467 \frac{N - Z}{A}\right)$	1.99	21.89

Tableau III.2 : Formule empiriques et semi empiriques avec le paramètre de test x^2 .

Chapitre IV :

Evaluation de la formule empirique pour le calcul de la section efficace du (n,³He)

Résultats et discussion

IV.1 Introduction

Dans le quatrième chapitre ,nous calculerons la section efficace élastique avec une nouvelle expressions qu'est identique à l'expression M.Yigit, un programme en fortran est écrit pour déterminer les meilleures paramétrés qui permettent de reproduire les données expérimentales.

IV.2. Formules empiriques existant pour calculer la section efficace (n,3He)

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté plusieurs formules empiriques pour régénérer les sections efficaces expérimentale de la réaction neutronique (n,3He) pour une énergie de neutrone 14,6 MeV et 20 MeV. Lesquels sont résumés dans le tableau IV.1. dans ce travail, on utilise 13 cibles utilisées dans les travaux de Qaim ,Csikai et Szalay ,Diksic et al.

Dans ce chapitre on évalue la formule proposée par M. Yigit [1] avec deux paramètres qui sont ajustés pour reproduire les expérimentales. On écrit un programme en fortran pour générer d'autre paramètres et améliorer paramètres des moindres carrées.

Rappelons que ces paramètres statistiques sont :

1. Paramètre Σ définit par:

$$\Sigma = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\sigma_{exp}^i - \sigma_{cal}^i}{\Delta \sigma_{exp}^i} \right)^2 \quad (IV.1)$$

Σ : Paramètre du moindre carrée

2. paramètre x^2 définit par:

$$x^2 = \frac{\Sigma}{N - n_0} \quad (IV.2)$$

x^2 :paramètre des échantillons .

Ces deux paramètres-test doivent avoir une valeur minimale.

Au début , on va faire quelque calcul pour argumenter l'utilisation d'une formule dépendante de l'énergie de la réaction Q et de la section efficace inélastique .

	Auteur	Formule de section efficace (n,3He)
1	Qaim (1978)	$\sigma(n, 3He) = 0.008475 \left(A^{1/3} + 1 \right)^2 \exp(-1.6467(N - Z)/A)$
2	Qaim (1987)	$\sigma(n, 3He) = 0.54 \left(A^{1/3} + 1 \right)^2 \exp(-10(N - Z)/A)$
3	lishan et yuling (1992)	$\sigma(n, 3He) = 0.918 \left(A^{1/3} + 1 \right)^2 \exp(-11.338(N - Z)/A)$
4	d'Atasoy et Dokmen (1995)	$\sigma(n, 3He) = a e^{-b(N-Z)} (E_n - E_{th})$
5	Qaim (1995)	$\sigma(n, 3He) = 2.774 \left(A^{1/3} + 1 \right)^2 \exp(-0.0526Q)$
6	M. Yigit (2015) [10]	$\sigma(n, 3He) = 0.0042 \left(A^{1/3} + 1 \right)^2 \exp(-0.375Q)$

Tableau IV.1 : Formules empiriques de section efficace du (n,3He)

IV.3 Variation de l'énergie de la réaction (n, ³He)

L'énergie de la réaction en fonction du nombre de masse A est schématisées sur la figure IV.1, l'énergie Q est négative puisque ces réactions sont des réactions absorbantes, elle est comprise entre -5 MeV et -13 MeV. L'énergie Q croit en fonction du nombre de masse A ce qui explique la difficulté de la réalisation de la réaction neutronique (n,3He).

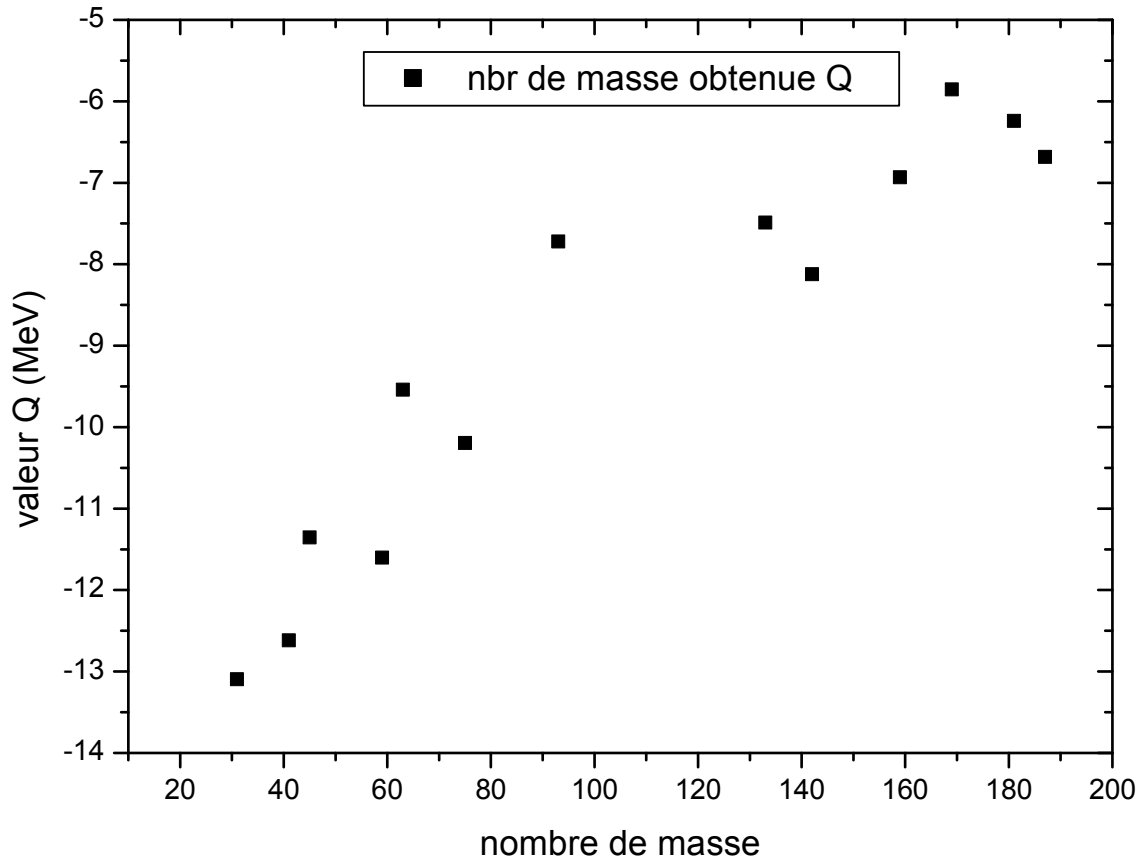


Figure IV.1 : Valeur de la réaction Q(MeV) des cibles utilisées dans nos calculs

Les données expérimentales de section efficaces sont mesurées par (1965), Qaim (1974,1978) et Diksic et al (1974).Les sections efficaces de la réaction à l'exception du Cs sont prises à l'énergie neutronique de 14,6 MeV. Les sections efficaces sont mesurées par Csikai et Szalay (1965) à une énergie de 14,7MeV et 14,6 MeV. Ces données mesurées ont été extraites de la base de données EXFOR (2015).

En outre, la valeur de la réaction Q pour les réactions considérées a été obtenue du calculateur du laboratoire national de Brookhaven (Pritychenko et Sonzogni 2015).

IV. 4. Calcul des rapports $\frac{\sigma_{exp}}{\sigma_{in}}$ et $\frac{\Delta\sigma_{exp}}{\sigma_{in}}$

Nous avons calculé le rapport entre la section efficace expérimentale et la section efficace non élastique $\frac{\sigma_{exp}}{\sigma_{in}}$, ainsi que le rapport entre l'erreur expérimentale et la section efficace non élastique $\frac{\Delta\sigma_{exp}}{\sigma_{in}}$, les résultats de calcul sont donnés dans le tableau (IV.2) :

noyaux cibles	produits de réaction	$\sigma_{exp}(n, 3He)$ (μb)	$\Delta\sigma_{exp}(n, 3He)$ (μb)	σ_{in} (μb)	$\frac{\sigma_{exp}}{\sigma_{in}}$	$\frac{\Delta\sigma_{exp}}{\sigma_{in}}$
$^{31}_{15}P$	$^{29}_{13}Al + ^3_2He$	13	6.5	17.15	0.75	0.37
$^{41}_{19}K$	$^{39}_{19}Cl + ^3_2He$	6	3	19.78	0.30	0.15
$^{45}_{21}Sc$	$^{43}_{19}K + ^3_2He$	8.6	4	20.76	0.41	0.19
$^{59}_{27}Co$	$^{57}_{25}Mn + ^3_2He$	4.6	2.1	23.94	0.19	0.08
$^{63}_{29}Cu$	$^{61}_{27}Co + ^3_2He$	4	2	24.79	0.16	0.08
$^{75}_{33}As$	$^{73}_{31}Ga + ^3_2He$	3.5	1.9	27.21	0.12	0.06
$^{93}_{41}Nb$	$^{91}_{39}Y + ^3_2He$	3.1	1.5	30.58	0.10	0.04
$^{133}_{55}Cs$	$^{131}_{53}I + ^3_2He$	5	3	37.26	0.13	0.08
$^{142}_{58}Ce$	$^{140}_{56}Ba + ^3_2He$	3.3	1.3	38.65	0.08	0.03
$^{159}_{65}Tb$	$^{157}_{63}Eu + ^3_2He$	4.6	1.8	41.18	0.11	0.04
$^{169}_{69}Tm$	$^{167}_{67}Ho + ^3_2He$	4	2	42.62	0.09	0.04
$^{18}_{73}Ta$	$^{179}_{71}Lu + ^3_2He$	3.4	1.5	44.31	0.07	0.03
$^{18}_{75}Re$	$^{18}_{73}Ta + ^3_2He$	4	3	45.13	0.08	0.06

Tableau IV.2 : Résultats de calcul des rapports $\frac{\sigma_{exp}}{\sigma_{in}}$ et $\frac{\Delta\sigma_{exp}}{\sigma_{in}}$.

Les résultats de calcul des rapports $\frac{\sigma_{exp}}{\sigma_{in}}$ et $\frac{\Delta\sigma_{exp}}{\sigma_{in}}$ sont schématisés en fonction de l'énergie Q(MeV) dans la figure IV.2 :

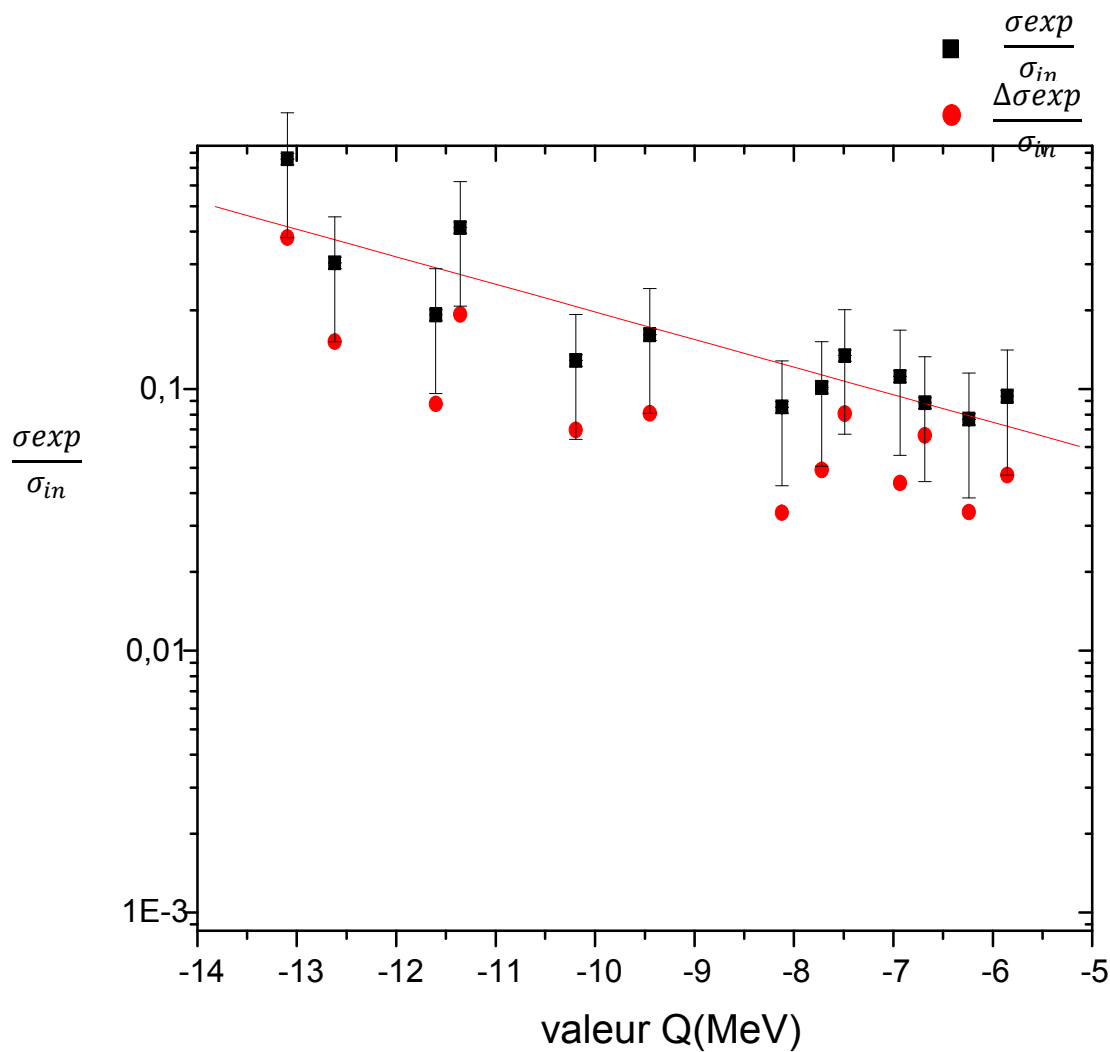


Figure IV.2 : Les rapports $\frac{\sigma_{exp}}{\sigma_{in}}$ et $\frac{\Delta\sigma_{exp}}{\sigma_{in}}$ en fonction de l'énergie Q.

IV.5 Formule empirique proposée

Basé sur ce qui précède, ainsi sur la variation de la dépendance de l'énergie Q et les résultats de calcul des rapports $\frac{\sigma_{exp}}{\sigma_{in}}$ et $\frac{\Delta\sigma_{exp}}{\sigma_{in}}$ pour les 13 cibles considérées. On utilise la formule empirique de M. Yigit [1] qui donne une section efficace dépendante exponentiellement en fonction de l'énergie Q et qui dépend linéairement en fonction de la section non élastique, cette formule contient deux paramètres à ajuster. Donc elle s'écrit sous la forme :

$$\sigma_{cal(1)}(n, 3He) = C\sigma_{in} \exp(a \cdot Q) \quad (IV.3)$$

Avec :

$$\sigma_{in} = (A^{1/3} + 1)^2 \quad (IV.4)$$

Où :

$\sigma_{cal_p}(n, 3He)$: section efficace calculée de la réaction (n,3He)

σ_{in} : Section efficace inélastique

Q : Énergie de la réaction.

A : Nombre atomique.

Les paramètres C et a sont respectivement égaux à 0.011 et -0,31,

Donc la formule (IV.1) devient:

$$\sigma_{cal(1)}(n, 3He) = 0.011 (A^{1/3} + 1)^2 \exp(-0.31 \cdot Q) \quad (IV.5)$$

Cette formule est appliquée pour mesurer la section efficace de 13 noyaux avec un nombre de masse A de 31 à 187.

IV.6. Résultats et discussion

Nous avons utilisé la formule évaluée avec deux nouveaux paramètres pour générer des sections efficaces de la réaction (n,3He) à 14,6 MeV, ensuite on fait le calcul du rapport entre les données expérimentales et celles calculées $\frac{\sigma_{exp}}{\sigma_{cal(1)}}$. On calcule aussi le rapport entre l'erreur absolue des données

expérimentales et les données calculées $\frac{\Delta\sigma_{exp}}{\sigma_{cal(1)}}$ (tableau IV.3). On réfère la section efficace calculée

par notre formule par $\sigma_{cal(1)}$ et celle calculée par la formule de M. Yigit [1] par $\sigma_{cal(2)}$. Ces calculs nous permettent de vérifier la qualité de la formule proposée avec des nouveaux paramètres. Nous obtenons les résultats suivants:

noyaux cibles	produits de réaction	σ_{exp} (μb)	Valeur Q (MeV)	$\sigma_{cal(1)}$ (μb)	$\frac{\sigma_{exp}}{\sigma_{cal(2)}}$	$\frac{\sigma_{exp}}{\sigma_{cal(1)}}$
$^{31}_{15}P$	$^{29}_{13}Al + ^3_2He$	13	-13.095	10.92	1.32	1.19
$^{41}_{19}K$	$^{39}_{19}Cl + ^3_2He$	6	-12.619	10.87	0.63	0.55
$^{45}_{21}Sc$	$^{43}_{19}K + ^3_2He$	8.6	-11.355	7.71	1.39	1.11
$^{59}_{27}Co$	$^{57}_{25}Mn + ^3_2He$	4.6	-11.602	9.59	0.59	0.47
$^{63}_{29}Cu$	$^{61}_{27}Co + ^3_2He$	4	-9.541	5.24	1.07	0.78
$^{75}_{33}As$	$^{73}_{31}Ga + ^3_2He$	3.5	-10.194	7.05	0.66	0.49
$^{93}_{41}Nb$	$^{91}_{39}Y + ^3_2He$	3.1	-7.721	3.68	1.33	0.84
$^{133}_{55}Cs$	$^{131}_{53}I + ^3_2He$	5	-7.488	4.17	1.92	1.19
$^{142}_{58}Ce$	$^{140}_{56}Ba + ^3_2He$	3.3	-8.122	5.26	0.96	0.62
$^{159}_{65}Tb$	$^{157}_{63}Eu + ^3_2He$	4.6	-6.933	3.88	1.97	1.18
$^{169}_{69}Tm$	$^{167}_{67}Ho + ^3_2He$	4	-5.854	2.87	2.48	1.39
$^{187}_{73}Ta$	$^{179}_{71}Lu + ^3_2He$	3.4	-6.240	3.37	1.75	1.00
$^{187}_{75}Re$	$^{185}_{73}Ta + ^3_2He$	4	-6.682	3.93	1.72	1.01

Tableau IV.3 : Les rapports $\frac{\sigma_{exp}}{\sigma_{cal(1)}}$ et $\frac{\sigma_{exp}}{\sigma_{cal(2)}}$ obtenus pour les 13 cibles étudiées.

Ces résultats sont schématisés en fonction de l'énergie Q (MeV) dans figure IV.3 .

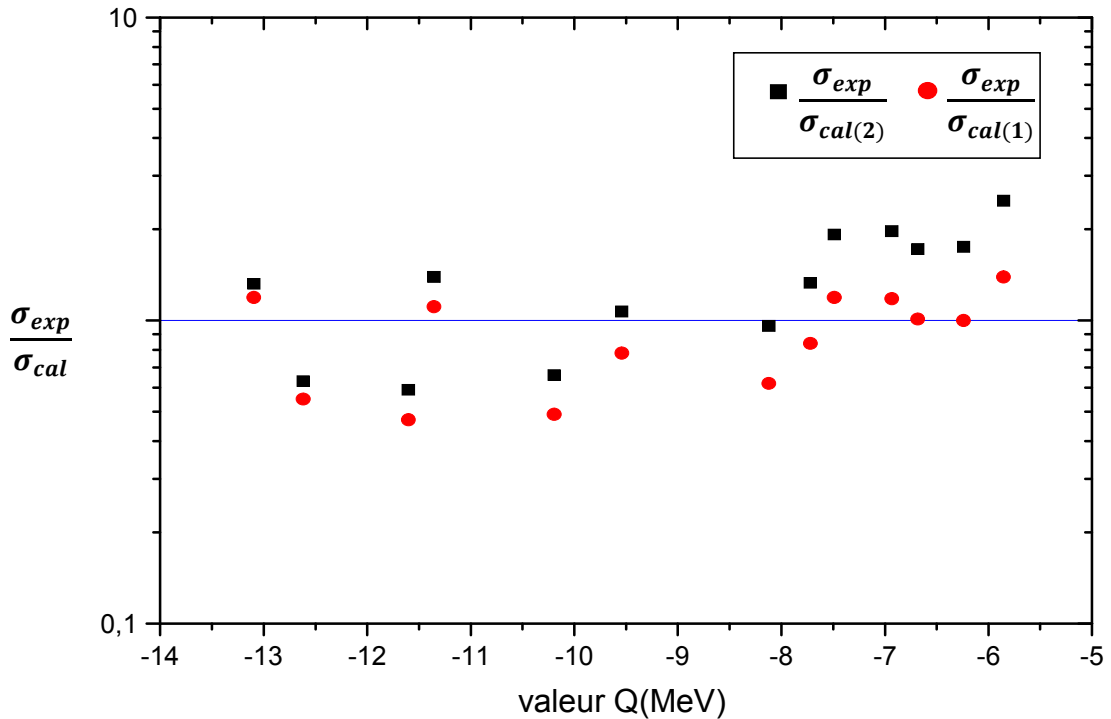


Figure IV.3 : Les rapports $\frac{\sigma_{exp}}{\sigma_{cal(1)}}$ et $\frac{\sigma_{exp}}{\sigma_{cal(2)}}$ obtenus pour les 13 cibles étudiées en fonction de l'énergie da la réaction Q.

Le calcul des rapports $\frac{\sigma_{exp}}{\sigma_{cal(1)}}$ et $\frac{\sigma_{exp}}{\sigma_{cal(2)}}$ permet de vérifier la qualité de la formule proposée avec les nouveaux valeurs des paramètres, on remarque que pour une énergie de réaction Q inferieure en valeur absolue à 8 MeV, nos section efficaces sont plus proche aux données expérimentales. Ce qui correspond aux cibles : $^{31}_{15}P$, $^{45}_{21}Sc$, $^{93}_{41}Nb$, $^{133}_{55}Cs$, $^{159}_{65}Tb$, $^{169}_{69}Tm$, $^{18}_{73}Ta$, $^{18}_{75}Re$.

noyaux cibles	produits de réaction	Valeurs Q (MeV)	$\sigma_{cal_{(1)}}(n, 3He)$ (μb)	$\sigma_{cal_{(2)}}[9]$ (μb)	$\sigma_{exp}(n, 3He)$ (μb)
$^{31}_{15}P$	$^{29}_{13}Al + ^3_2He$	-13.095	10.92	9.78	13
$^{41}_{19}K$	$^{39}_{19}Cl + ^3_2He$	-12.619	10.87	9.44	6
$^{45}_{21}Sc$	$^{43}_{19}K + ^3_2He$	-11.355	7.71	6.16	8.6
$^{59}_{27}Co$	$^{57}_{25}Mn + ^3_2He$	-11.602	9.59	7.80	4.6
$^{63}_{29}Cu$	$^{61}_{27}Co + ^3_2He$	-9.541	5.24	3.73	4
$^{75}_{33}As$	$^{73}_{31}Ga + ^3_2He$	-10.194	7.05	5.23	3.5
$^{93}_{41}Nb$	$^{91}_{39}Y + ^3_2He$	-7.721	3.68	2.32	3.1
$^{133}_{55}Cs$	$^{131}_{53}I + ^3_2He$	-7.488	4.17	2.59	5
$^{142}_{58}Ce$	$^{140}_{56}Ba + ^3_2He$	-8.122	5.26	3.41	3.3
$^{159}_{65}Tb$	$^{157}_{63}Eu + ^3_2He$	-6.933	3.88	2.33	4.6
$^{169}_{69}Tm$	$^{167}_{67}Ho + ^3_2He$	-5.854	2.87	1.61	4
$^{187}_{73}Ta$	$^{179}_{71}Lu + ^3_2He$	-6.240	3.37	1.93	3.4
$^{187}_{75}Re$	$^{185}_{73}Ta + ^3_2He$	-6.682	3.93	2.32	4

Tableau IV.4: Sections efficaces calculées par notre formule $\sigma_{cal_{(1)}}$ et celle calculée par la formule de M. Yigit [1] $\sigma_{cal_{(2)}}$ avec celles mesurées $\sigma_{exp}(n, 3He)$.

Ensuite nous avons tracé les sections efficaces calculées avec celles expérimentales, les résultats sont présentés sur la Figure IV.4 .

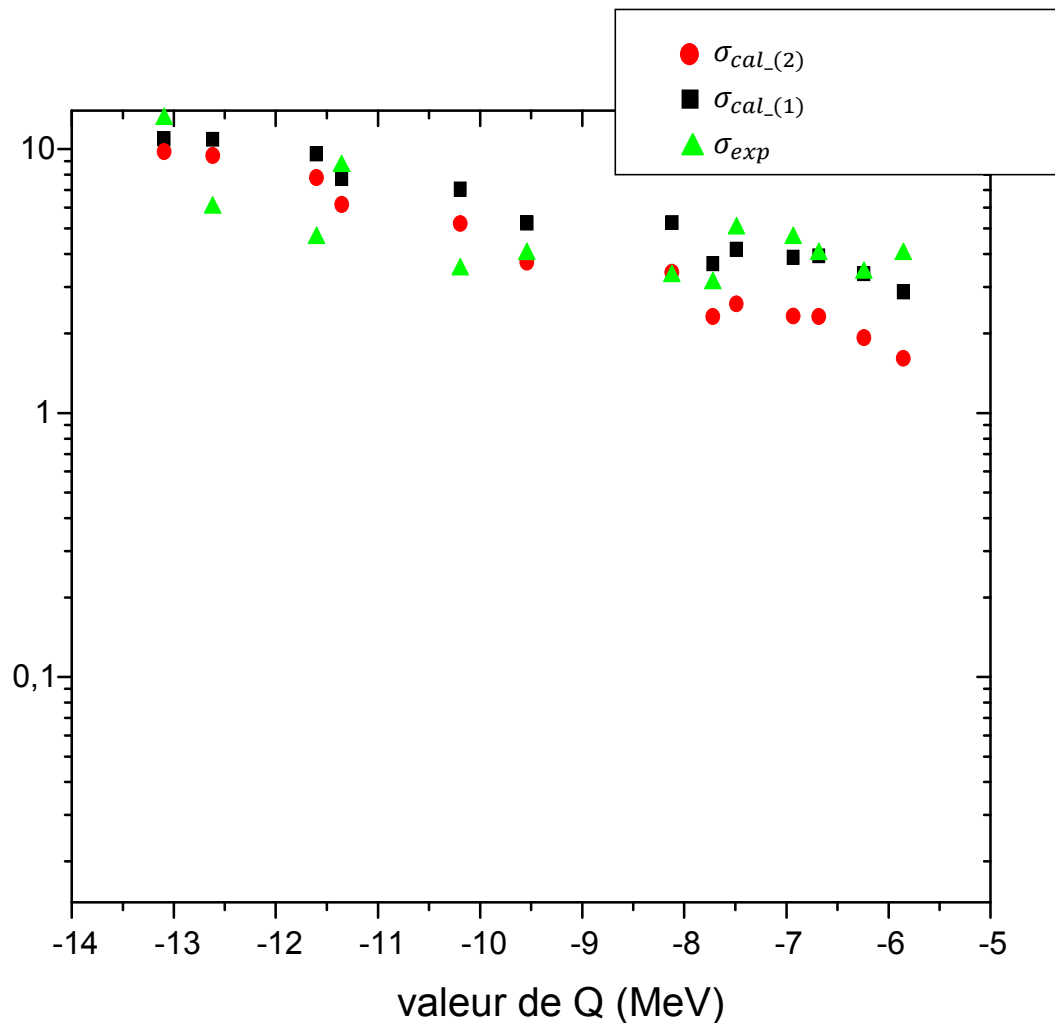


Figure IV.4 : Sections efficaces calculées $\sigma_{cal_(2)}$ par notre formule et celle par M. Yigit [1] $\sigma_{cal_(1)}$ avec celles mesurées en fonction de Q (MeV)

On remarque, un rapprochement satisfaisant des données calculées vers celles expérimentales en particulier pour une énergie de réaction supérieure en valeur inférieure en valeur absolue à 8 MeV, en particulier pour les cibles : $^{31}_{15}P$, $^{45}_{21}Sc$, $^{93}_{41}Nb$, $^{133}_{55}Cs$, $^{159}_{65}Tb$, $^{169}_{69}Tm$, $^{18}_{73}Ta$, $^{18}_{75}Re$. Donc notre formule améliore le calcul de la section efficace de la réaction (n,3He) pour 8 cibles parmi les 13 cibles étudiés.

IV.7 Calcul des paramètres statistiques Σ et χ^2 :

Dans cette section on calcul les paramètres de test Σ et χ^2 :

$$\Sigma = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\sigma_{exp}^i - \sigma_{cal}^i}{\Delta \sigma_{exp}^i} \right)^2 \quad (IV.6)$$

$$x^2 = \frac{\Sigma}{N - n_0} \quad (IV.7)$$

Où :

N=13, nombre des cibles, $n_0 = 2$, nombre de paramètres.

Pour notre calcul, on a obtenu une valeur de $x^2 = 0,65$, comparés aux autres valeurs obtenues pour d'autres formules proposées auparavant (tableau IV.5), on constate que notre formule est de bonne qualité, ce qui assure sa puissance de reproduire les données expérimentales pour les réactions neutroniques (n,³He) à 14,6 MeV.

	A des cibles considérées	Formule de sections	x^2
Notre formule	$31 \leq A \leq 187$	$\sigma(n, 3He) = 0.011 (A^{1/3} + 1)^2 \exp(-0.31 * Q)$	0.65
M.Yigit [9](2015)	$31 \leq A \leq 187$	$\sigma(n, 3He) = 0.0042 (A^{1/3} + 1)^2 \exp(-0.375Q)$	0.93
Broederset konobeyev(2007)	$31 \leq A \leq 187$	$\sigma(n, 3He) = \pi r_0 \left(A^{1/3} + 1 \right)^2 A^{-2.3} \left(1.6534 \frac{N - Z + 1}{A} + 0.15257 \right)$	1.51
Qaim(1978)	$31 \leq A \leq 187$	$\sigma(n, 3He) = 0.08475 \left(A^{1/3} + 1 \right)^2 \exp \left(-1.6467 \frac{N - Z}{A} \right)$	1.99

Tableau IV.5 : le paramètre x^2 des formules empiriques

Conclusion

Les réactions nucléaires induites par les neutrons rapides, présentent un grand intérêt dans tous les domaines : de la recherche nucléaire, de la technologie des réacteurs et de la structure nucléaire

Le but de ce travail est d'élaborer une expression empirique basé sur celle de M. Yigit [1] avec deux nouvelles valeurs des paramètres, en utilisant les données de la section efficace de la réaction nucléaire expérimentale (n, ³He) à 14,6 MeV

Les valeurs des sections efficaces (n, ³He) ont été calculées et évaluées pour 13 noyaux cibles de nombre de charge Z de 15 à 75, cela est pour une énergie de neutron incident de 14,6 MeV. Jusqu'à maintenant, les sections efficaces des réactions nucléaires (n, ³He) sont principalement mesurées en utilisant les méthodes d'activation et de séparation radiochimique développées par Qaim (1974, 1978).

La formule empirique suggérée pour les sections efficace avec ajustement de deux paramètres pour les réactions nucléaires (n, ³He) a bien reproduit les valeurs mesurées, les corrélations systématiques des réactions nucléaires (n, ³He) à une énergie neutronique de 14,6 MeV ont pu être exprimées au moyen de la valeur de Q.

Dans ce travail, le paramètre des moindres carrée obtenus a une valeur minimale ($x^2 = 0.65$), ce qui montre que les dépendances directes de la valeur Q dans l'émission de particules ³He provenant des réactions induites par neutrons à 14,6 MeV ont un rôle dominant.

References bibliographiques

- [1] Mustafa Yigit ,Empirical formula on $(n,^3\text{He})$ reaction cross section at 14.6 MeV neutrons ,Applied Radiation and Isotopes 105,2015,P 15-19.
- [2]Tiina Suomijärvi,Physique Nucléaire et Applications, P 19.
- [3]<https://www.nuclear-power.net/nuclear-power/reactor-physics/nuclear-engineering-fundamentals/neutron-nuclear-reactions/>,google,2018,time2 :07.
- [4] Bar Harbor ,neutron physics ,IUNPSS, P 05.
- [5] Mme BELOUADAH Naima, Détermination des sections efficaces des réactions nucléaires induites par des neutrons thermiques et rapides, Thèse doctorat ,USTHB ,2015,P 7-8-9.
- [6] Brian R Martin ,Nuclear and Particle Physics An Introduction, UCL,2006,P59.
- [7] AZIZOU Abdellah ,Développement d'un modèle semi-empirique pour calculer les sections efficaces des réactions nucléaires induites par les neutrons rapides, mémoire de master, UDBKM, 2016,P09 .
- [8]YETTOU Leila, Analyse des réactions nucléaires induites par des neutrons rapides dans le cadre des modèles d'évaporation et de pré-équilibre. Calcul des sections efficaces (n, p) et $(n, ^3\text{He})$, thèse doctorat, USTHB, 2016,P18-19.
- [9]A.Aydin, E.Tel. .B.Sarer, et A .Kaplan, A New comparison of empirical and semi-empirical Formula for the $(n,^3\text{He})$ Reaction Cross –sections at 14_15 MeV,J Fusion Energ ,2008,P 314.
- [10] Yao Lishan et JIN Yuling, Systematic of the $(n,^3\text{He})$ Reaction cross-sections at 14MeV,thèse doctorat,SNU,1992,P97.
- [11] <https://www-nds.iaea.org/exfor/exfor.htm>, 2018, time 16:31:20.
- [12] M.H.Bolukdemir .E.Tel.N.N.AKti,A. Aydin .S . OKuducu ,Improved formula for $(n,^3\text{He})$ Fusion Reactions Cross Sections Using Optical Model ,J Fusion Energ ,2010,P15.
- [13] S.M.QAIM, A Systematic Investigation of $(n,^3\text{He})$ Reactions at 14.6MeV and an Analysis of the Gross Trend in the cross section Data, Radiochimica Acta 25,1978,P15.
- [14] H.Atasoy and S.Dokmen ,prediction of $(n,^3\text{He})$ Cross_Sections Around 14MeV ,IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE ,VOL.42, 1995,P51.
- [15] L.Yettou M.Belgaid,SEMI-EMPIRICAL SYSTEMATICS OF $(n,^3\text{He})$ CROSS SECTIONS FOR 14.6MeVNEUTRONS,Applied Radiation and Isotopes94,2014,P51.

Résumé

Dans ce travail, une formule empirique de M. Yigit est évaluée avec des nouvelles valeurs des paramètres pour reproduire les sections efficaces expérimentales de la réaction nucléaire (n, 3He) de 13 cibles de nombre de masse de 31 à 187. Avec deux paramètres à ajuster, cette formule contient la dépendance exponentielle avec l'énergie de la réaction Q et une dépendance linéaire en fonction de la section efficace non élastique. Les paramètres statistiques des moindres carrés affirment la bonne qualité de cette formule pour des énergies neutroniques de 14,6 MeV.

Abstract

In this work, an empirical expression was suggested to fitting experimental data of cross section of (n,3He) nuclear reaction for 13 targets of A from 31 to 187. By adjusting two parameters, this formula contains linear dependence in non-elastic cross section and exponential dependency in Q reaction energy. Statistics parameters of least square affirm the quality of the proposed formula at 14.6 MeV neutrons.

ملخص

في هذا العمل تم اقتراح صيغة تجريبية للمقطع العرضي للتفاعل النووي النيوتروني (n,3He) لـ 13 نواة مستهدفة

عددها الكتلي يتراوح ما بين 31 الي 187

هذه الصيغة تم ضبطها بواسطة معاملين كما أنها تتعلق بالمقطع العرضي الغير مرن و كذلك تعتمد علي الدالة

الأسية التي تتغير بدلالة طاقة التفاعل وهذه الصيغة مدروسة عند طاقة النيوترون المحددة والمقدرة بـ 14.6 MeV

```

program section_efficace_propose
real s_in(13),s_cal(13),A(13),Q(13),sum,x,s_MY(13)
real s_exp(13),ds_exp(13),xc1(13),xc2(13),xin(13),din(13)
integer i,N,n0
!ce program calcul la section efficace
write (*,*)'ce program calcuez la section efficace propose'
write(*,*)'donnez les valeur nbr de masse et energie de reaction '
open(20,file='resulta_de_calcul.dat')
do i=1,13
write(*,*)'A='
read(*,*)A(i)
write(*,*)'Q='
read(*,*)Q(i)
! calcule la section efficace inélastique
s_in(i)=(A(i)**(1./3)+1)**2
write(*,*)'(A**1/3)**2,s_in(i)
!les formule des sections efficaces propose et M.Yigit
s_cal(i)=(0.011*s_in(i))*exp(-0.31*Q(i))
s_MY(i)=(0.0042*s_in(i))*exp(-0.375*q(i))
write(*,*)'s=',s_cal(i)
write(*,*)'s=',s_MY(i)
write(*,*)A(i),' ',Q(i),' ',s_in(i),' ',s_cal(i),' ',s_MY(i)
write(20,*)A(i),' ',Q(i),' ',s_in(i),' ',s_cal(i),' ',s_MY(i)
end do
write(*,*)'donnez les valeur exprimental de section efficace '
do i=1,13
read(*,*)s_exp(i)
end do
write(*,*)'donnez les erreur exprimental de section efficace'
do i=1,13
read(*,*)ds_exp(i)
end do
!le section efficace exprimental sur la section efficace inélastique
do i=1,13
xin(i)=s_exp(i)/s_in(i)

```

```
write(*,*)'xin=',xin(i)
```

```
write(20,*)'xin=',xin(i)
```

```
end do
```

! error de section efficace experimental sur la section efficace inélastique

```
do i=1,13
```

```
din(i)=ds_exp(i)/s_in(i)
```

```
write(*,*)'din=',din(i)
```

```
write(20,*)'din=',din(i)
```

```
end do
```

!la section efficace experimental sur la section efficace calcule (formule propose et formule

M.Yigit)

```
do i=1,13
```

```
xc1(i)=s_exp(i)/s_cal(i)
```

```
xc2(i)=s_exp(i)/s_MY(i)
```

```
write(*,*)xc1(i),xc2(i)
```

```
write(20,*)'xc=',xc1(i)
```

```
write(20,*)'xc=',xc2(i)
```

```
end do
```

! calcule Paramètre du moindre carrée et paramètre des échantillons

```
s0=0
```

```
do i=1,13
```

```
sum=s0+(s_exp(i)-s_cal(i)/ds_exp(i))**2
```

```
end do
```

```
write(*,*)'sum=',sum
```

```
write(20,*)'sum=',sum
```

```
n0=2
```

```
N=13
```

```
x=sum/(N-n0)
```

```
write(*,*)x
```

```
write(20,*)'x**2=',x
```

```
close(20)
```

```
end
```