

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT PHYSIQUE
N° : Ph/TH/04/2022



DOMAINE : Sciences de la matière
FILIERE : Physique
OPTION : PHYSIQUE THEORIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par: Darbal Kherfia

Intitulé

**Formule semi-empirique des fonctions
d'excitation de la réaction $(n, {}^3\text{He})$ à 14,6 MeV**

Soutenu le 20 /06/2022 devant le jury composé de:

| | | |
|-------------------|---|------------|
| E. Redouane salah | Professeur à l'université de M'sila | Président |
| S. Nehaoua | Maitre de conférence à l'université de M'sila | Rapporteur |
| F. Bouchelaghem | Maitre de conférence Université de M'sila | Examineur |

Année universitaire : 2021/2022

Remerciement

*Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master à l'**Université Mohamed Boudiaf, M'sila**.*

Tout d'abord je remercie "Allah", le tout puissant, de m'avoir donné courage et santé faites cet humble travail.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à mes parents pour leur soutien et patience.

*Mes plus profonds et sincères remerciements à mon directeur mémoire **Dr. Samra Nehaoua** Maître de conférence à l'université de Msila pour m'avoir encadré dans ce travail, pour sa disponibilité et ses conseils avisés pendant que je travaillais.*

*Je remercie sincèrement les membres du jury pour l'honneur de partager leurs expériences et leurs compétences pour évaluer ce modeste travail, notamment **Pr. Essma redouane-salah** professeur à l'université de M'sila.*

*Je tiens également à remercier le **Dr. Bouchelaghem Fouzia** Maître de conférences à l'université de Msila.*

Je tiens également à exprimer mes sincères remerciements à tout le personnel département de physique de l'université de M'sila, en particulier mes professeurs, qui m'ont enseigné pendant mes études, merci pour leurs efforts dans mon cursus afin de m'amener jusqu'au bout de la formation.

Enfin, je voudrais également remercier tous mes amis et collègues surtout promo master 2020 physique théorique, en particulier ceux qui m'ont apporté un soutien moral, une amitié inoubliable et précieuse, et tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à l'accomplissement de ce travail.

Darbal Kherfia

Dédicace

Je dédie ce travail en signe de reconnaissance.

A celui qui s'est battu et s'est sacrifié pour me fournir les conditions propices à ma réussite

mon cher père

A celui qui m'embrasse avec tendresse et affection ma chère mère

A l'âme de mon cher frère Samir

A mes chers frères Toufik , Hicham

A mes chères sœurs Rachida , Habiba

A mes neveux Samir ,Rayan , Ayham

A mes belles-sœurs Nadia , Hanane

A mes chères cousines, surtout Souhila, kamir , Farida ,Abrar ,Warda ,Massouda , Aldjia et Ahlem...

A tous mes amies, surtout Amina, Maya, Amira, Rahma, Nadjet et mes collègues Wahiba, Nawal et Sarra.

A toute la famille Derbal

A tous ceux qui aidé de près ou de loin à faire ce travail

A la mémoire de ma chère grand-mère

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale..... 1

Chapitre I : Réactions nucléaires

| | |
|--|----|
| I.1. Réaction nucléaire $m_i(M_i, M_f)m_f$ | 4 |
| I.2. Réactions neutroniques $n(M_i, M_f)m_f$ | 4 |
| I.2.1. Neutron..... | 5 |
| I.2.2. Classification des neutrons..... | 6 |
| a. Les neutrons froids..... | 6 |
| b. Les neutrons thermiques..... | 7 |
| c. Les neutrons épithermiques..... | 7 |
| d. Neutrons de résonance..... | 7 |
| e. Les neutrons intermédiaires..... | 8 |
| f. Les neutrons rapides..... | 8 |
| g. Les neutrons relativistes..... | 8 |
| I.3 . Réactions nucléaires des neutrons avec la matière..... | 9 |
| I.3.1. Réaction de diffusion..... | 9 |
| a. Diffusion élastique..... | 9 |
| b. Diffusion inélastique..... | 10 |
| I.3.2. Réaction d'absorption..... | 11 |
| I.3.2.1. La fission..... | 11 |
| I.3.2.2. Capture neutronique..... | 12 |
| a. Capture radiative..... | 12 |
| b. La transmutation (Capture non radiative)..... | 13 |
| I.4. La Section efficace..... | 13 |
| I.4.1. Section efficace microscopique..... | 14 |
| I.4.2. Section efficace macroscopique..... | 15 |

Chapitre II : Formules empiriques et semi empiriques
de la réaction (n,³He)

| | |
|--|----|
| II.1. Réaction nucléaire (n, ³ He) | 17 |
| II.2. Valeurs expérimentales de la réaction (n, ³ He) | 18 |
| II.3. base de données expérimentales EXFOR..... | 19 |
| II.3.1. Types des données inclus dans EXFOR..... | 19 |
| II.3.2. Format de l'EXFOR | 20 |
| II.4. Formules empiriques et semi empirique | 21 |
| II.4.1. Formules empiriques | 21 |
| II.4.2. Formules semi empirique | 23 |

Chapitre III : formule semi-empirique pour régénérer la section
efficace de la réaction (n, ³He)

| | |
|---|----|
| III.1. Paramètres statistiques Σ et χ^2 | 27 |
| III.2. Formule semi-empirique proposé pour calculer la section efficace du (n, ³ He) | 27 |
| III.3. Résultats et discussion | 28 |
| III.3.1 le rapport $\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{cal}}$ | 33 |
| Conclusion | 38 |
| Conclusion générale | 40 |
| Annexe | 42 |
| Références Bibliographiques | 45 |

Liste des Figures

Chapitre I :

| | |
|---|----|
| Figure I.1 : Réaction nucléaire et exemple d'une réaction nucléaire radioactive..... | 4 |
| Figure I.2 : schéma de désintégration du neutron..... | 5 |
| Figure I.3 : sources de neutrons : réacteur nucléaire et le source compacte..... | 6 |
| Figure I.4 : flux neutronique en fonction de l'énergie neutronique | 8 |
| Figure I.5 : Diffusion élastique..... | 10 |
| Figure I.6 : Diffusion inélastique..... | 11 |
| Figure I.7 : Fission de l'uranium 235 | 12 |
| Figure.I.8 : les processus de capture des neutrons radiatifs..... | 13 |
| Figure I.9 : section efficace | 14 |

Chapitre II :

| | |
|---|----|
| Figure II.1 : L'interface de la base de données EXFOR..... | 21 |
|---|----|

Chapitre III :

| | |
|--|----|
| Figure III.1 : sections efficaces calculées de la réaction nucléaire (n, ³ He) en fonction de nombre de masse A pour les 13 atomes pris dans l'étude..... | 29 |
| Figure III.2 : sections efficaces calculées de la réaction nucléaire (n, ³ He) en fonction de nombre de charge Z pour les 13 atomes pris dans l'étude..... | 30 |
| Figure III.3 : sections efficaces calculées de la réaction nucléaire (n, ³ He) en fonction de nombre de neutrons N pour les 13 atomes pris dans l'étude..... | 31 |
| Figure III.4 : $\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{cal}}$ obtenu en fonction de nombre de masse A..... | 34 |
| Figure III.5 : sections efficaces calculées et mesurées par Csikai et Szalay, Qaim, Diksic et al. de la réaction nucléaire (n, ³ He) en fonction de nombre de neutrons A pour les 13 atomes pris dans l'étude..... | 35 |

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1: Classification des neutrons en fonction de leur énergie 8

Chapitre II

Tableau II.1: réactions possibles (n, ³He)..... 17

Tableau II.2: Sections efficaces de la réaction (n, ³He) expérimentales mesurées par de Qaim, Csikai et Szalay, Diksic et al 18

Chapitre III

Tableau III.1 : paramètres statistiques Σ et χ^2 obtenus pour les différentes formules empiriques et semi empiriques..... 32

Tableau III.2: rapport $\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{cal}}$ obtenu pour la formule proposé en fonction du nombre de masse A..... 33

Tableau III.3: sections efficaces la réaction nucléaire calculées (n, ³He) avec une énergie d'incidence de 14,6 MeV calculées par la formule suggérée et les données mesurées par Csikai et Szalay, Qaim, Diksic et al. 37

Introduction générale

Introduction générale

Les réactions nucléaires provoquées par les nucléons en particulier les neutrons présentent un grand intérêt dans certaines applications de la physique nucléaire, notamment la physique des réacteurs nucléaires et la radioprotection et l'imagerie neutronique. La mesure des sections efficaces des réactions neutroniques ($n, {}^3\text{He}$) induites par des neutrons rapides d'énergies allant de quelques MeV présente un grand intérêt, dans ce travail on s'intéresse à une gamme d'incidence de quelque millions d'électronvolts (14,6 MeV).

Malgré les difficultés rencontrées les expériences de mesure des sections efficaces des réactions neutroniques ($n, {}^3\text{He}$) les expérimentateurs ont réussi à déterminer quelque valeurs pour des dizaines d'atomes. En parallèle les théoriciens ont essayé de développer des méthodes et des modèles théoriques qui coïncide avec les données expérimentales et d'extrapoler les données pour les le resté des atomes qui ne sont pas disponibles expérimentalement. La combinaison de la théorie et de l'expérience aboutit à une meilleure des réactions nucléaires et neutroniques ($n, {}^3\text{He}$) pour une énergie neutronique de 14,6 MeV.

Dans ce travail, nous proposons une formule semi empirique basée sur celle de Konobeyev et Broeders proposée en 2007[1], notre expression analytique utilise cadre d'un modèle d'excitation pré-équilibre. L'évaluation de notre formule a porté sur des sections efficaces de 13 cibles de nombre de masse entre 31 et 187. Les résultats expérimentaux utilisés pour l'évaluation de notre expression sont extraits de la base de données EXFOR mises à jour par l'agence internationale des données nucléaire IAEA.

Notre formule contient trois paramètres fixés pour coïncider avec les données mesurées et en gardant des valeurs minimales pour les paramètres statistiques Σ et χ^2 . A l'aide d'un algorithme génétique écrit en Python on a essayé de déterminer les valeurs idéales des trois paramètres.

Ce mémoire est composé en trois chapitres. Au Chapitre I, nous avons présenté un rappel sur l'interaction des neutrons avec la matière : propriétés des neutrons, interactions des neutrons avec la matière, classification des neutrons selon leurs énergies ensuite on a défini la section efficace microscopique et macroscopique qui nous s'informe sur la probabilité de la réalisation des différentes réactions nucléaire : fusion, fission, diffusion, capture...

Dans le second chapitre, nous décrivons les réactions étudiées qui produisent de l'hélium-3 et présentons des valeurs expérimentales disponibles actuellement avec un bref aperçu de la bibliothèque EXFOR. Nous présentons également les formules empiriques et semi-empiriques proposées auparavant (de 1978 jusqu'à 1920) pour générer des sections efficaces des réactions neutroniques ($n, {}^3\text{He}$).

Dans le troisième chapitre, nous présentons les paramètres statistiques pour la formulation semi empirique proposée ainsi les section efficaces de la réaction ($n, {}^3\text{He}$)obtenus avec cette formule, en comparant notre données théoriques avec celles mesurées et on essaye de déterminer la qualité et la puissance de notre formule et le modèle de pré-équilibre.

Chapitre I

Réactions nucléaires

I.1 Réaction nucléaire $m_i(M_i, M_f)m_f$

Une réaction nucléaire est la réorganisation des nucléons après le rapprochement de deux noyaux M_i et m_i à la portée des forces nucléaires (**figure I.1**). Le noyau final M_f va rester dans son état fondamental ou excité après son bombardement par une autre particule m_f [2]:

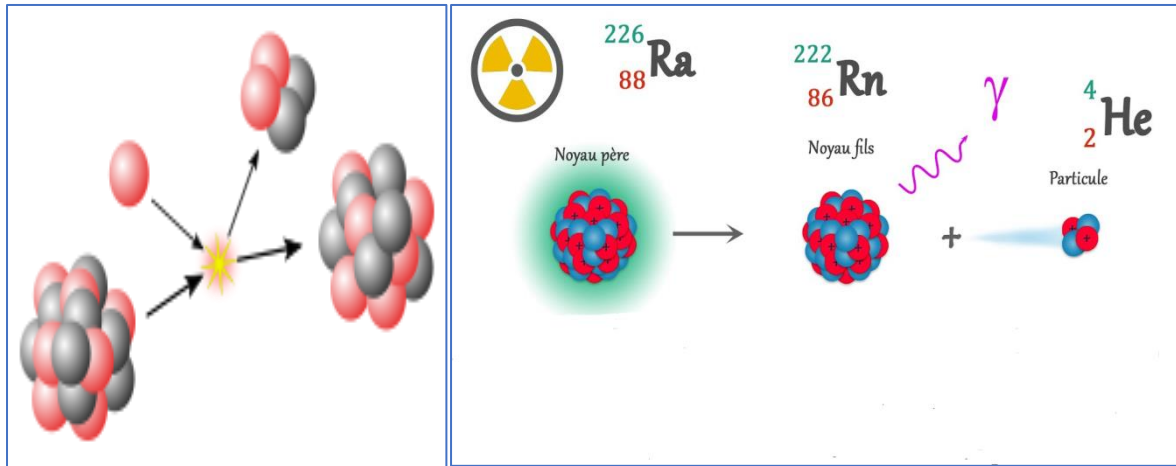


Figure I.1 : Réaction nucléaire et exemple d'une réaction nucléaire radioactive

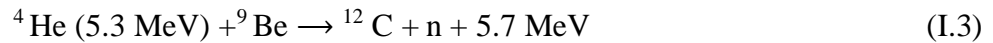
I.2. Réactions neutroniques $n(M_i, M_f)m_f$

La réaction nucléaire neutronique est un processus dans lesquels les neutrons sont les projectiles et qui interagissent avec les noyaux en ignorant complètement le cortège électronique, en donnant deux particules ou plus. La réaction nucléaire peut être une diffusion élastique ou inélastique ou un contact simple et entre le neutron et le noyau avec ou sans échange d'énergie. La réaction nucléaire neutronique peut provoquer une transformation du nucléide cible en un autre nucléide en absorbant le neutron incident et en émettant des rayonnements et des particules légères et lourdes[3].



I.2.1. Neutron

Le neutron est un fermion de spin 1/2. Il est composé de trois quarks, ce qui en fait un baryon. Les deux quarks down et le quark up du neutron sont liés par l'interaction forte, transmise par des gluons. Il a été découvert en 1932 par Chadwick selon la réaction suivante[4]:



C'est une particule neutre de charge nulle qui ne subit donc pas d'interaction coulombienne comme une particule chargée. C'est aussi un projectile idéal sur les noyaux susceptibles de fissionner. Comme le neutron est composé de trois quarks, son seul mode de désintégration possible (sans modifier le nombre baryonique) suppose le changement de saveur d'un quark par l'intermédiaire de l'interaction faible. La désintégration d'un quark down, de charge $-1/3$, en un quark up, de charge $+2/3$, est réalisée par l'émission d'un boson W ; de cette façon, le neutron se désintègre en un proton (qui contient un quark down et deux quarks up), un électron et un antineutrino électronique **Figure (I.2)** [4]. L'équation de la désintégration du neutron est donnée par :

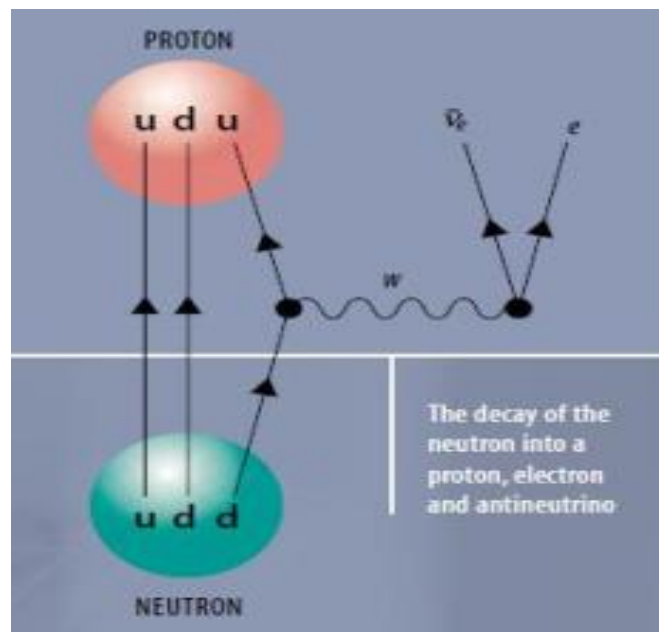


Figure I.2 : Schéma de désintégration du neutron.

À l'état libre, le neutron est instable, mais à l'intérieur du noyau, il est stable. sa durée de vie moyenne est de $880,3 \text{ s} \pm 1,1 \text{ s}$ avec la demi-vie soit un peu plus de 10 minutes. Il se

désintègre suivant le processus décrit ci-dessus. Ce processus, nommée désintégration bêta, peut également transformer un neutron à l'intérieur d'un noyau atomique instable. Ces durées de vie (moyenne et demi-vie) sont très supérieures aux durées de vie des neutrons rencontrés dans un réacteur nucléaire, ce qui fait que la disparition des neutrons par désintégration peut être négligée dans le bilan neutronique (production/disparition) du réacteur. La masse du neutron est très proche de celle du proton (noyau d'hydrogène) : $m_n = 939.575 \text{ MeV}$ (celle du proton $m_p = 938.27 \text{ MeV}$)[4].

I.2.2. Classification des neutrons

Les neutrons libres peuvent être classés selon leur énergie cinétique. Ces états libres existent au voisinage ou au sein d'un réacteur nucléaire ou les sources de neutronique ou un mélange chimique du béryllium avec un émetteur alpha ou gamma qui assure un flux de neutrons libres. La figure présente le principe de fonctionnement d'un réacteur nucléaire et d'une source de neutrons compacte ou portable. Le **tableau (I.2)** indique les différentes catégories des neutrons[5].

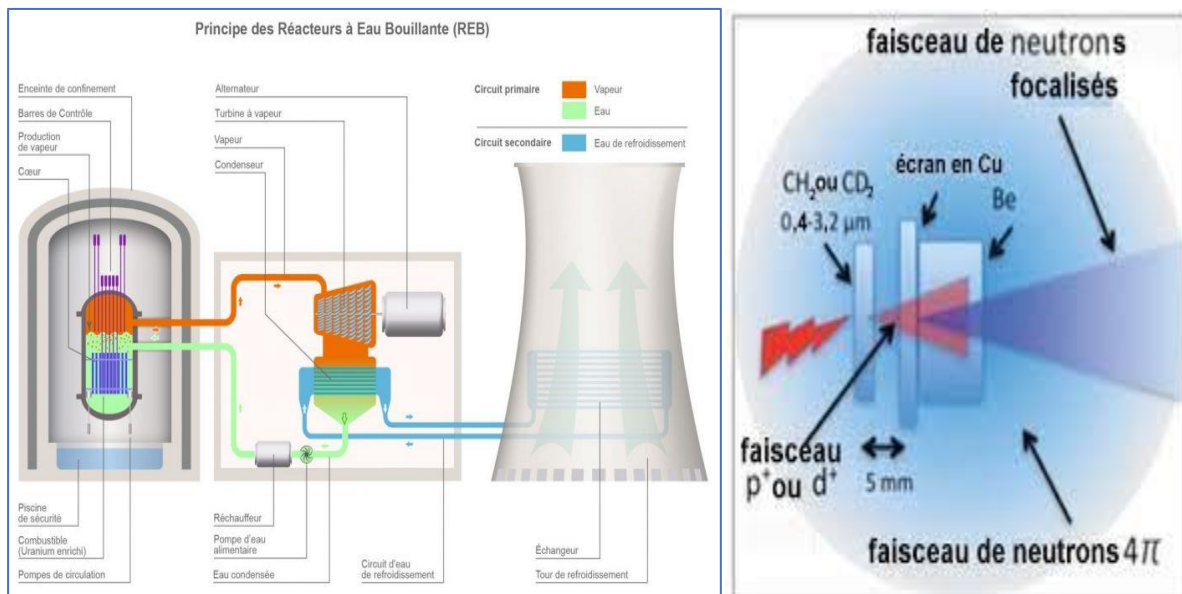


Figure I.3: sources de neutrons : réacteur nucléaire et le source compacte.

a. Les neutrons froids

La température d'équilibre thermodynamique est inférieure à la température ambiante. Aux énergies de l'ordre de 10^{-7} eV , le déplacement des neutrons est sensible à la gravitation[5].

b. Les neutrons thermiques

Les neutrons thermiques sont en équilibre thermodynamique avec le milieu. Pendant son déplacement au sein de la matière, ces neutrons perdent autant d'énergie acquis dans le choc qu'ils ont subi. La distribution de vitesse est décrite par la loi de **Maxwell-Boltzmann** :

$$n(v)dv = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}} dv \quad (\text{I.5})$$

avec

T est la température absolue de neutron, **K** est la constante de Boltzmann.

V est la vitesse de neutron ; **m** est la masse du neutron

La distribution en énergie est aussi décrite par la loi de **Maxwell-Boltzmann** [5]:

$$n(E)dE = \frac{2\pi}{(\pi kT)^{3/2}} e^{-E/kT} \sqrt{E} dE \quad (\text{I.6})$$

L'énergie correspondante pour le neutron thermique est :

$$E_n = \frac{1}{2} m v_n^2 = kT \quad (\text{I.7})$$

A température ambiante (T=293.6 K qui vaut 20.4 C) cela correspond à une vitesse de neutron $v = 2200 \text{ m/s}$ qui vaut 0.0259 eV. L'énergie cinétique moyenne des neutrons se situe autour de cette valeur qui est l'énergie la plus probable. Ils sont considérés comme la limite supérieure d'énergie des neutrons est de 0.4 eV, ce qui correspond au changement significatif observé dans la section efficace d'absorption du cadmium.

c. Les neutrons épithermiques

Les neutrons épithermiques sont plus importants que les neutrons thermiques. Certains réacteurs fonctionnent avec un spectre de neutrons épithermiques. Cette conception permet d'atteindre un taux de génération de combustible plus élevé que dans les réacteurs thermiques.

L'énergie de 0.5 eV correspond à la coupure du cadmium. Les neutrons d'énergie inférieure à 0.5 eV sont absorbés par la capture radiative[5].

d. Neutrons de résonance

Les neutrons de résonance ont un comportement particulier. Aux énergies de résonance, les sections transversales peuvent atteindre des pics de plus de 100 fois supérieurs à la valeur de base de la section transversale. À ces énergies, la capture de neutrons dépasse de manière significative la probabilité de fission. Il est donc très important (pour les réacteurs thermiques) de dépasser rapidement cette plage d'énergie et de faire fonctionner le réacteur avec des neutrons thermiques en augmentant la probabilité de fission[5].

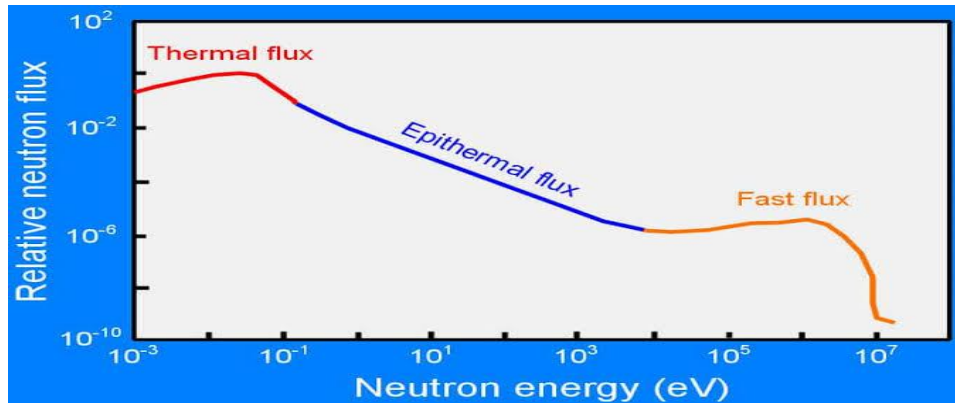


Figure I.4: flux neutronique en fonction de l'énergie neutronique.

e. Les neutrons intermédiaires

Les neutrons intermédiaires sont des neutrons produits par la collision de neutrons rapides et les noyaux des éléments du matériau ou les sections efficaces varient rapidement avec l'énergie[5].

f. Les neutrons rapides

Les neutrons d'énergie cinétique supérieure à 1 MeV sont appelés neutrons de la fission nucléaire. Ces neutrons sont produits par des processus nucléaires tels que la fission nucléaire ou les réactions (α, n) . pour la fission ^{235}U les neutrons de fission ont une énergie moyenne de 2 MeV. A l'intérieur d'un réacteur nucléaire, les neutrons rapides sont ralentis vers l'énergie thermique par un processus appelé modération des neutrons[5].

g. Les neutrons relativistes

Les neutrons relativistes ont une énergie cinétique supérieure à 20 MeV, ils sont produits par les accélérateurs[5].

| Classification | Energies (eV) |
|-------------------------|-------------------|
| Neutron froids | 0 eV - 0.025 eV |
| Neutrons thermique | 0.025 eV |
| Neutrons épithermique | 0.025 eV - 0.4 eV |
| Neutrons de cadmium | 0.4 eV- 0.5 eV |
| Neutrons d'épi-cadmium | 0.5 eV – 1 eV |
| Neutrons lents | 1 eV -10 eV |
| Neutrons de résonance | 10 eV -300 eV |
| Neutrons intermédiaires | 300 eV -1 MeV |
| Neutrons rapides | 1 MeV - 20 MeV |
| Neutrons relativistes | 20 MeV -> |

Tableau I.1 : Classification des neutrons en fonction de leur énergie.

I.3. Réactions nucléaires des neutrons avec la matière

Les interactions possibles des neutrons avec la matière sont :

1. **Réaction de diffusion.**
2. **Réaction d'absorption.**

Dans la suivante section on présente en détail ces deux processus.

I.3.1. Réaction de diffusion

La diffusion est un contact formé entre le noyau et le neutron en gardant son énergie (diffusion élastique) ou en cédant de l'énergie au noyau.

a. Diffusion élastique

Dans la diffusion élastique les neutrons transfèrent de l'énergie au noyau et rebondissent vers lui, à une direction différente, parfois, le noyau absorbe des neutrons, puis les relâche avec la même énergie cinétique incidente[6].

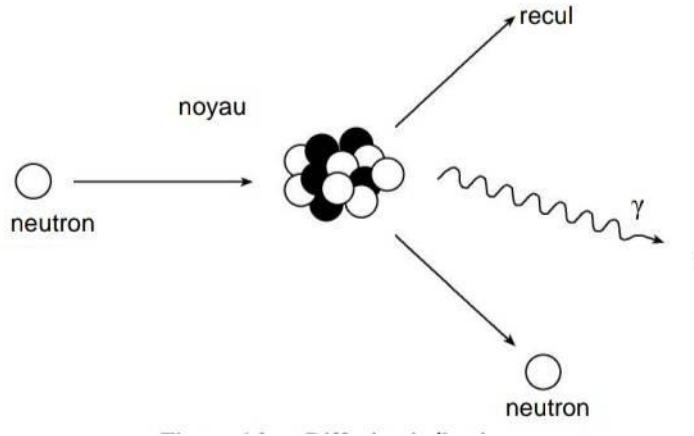


Figure I.5 : Diffusion élastique

Les noyaux légers sont les meilleurs ralentisseurs des neutrons et minimisent efficacement l'énergie des neutrons. Lorsqu'un neutron heurte un noyau lourd, il rebondit en ayant perdu que peu de vitesse et communique très peu d'énergie. D'autre part, les neutrons ne seront pas plus diffusés par le nuage d'électrons légers autour du noyau, mais continueront en ligne droite[6].

L'équation de la diffusion élastique s'écrit :



Et l'énergie transférée est :

$$E = \frac{4mM}{(m+M)} E_n \quad (\text{I.9})$$

Avec :

m : la masse du neutron

M : la masse du noyau ralentisseur

E_n : l'énergie du neutron incident

b. La diffusion inélastique

La diffusion inélastique ne se produit généralement que lors de l'interaction entre un neutron très rapide et un noyau lourd. Lors de la collision avec le noyau, le neutron peut être absorbé pendant un certain temps. Ce noyau composite sera dans un état excité. Il se désexcitera en émettant un nouveau neutron, moins énergétique et un photon gamma qui

supprimera la différence d'énergie. Elle ne joue pas un rôle clé dans le fonctionnement des réacteurs[6].

L'équation de la diffusion inélastique s'écrit

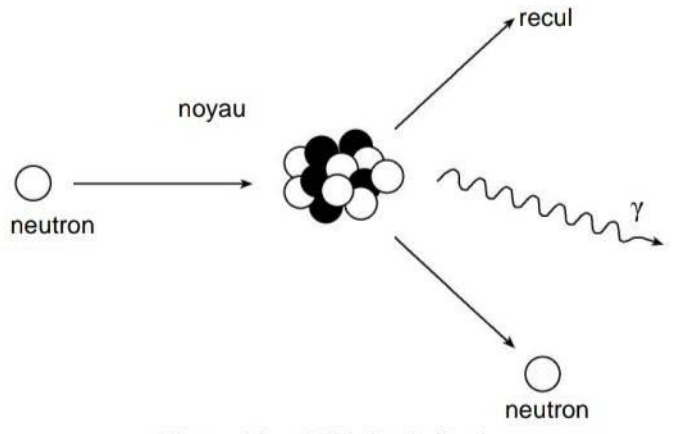


Figure I.6 : Diffusion inélastique

I.3.2. Réaction d'absorption

Dans cette réaction le neutron entré dans le noyau ou il est complètement ajouté aux nucléons qui déstabilise le noyau et qui stabilise en émettant un rayonnement ou le noyau se fissionne en deux grands fragments.

I.3.2 1. La fission

La fission nucléaire est la scission d'un noyau instable en deux noyaux plus légers et plusieurs particules élémentaires. Cette rupture s'accompagne d'un dégagement de chaleur, ou d'énergie, et il n'y a pas de fission spontanée, mais c'est très rare. Le seul élément naturellement fissile est l'uranium 235. Sous l'influence d'un neutron, le noyau perd son équilibre et se transforme en deux noyaux plus légers mais toujours instables, appelés produits de fission. Lors d'une collision avec un neutron, ces produits de fission sont éjectés à grande vitesse. Les noyaux de fission sont radioactifs dans la plupart des cas, mais leur demi-vie est assez courte et la fission libère une énergie énorme. Les neutrons libérés par la fission ont une énergie très élevée. Si nous pouvons les ralentir suffisamment, ils peuvent induire de nouvelles fissions, et la réaction va continuer et s'accélérer. Dans les réacteurs nucléaires, la réaction est autosuffisante. Mais si on laisse augmenter le nombre de neutrons présents, la réaction peut devenir explosive. C'est ce que l'on appelle une réaction en chaîne[7].

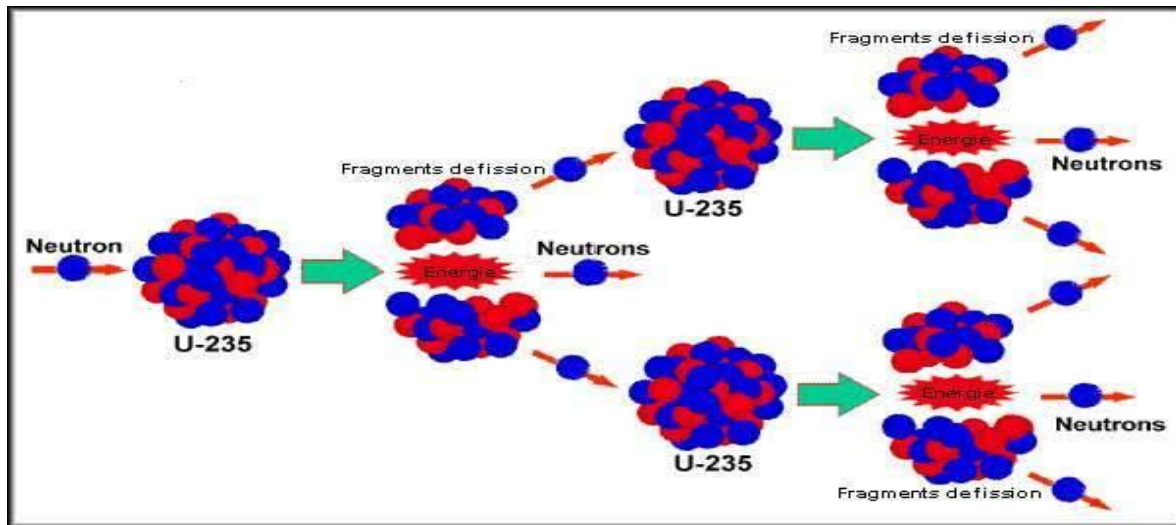
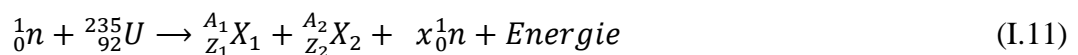


Figure I.7: Fission de l'uranium 235

L'équation de la réaction de fission de l'uranium 235 est donnée par :



Où :

${}_{Z_1}^{A_1}\text{X}_1$: noyau 1 de produit de fission

${}_{Z_2}^{A_2}\text{X}_2$: noyau 2 de produit de fission

$x{}_0^1n$: nombre de neutron libéré (généralement 2 ou 3) avec une énergie cinétique moyenne de 2MeV.

I.3.2.2. Capture neutronique

a. Capture radiative

Le neutron est capturé par le noyau de la masse A ; un nouveau noyau de la masse A + 1 est formé ; ce nouveau noyau est excitable en raison de le double apport d'énergie cinétique et de liaison neutronique, et il est désexcité par les rayons gamma avec des énergies jusqu'à 10 MeV ; le noyau nouvellement formé est, dans la plupart des cas, un isotope radioactif qui évoluera vers la ligne de stabilité par des processus radioactifs successifs. Cette réaction a été notée (n, γ) [5].

L'équation de la capture radiative s'écrit :

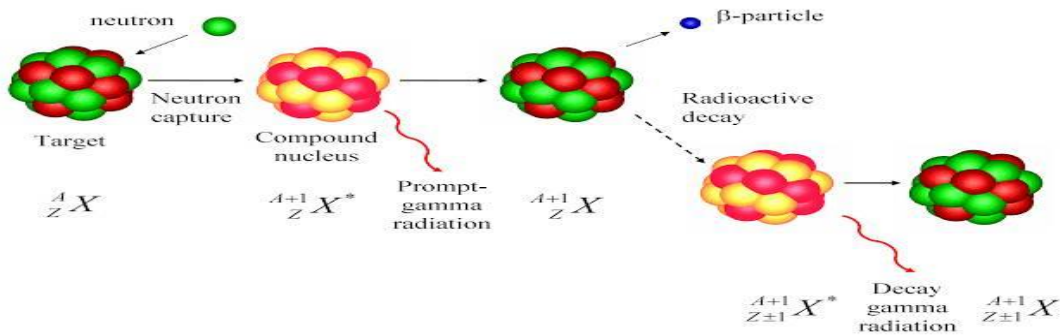
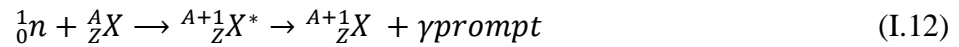


Figure I.8 : les processus de capture des neutrons radiatifs

b. La transmutation (Capture non radiative)

La transmutation est la transformation d'un élément en un autre. Les noyaux atomiques peuvent absorber des neutrons (les neutrons qui provoquent ces réactions possèdent généralement des énergies élevées) pour former des noyaux composites, qui perdent de l'énergie en émettant des particules chargées (protons ou particules alpha). Cette réaction produit un noyau différent[6].

Exemples :

- Reaction neutron-proton (n, p)



- Reaction neutron-alpha (n, α)



I.4. La Section efficace

La section efficace σ est une grandeur physique correspondant à la probabilité d'interaction d'une particule pour une réaction. La section efficace est mesurée en centimètres carrés. On utilise une sous unité qui est le barn tel que :

$$1\text{barn} = 10^{-24}\text{cm}^2 = 10^{-28}\text{m}^2$$

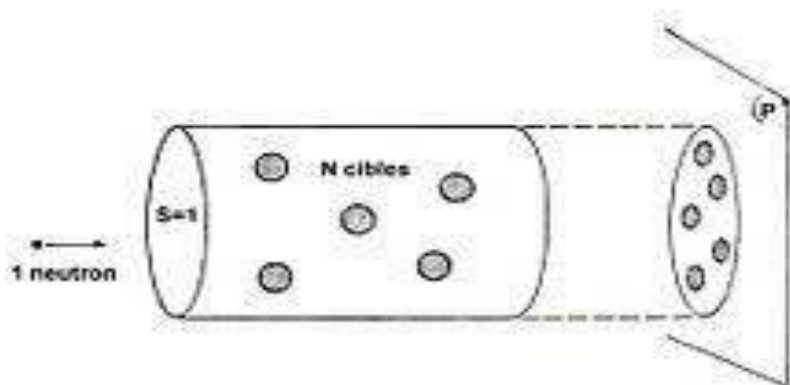


Figure I.9 : section efficace

I.4.1. Section efficace microscopique

La section efficace microscopique est la zone d'action équivalente, qui caractérise la probabilité d'une interaction d'un type donné entre la particule ou le rayonnement incident et la particule cible, et qui permet d'évaluer le nombre d'interactions entre le flux de particules ou le rayonnement et la particule cible (système de particules cible). La relation entre le taux d'interaction T et la section efficace (σ) est :

$$T = \sigma \cdot \Phi \cdot N \quad (\text{I.15})$$

Avec :

Φ : Le flux

σ : la section efficace

N : le nombre de particules cible.

Les sections efficaces pour les différentes réactions sont [4]:

σ_f : Section efficace de fission.

σ_e : Section efficace de diffusion élastique.

σ_s : Section efficace de diffusion.

σ_{in} : Section efficace de diffusion inélastique.

σ_a : Section efficace d'absorption.

σ_γ : Section efficace de capture radiative.

La section efficace totale σ_t est la somme des sections efficaces pour les différents processus. :

Section efficace :

$$\sigma_t = \sigma_e + \sigma_s + \sigma_y + \sigma_{n,\alpha} + \sigma_{n,2n} + \sigma_{n,3n} + \dots \quad (\text{I.16})$$

I.4.2. Section efficace macroscopique

La section efficace macroscopique est le nombre d'interactions induites par le flux de neutrons dans un solide ou un liquide, et le produit de la section efficace du noyau multiplié par ces quantités par unité de volume est introduit dans le calcul. Cependant, la taille de ce produit est l'inverse de la longueur, pas de la surface. On définit la section efficace macroscopique (cm^{-1}) par :

$$\Sigma_t = N \cdot \sigma_t \quad (\text{I.17})$$

Où :

σ_t : Section efficace totale.

N : la densité atomique.

Chapitre II :
Formules empiriques et semi empiriques
de la réaction (n,³He)

II.1. Réaction nucléaire (n, ³He)

Lorsque les noyaux avec un nombre de masse A qui varie de 30 jusqu'à 180 sont bombardés avec des neutrons rapides (d'énergie de millions d'électronvolts) ils donnent naissance à des atomes de nombre de masse A-2 et des atomes d'hélium 3. Il est difficile d'expérimentalement et de réaliser et de contrôler des réactions (n, ³He), il est également difficile la mesure de la section efficace correspondante ce qui explique le nombre limité de résultats expérimentaux ainsi les études théoriques.



Des neutrons incidents avec une énergie de 14 MeV à 20 MeV, les réactions (n, ³He) réalisées dans les réacteurs nucléaires sont résumées dans le **tableau (II.1)** :

| |
|--|
| ³¹ P (n, ³ He) ²⁹ Al |
| ⁴¹ K (n, ³ He) ³⁹ Cl |
| ⁴⁵ Sc (n, ³ He) ⁴³ K |
| ⁵⁹ Co(n, ³ He) ⁵⁹ Mn |
| ⁶³ Cu (n, ³ He) ⁶¹ Co |
| ⁷⁵ As (n, ³ He) ⁷³ Ga |
| ⁹³ Nb (n, ³ He) ⁹¹ Y |
| ¹⁰³ Rh (n, ³ He) ¹⁰¹ Tc |
| ¹³³ Cs (n, ³ He) ¹³¹ I |
| ¹⁴² Ce (n, ³ He) ¹⁴⁰ Ba |
| ¹⁶⁹ Tm (n, ³ He) ¹⁶⁷ Ho |
| ¹⁸⁷ Re (n, ³ He) ¹⁸⁵ Ta |

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

II.2. Valeurs expérimentales de la réaction (n, ^3He)

les résultats expérimentaux de sections efficaces de la réaction nucléaire (n, ^3He) avec des erreurs absolues ont été effectués par Qaim (1974),(1974) [8] [9], Csikai et Szalay (1965) [10], Diksic et al (1974)[11]. On note que les valeurs obtenues sont de l'ordre de micro barns avec des erreurs absolues élevées (50 %), ces valeurs indiquent que cette réaction neutronique est absorbante. Les résultats expérimentaux utilisés dans cette étude sont présentés dans le **Tableau (II.2)** [12]:

| A | Z | Energie (MeV) | Valeurs de Q (MeV) | σ_{exp} (n, ^3He) (μb) | $\Delta\sigma$ (n, ^3He) (μb) | Références |
|-----|----|---------------|--------------------|--|--|-------------------------|
| 31 | 15 | 14.7 | -13.095 | 13 | 6.5 | Qaim (1974) |
| 41 | 19 | 14.6 | -12.619 | 6 | 3 | Qaim (1978) |
| 45 | 21 | 14.6 | -11.355 | 8.6 | 4 | Qaim (1974) |
| 59 | 27 | 14.6 | -11.602 | 4.6 | 2.1 | Qaim (1974) |
| 63 | 29 | 14.6 | -9.541 | 4 | 2 | Qaim (1978) |
| 75 | 33 | 14.6 | -10.194 | 3.5 | 1.9 | Qaim (1974) |
| 93 | 41 | 14.6 | -7.721 | 3.1 | 1.5 | Qaim (1974) |
| 133 | 55 | 14.7 | -7.488 | 5 | 3 | Csikai et Szalay (1965) |
| 142 | 58 | 14.7 | -8.122 | 3.3 | 1.3 | Qaim (1978) |
| 159 | 65 | 14.6 | -6.933 | 4.6 | 1.8 | Qaim (1978) |
| 169 | 69 | 14.6 | -5.854 | 4 | 2 | Qaim (1978) |
| 181 | 73 | 14.6 | -6.240 | 3.4 | 1.5 | Qaim (1974) |
| 187 | 75 | 14.6 | -6.682 | 4 | 3 | Diksic et al (1974) |

Tableau II.2 : Sections efficaces de la réaction (n, ^3He) expérimentales mesurées par de Qaim, Csikai et Szalay, Diksic et al

II.3. Base de données expérimentales EXFOR

EXFOR est une abréviation du mot anglais **EXchange FORmat** (format d'échange). c'est la bibliothèque et le format de la collecte, du stockage, de l'échange des données de réaction nucléaire expérimentale. La bibliothèque est le produit d'une coopération mondiale, à savoir le réseau international de centres de données de réaction nucléaire (NRDC) qui est coordonné par la section des données nucléaires de l'IAEA (NDS).

En mai 2008 la base de données EXFOR contient environ 17 000 œuvres avec environ 129 000 tables de données, représentant [13]:

- Les données de réaction induites par des particules chargées comme les électrons, les positrons, les protons, les muons ,etc.
- Les données expérimentales des réactions induites par les neutrons.
- Certaines mesures de réactions nucléaires induites par des photons, des ions lourds comme carbone, cuivre, uranium, etc.

II.3.1. Types des données inclus dans EXFOR

Tous types de sections efficaces microscopiques et données connexes, en particulier :

- Sections efficaces intégrales et partielles (y compris les fonctions d'excitation, les données moyennées en spectre, etc.)
- Sections efficaces différentielles de nombreux types, y compris les distributions angulaires et coefficients de Legendre, spectres de particules secondaires, données de polarisation, etc.
- Paramètres de résonance.
- Rendements des produits de fission, nombre de neutrons émis dans une fission ν , quantité de fissions.
- Taux de réaction, intégrale de résonance.
- Données pour les énergies projectiles jusqu'à 1 GeV.
- Les données de la fission spontanée.
- Les données des réactions provoquées par des particules chargées légères et lourdes, chargées ou neutres.
- Les données des réactions induites par des photons.

II.3.2. Format de l'EXFOR

Il est simple d'accéder aux données expérimentales de l'EXFOR sur son site Web <https://www-nds.iaea.org/exfor/> sachant que :

- Une **entrée** EXFOR est identifiée par un numéro d'accès et une date .
- Chaque entrée EXFOR est divisée en **sous-entrées** contenant des tableaux de données. Les **sous-entrées** sont identifiées par des numéros de sous-enregistrement.
- EXFOR est conçu pour être suffisamment flexible pour répondre aux divers besoins d'un centre de données sur les réactions nucléaires et permettre la création de différents types de grandeurs tout en permettant le traitement numérique des données.
- EXFOR est une base des données expérimentales publiées par l'auteur. Le format des données permet l'inclusion des valeurs normalisées et mises à jour (avec une documentation appropriée), cette tâche est généralement laissée aux évaluateurs de données qui examinent systématiquement les travaux expérimentaux et d'introduire une base de données évaluées ENDF.
- EXFOR contient également des données numériques obtenues à partir des résultats publiés uniquement sous forme graphique, où les données tabulées d'origine pourraient ne pas être obtenu auprès des auteurs.
- La collecte est effectuée en suivant autant que possible les représentations de l'auteur des quantités et les unités publiées, pour éviter les erreurs pour faciliter la comparaison avec la publication originale. Le traitement numérique et le traçage des données n'utilisent donc pas le format de base EXFOR, mais l'un des formats de calcul disponibles qui sont proposés comme options de sortie supplémentaires dans les centres de données.
- EXFOR n'est pas une collection de valeurs recommandées pour chaque réaction, mais contient généralement des résultats de différents auteurs pour la même réaction qui peut ou non être d'accord. Les évaluateurs des données expérimentales EXFOR accumulent leurs résultats dans diverses bases de données comme : ENDF/B, JEFF, JENDL, etc., la plupart d'entre eux sont également disponibles à partir de l'agence internationale de l'énergie atomique nucléaire de l'IAEA[13].

Help » Manual PDF Lexfor Output Plot+ R33 Databases » ENDF CINDA IBANDL CD-ROM » EXFOR-CINDA X4Lite CD-Catalog

Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR)
Database Version of 2022-05-31
Software Version of 2022-04-29

The EXFOR library contains an extensive compilation of experimental nuclear reaction data. Neutron reactions have been compiled systematically since the discovery of the neutron, while charged particle and photon reactions have been covered less extensively: [EXFOR Reference Paper: Nucl. Data Sheets 120\(2014\)272, \[arxiv\]](#).

EXFOR Web database retrieval system provides: data search, output to various formats (incl.XML), plotting and comparison to ENDF, re-normalization old data to new standards, calculating data for inverse reactions and kinematics, constructing correlation matrices from partial uncertainties, etc. [EXFOR Web Database & Tools Paper: NIM A 888 \(2018\) 31, \[arxiv\]](#)

The EXFOR database contains data from **24225** experiments (see [statistics](#) and [recent database updates](#)). [Mirror-sites](#)

Search: Go

Examples of requests: [\[1\] Cross section \$\sigma\(E\)\$ /updates/ MF3 More examples...](#)

Go to: [\[upload your data\]](#)

Request

Target ?

Reaction ?

Quantity ?

Product ?

Energy from to eV ?

Author(s) ?

Publication year ?

Last modified ?

Accession # ?

Extended
 Keywords
 Expert
 Evaluator

Submit in new Window

Options Plotting. See also: [\[video-guide\]](#)

Exclude superseded data
 No reaction combinations (ratios...)
 Exclude evaluated/calculated data
 Enhanced search of Products
 Show evaluators flags /2021
 Retrieve listing only
 Disable Prompt-help

Sort by: reaction publication
View: basic extended

Ranges (Z,A)
 Reaction Sub-Fields
 Feedback and User's Input

Clone Request:

More Web Tools

Note:

- all criteria are optional (selected by checking)
- selected criteria are combined for search with logical AND
- criteria separated in a field by ";" are combined with logical OR
- criteria starting with "^" will be used as logical NOT
- wildcards (*) and intervals (..) are available

Statistics of usage: visits: 4152, requests: 13688, since 29-Apr-2022

Figure II.1 : interface de la base de données EXFOR

II.4. Formules empiriques et semi empirique

Quelques dizaines de section efficace de quelques micros barns de réaction expérimentale (n, ³He) à 14,6 MeV induite par des neutrons sont disponibles qui sont obtenues pour des éléments avec un nombre de masse $31 < A < 187$. Les sections efficaces systématiques de la réaction (n, ³He) sont mises pour accomplir ces données. Les modèles d'évaporation, de pré-équilibre et le modèle statistique sont utilisés dans des études précédentes pour extraire des formules qui décrivent mieux la réaction (n, ³He) [14].

Plusieurs formules empiriques ou semi empiriques ont été proposées par Qaim et Al (1980), Lishan et Yuling (1992), Atasoy et Dokmen (1995), Broeders et Konobeyev (2007), Aydin et al (2008), Bolukdemir et al (2010), Yettou et Belgaid (2014), Yigit (2015) et Nehaoua (2020). 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.

II.5.1. Formules empiriques

Les formules empiriques contiennent la dépendance exponentielle des sections efficaces avec le nombre de neutrons et de protons dans les noyaux (nombre d'asymétrie s). La formule empirique donnée par Levkovskii en 1964 a montré que la dépendance directe de la section efficace de réaction en fonction du paramètre d'asymétrie s . Les sections efficaces σ empiriques des réactions induites par les neutrons rapides peuvent être approximativement données par formule de Levkovskii [12] :

$$\sigma(n, x) = C \sigma_{in} e^{(a \cdot s)} \quad (\text{II.2})$$

où s est le **paramètre** d'asymétrie :

$$s = \frac{N - Z}{A}$$

avec N , Z , A sont les nombres de neutrons, de protons, et nombre des nucléons dans la cible noyau, respectivement.

σ_{in} représente la section efficace inélastique donnée par [15] :

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

Où le diamètre $r_0^2 = 1.2 \text{ fm}$

Les coefficients a et C représente les paramètres d'ajustement pour se rapprocher des données expérimentales.

En 1978 Qaim commence l'étude systématique de la section efficace de réaction (n, ³He). Qaim a suggéré une formule empirique des sections efficaces de la réaction (n, ³He) en fonction du paramètre d'asymétrie[9] :

$$\sigma(n, 3He) = 0.08475(A^{1/3} + 1)^2 e^{-1.6467(N-Z/A)} \quad (II.4)$$

En 1992 Lishan et Yuling ont suggéré que la section efficace (n, ³He) du système de réaction à 14,6 MeV peut être représentée par le paramètre asymétrique comme suit [16] :

$$\sigma(n, 3He) = 0.918(A^{1/3} + 1)^2 e^{-11.338(N-Z/A)} \quad (II.5)$$

En 1995 Atasoy et Dokmen ont proposé une expression empirique pour prédire la section efficace de la réaction (n, ³He). Dans cette expression empirique ils ont exprimé les sections efficaces (n, ³He) en fonction de (N-Z) et de $(E_n - E_{th})$. la section efficace de la réaction nucléaire s'écrit[17]:

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

Où :

(N-Z) est l'excès de neutrons du noyau de la cible avec $1 < (N-Z) < 43$.

E_n et E_{th} sont respectivement l'énergie du neutron incident et l'énergie du seuil de la réaction (n, ³He).

Les deux paramètres d'ajustement sont : $a = 2.774 \mu b/MeV$ et $b = 0.0526$

Mustafa yigit en 2015 a été proposée une formule empirique basée sur la dépendance des sections efficaces la réaction (n, ³He) en fonction de l'énergie Q, cette expression empirique a été obtenue à partir de la variation directe des données expérimentales de la section de réaction nucléaire (n, ³He) en fonction de l'énergie Q à 14,6 MeV elle est donnée par[12]:

$$\sigma(n, 3He) = c_1 (A^{1/3} + 1)^2 e^{c_2 Q} \quad (II.7)$$

Les valeurs des paramètres c_1 et c_2 sont respectivement de 0,0042 et 0,375 MeV⁻¹.

II.5.2. Formules semi empiriques

Les formules semi-empiriques sont proposées pour calculer la section efficace de la réaction (n, ³He) à une énergie neutronique incidente de 14,6 MeV, pour les noyaux avec $A > 40$, basés sur les modèles d'évaporation et de pré-équilibre. En 2006 Broeders et Konobeyev ont proposé une formule sur la base de ces modèles comme suit [1] :

$$\sigma(n, 3He) = \pi r_0^2 (A^{1/3} + 1) A^{\alpha_3} (\alpha_1 (N - Z + 1) / A + \alpha_2)^3 \quad (\text{II.8})$$

Où le diamètre $r_0^2 = 1.3 \text{ fm}$.

Et les paramètres sont fixés pour : $\alpha_1 = 1.6534$, $\alpha_2 = 0.15257$ et $\alpha_4 = -2.3$

Böyükdemir et al. (2010) ont proposé une formule en utilisant le modèle optique pour les énergies de réaction nucléaire incidentes (n, ³He) de 14 à 15 MeV, et ils ont également suggéré que les noyaux de section efficace de réaction semi-empirique peuvent être approximativement exprimée comme suivant [18] :

$$\sigma(n, 3He) = C \sigma_{ne_opt} e^{b/s} \quad (\text{II.9})$$

Où :

b et C sont les paramètres d'ajustement déterminés par la méthode des moindres carrés.

S est le paramètre d'asymétrie.

σ_{ne_opt} est la section efficace optique non élastique.

Yettou et Belgaid en 2014 ont proposé une formule semi-empirique avec trois paramètres basés sur le modèle d'évaporation avec la domination des effets Coulomb et de la diffusion Coulombienne exprimée par le terme d'asymétrie. Leur formule est donnée ci-dessous [19] :

$$\sigma(n, 3He) = c_1 (A^{1/3} + 1)^2 e^{(c_2(Z-1)/A^{1/3}) + \alpha_3((Z-1)/A)^3} \quad (\text{II.10})$$

Où:

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

$\frac{Z-1}{A^{1/3}}$ est le terme de l'effet coulombien.

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

En 2020 Nehaoua a suggéré une nouvelle formule semi-empirique pour le calcul de la section efficace de la réaction (n, ³He) à une énergie de 14,6 MeV , cette formule contient quatre paramètres comme indiqué ci-dessus[14]:

$$\sigma(n, 3He) = \pi r_0^2 (A^{1/3} + 1) A^{\alpha_3} (\alpha_1 (N - Z + 1) / A + \alpha_2)^{\alpha_4} \quad (\text{II.11})$$

Avec :

$$\alpha_1 = 9.7492 \times 10^{-1} \mu\text{b} ; \alpha_2 = 2.9469 \times 10^{-2} \mu\text{b} ; \alpha_3 = -1.58 ; \alpha_4 = 270.64$$

Chapitre III :
formule semi-empirique pour régénérer
la section efficace de la réaction nucléaire
(n, ³He)

III.1. Paramètres statistiques Σ et χ^2

Ces mesures statistiques sont utilisées pour tester les formules empiriques et semi-empiriques proposées, la meilleure formule a la plus petite valeur de paramètre de la moindre carrée Σ et paramètre des échantillons χ^2 . Σ est défini par :

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

Où :

N est le nombre des cibles prises dans le calcul.

σ_i^{exp} est la section efficace mesurée expérimentalement pour la cible i .

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

$\Delta\sigma_i^{exp}$ est l'erreur absolue.

χ^2 est défini comme suit :

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

Avec :

N est le nombre des cibles prises dans l'étude.

m est le nombre de paramètres d'ajustement qui assure une bonne convergence des données théoriques vers les données expérimentales.

III.2. Formule semi-empirique proposée pour le calcul de la section efficace de la réaction neutronique (n, ³He)

Nous avons pris 13 cibles avec un nombre de masse $31 \leq A \leq 187$ dont les sections efficaces ont été expérimentalement mesurées par Qaim , Pepelnik et al., Csikai et Szalay et Dikšič et al. Ces mesures expérimentales sont accumulées dans la base de données EXFOR.

On propose la formule semi-empirique proposée basé sur celle de Broeders & Konobeyev [1] et Nehaoua [14] , cette formule contient trois paramètres α_1 , α_2 et α_3 , elle est s'écrit comme suit :

$$\sigma(n, {}^3\text{He}) = \pi r_0^2 (A^{-1/3} + 1)^2 A^{-1/3} (\alpha_1(N - Z + 1)/A + \alpha_2)^{\alpha_3} \quad (\text{III.3})$$

Où :

$$r_0^2 = 1.3 \text{ fm}$$

Les paramètres α_1 , α_2 et α_3 sont ajustés respectivement : 9.880820×10^{-9} , 5.073337×10^{-4} , 1.512343.

On a calculé la section efficace de la réaction (n, ³He) ainsi les valeurs des paramètres statistiques à l'aide d'un algorithme écrit en langage Python dans Jupyter Notebook (annexe), les résultats du calcul sont présentés au **Tableau III.1** et **Figure III.1**.

Jupyter Notebook est un environnement de programmation interactif basé sur le Web permettant de créer et partager des documents de calcul. Il offre une expérience simple. Jupyter Notebook adaptée à la capture de l'ensemble du processus de calcul: développer, documenter et exécuter du code, ainsi que pour communiquer les résultats [20], telles que l'application web Jupyter, le serveur web Jupyter Python ou le format de document Jupyter.

Nous traçons la section efficace calculée en fonction du nombre de protons Z (**Figure III.2**) et en fonction de N (**Figure III.2**) et en fonction de nombre de masse A (**Figure III.2**),

III.3. Résultats et discussion

Les résultats de notre calcul sont présentés dans les **Figures III.1**, **III.2** et **III.3** pour les 13 réactions nucléaires éléments : ³¹P (n, ³He) ²⁹Al, ⁴¹K (n, ³He) ³⁹Cl, ⁴⁵Sc (n, ³He) ⁴³K, ⁵⁹Co (n, ³He) ⁵⁹Mn, ⁶³Cu (n, ³He) ⁶¹Co, ⁷⁵As (n, ³He) ⁷³Ga, ⁹³Nb (n, ³He) ⁹¹Y, ¹⁰³Rh (n, ³He) ¹⁰¹Tc, ¹³³Cs (n, ³He) ¹³¹I, ¹⁴²Ce (n, ³He) ¹⁴⁰Ba, ¹⁶⁹Tm (n, ³He) ¹⁶⁷Ho, ¹⁸⁷Re (n, ³He) ¹⁸⁵Ta. grosso au modo nous observons dans les trois figure que la sections efficace de la réaction nucléaire (n, ³He) varie proportionnellement en fonction de N, Z et A, mais la section reste faible est de quelque micro barns (inferieurs de 5 micro barns).

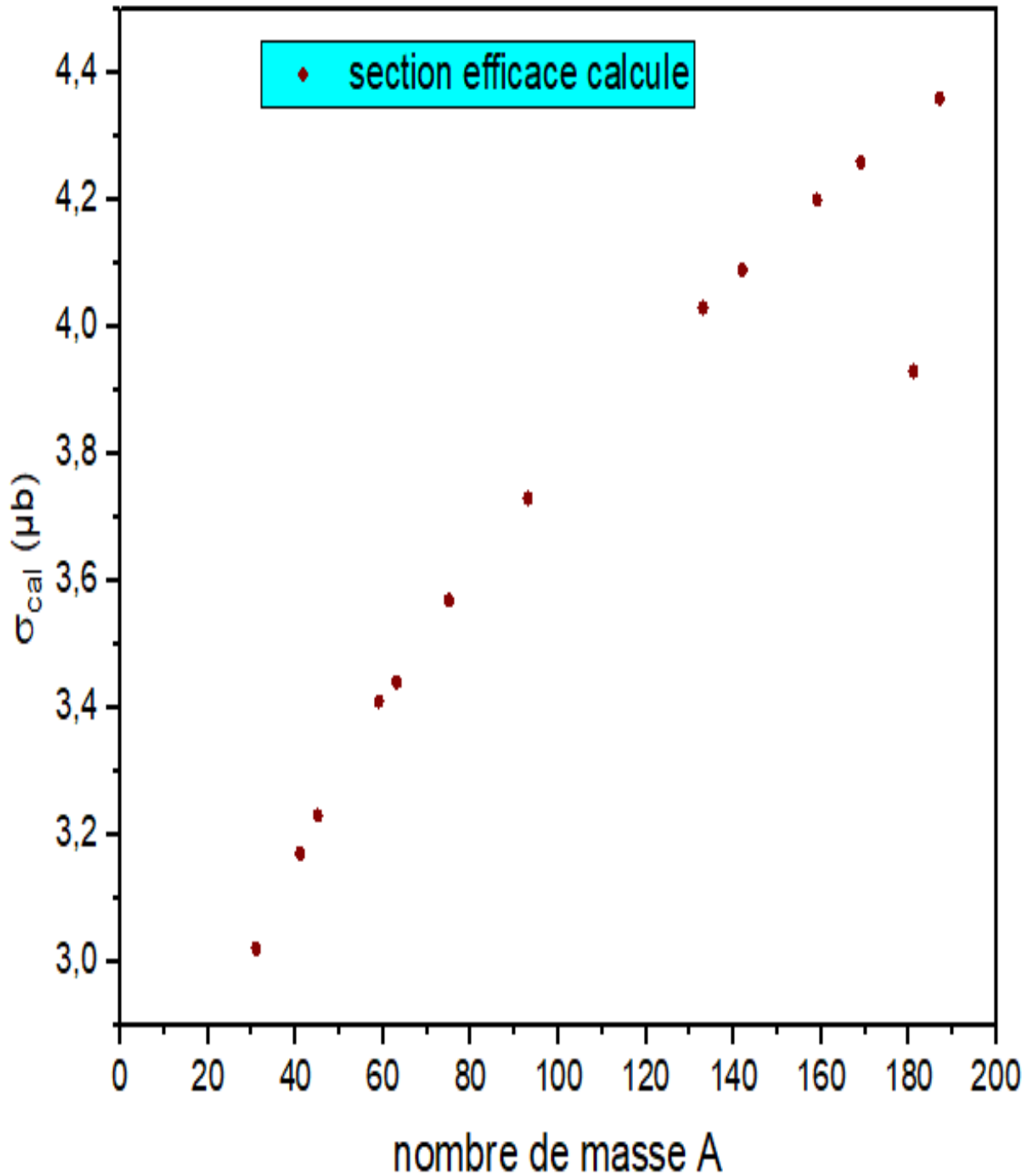


Figure III.1: sections efficaces calculées de la réaction nucléaire (n, ^3He) en fonction de nombre de masse A pour les 13 atomes pris dans l'étude.

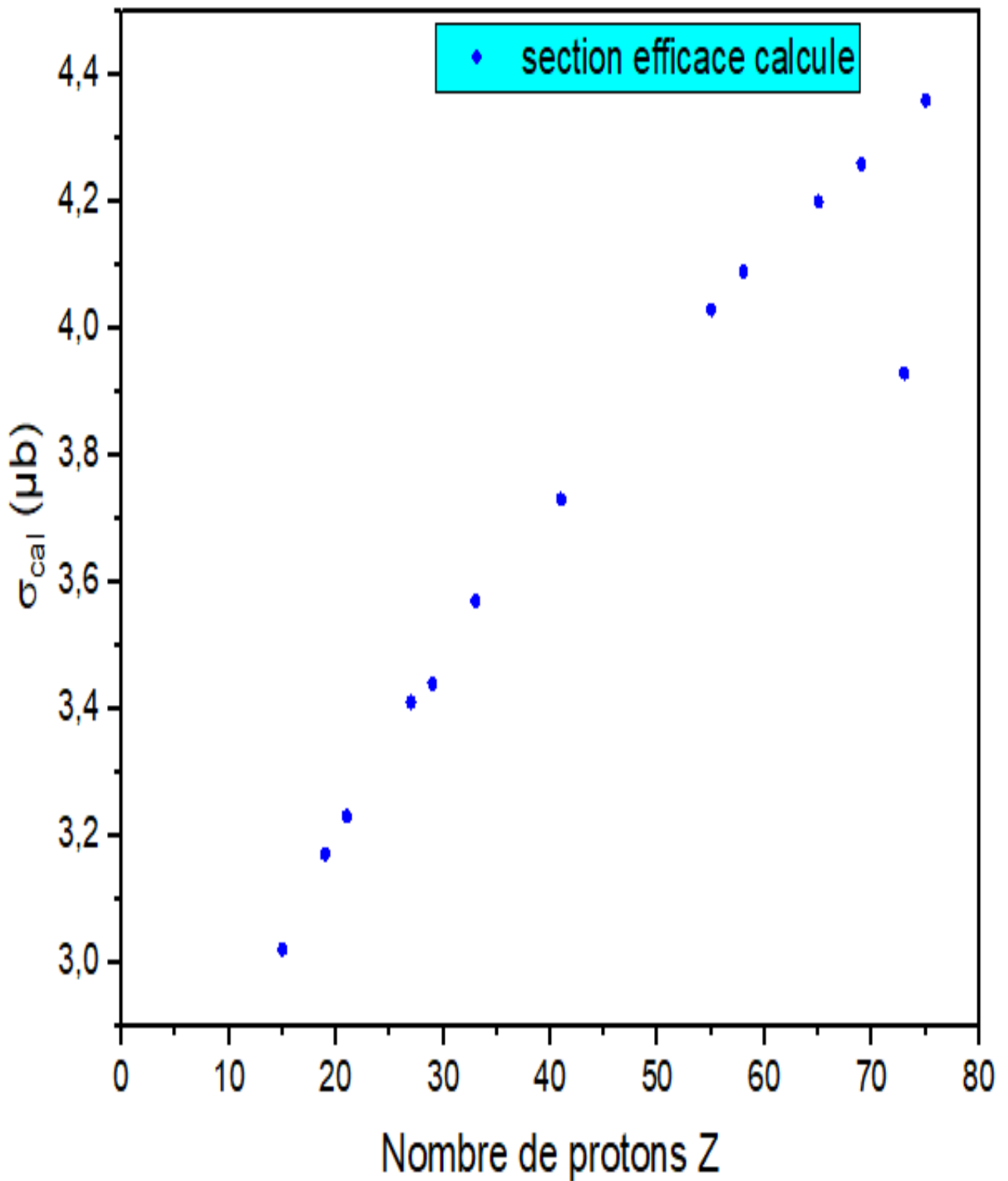


Figure III.2: sections efficaces calculées de la réaction nucléaire (n, ^3He) en fonction de nombre de charge Z pour les 13 atomes pris dans l'étude.

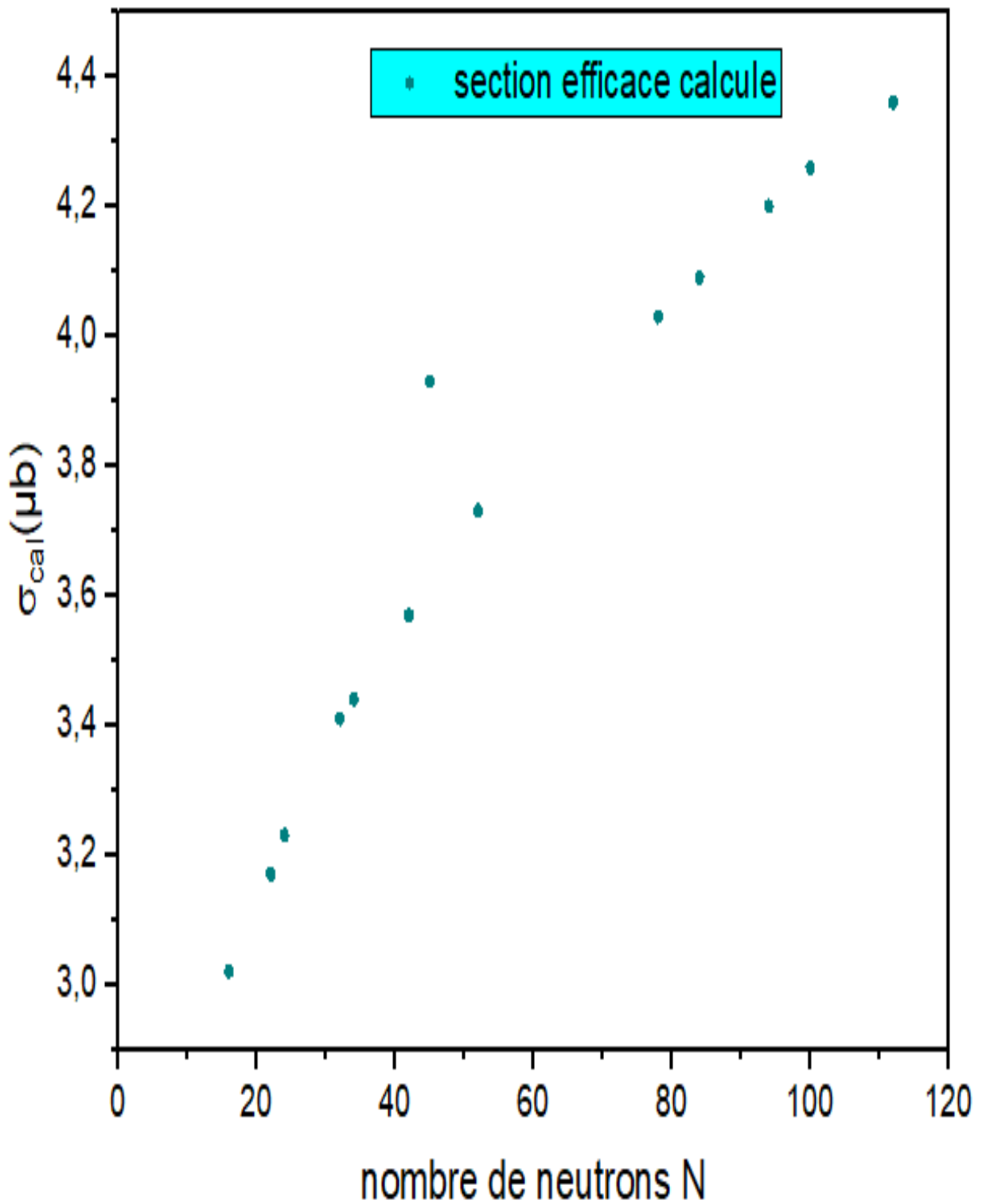


Figure III.3: sections efficaces calculées de la réaction nucléaire (n, ^3He) en fonction de nombre de neutrons N pour les 13 atomes pris dans l'étude.

La qualité de notre expression est déterminée par les paramètres statistiques Σ et χ^2 , pour notre formule les trois paramètres d'ajustement sont fixés avec un algorithme approprié pour avoir le minimum des paramètres statistiques Σ et χ^2 .

Le **Tableau III.1** présente une comparaison des paramètres statistiques Σ et χ^2 obtenus par notre formule et ceux des formules empiriques et semi empirique proposé par Broeders et Konobeyev[1], Nehaoua[14], Yigit[12] et Qaim[9].

Pour les 13 cibles étudiées on trouve que vaut $\Sigma = 6.32$ qui est la moitié de la valeur obtenue par Konobeyev[1] et le tiers de la valeur obtenue par Qaim[9]. Pour le paramètre χ^2 on a obtenu une valeur de $\chi^2 = 0.63$ qui est inférieur à celle obtenu par Konobeyev[1] et Qaim[9], la valeur est inférieurs à celles obtenue par Yigit[12] ce qui démontre la bonne qualité de notre formule qui rapproche mieux les données théoriques des données expérimentales.

| Formule | Σ | χ^2 | Les paramètres d'ajustement |
|-----------------------------|----------|----------|---|
| Ce travail | 6.32 | 0.63 | $\alpha_1=9.880820 \times 10^{-9} \mu\text{b}$, $\alpha_2= 5.073337 \times 10^{-4} \mu\text{b}$, $\alpha_3=1.512343$. |
| Nehaoua (2020) | 7.45 | 0.83 | $\alpha_1=2.1136 \times 10^{-2} \mu\text{b}$, $\alpha_2=9.8232 \times 10^{-1} \mu\text{b}$, $\alpha_3=1.62$, $\alpha_4=374.23$ |
| Yigit (2015) | 10.23 | 0.93 | $\alpha_1=0.0042 \mu\text{b}$, $\alpha_2=0.375$ |
| Broeders et Konobeyev(2007) | 15.1 | 1.51 | $\alpha_1=1.6534 \mu\text{b}$, $\alpha_2=0.15257 \mu\text{b}$, $\alpha_3=-2.3$ |
| Qaim(1978) | 21.8 | 1.99 | $\alpha_1=8.475 \times 10^{-2} \mu\text{b}$, $\alpha_2=-1.6467$ |

Tableau III.1 : paramètres statistiques Σ et χ^2 obtenus pour les différentes formules empiriques et semi empiriques

III.3.1. calcul du rapport $\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{cal}}$

Le rapport $\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{cal}}$ permet la comparaison des valeurs théoriques et expérimentales et vérifie la qualité de la formule proposée avec 3 paramètres, le **Tableau III.2** et la **Figure III.4** présentent les valeurs du rapport $\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{cal}}$ pour les différentes cibles étudiées.

| A | Z | Energie (MeV) | $\sigma_{\text{exp}} \pm \Delta \sigma_{\text{exp}}$ (μb) | σ_{cal} (μb) | $\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{cal}}$ |
|-----|----|------------------|---|--|---|
| 31 | 15 | 14.7 | 13 ± 6.5 | 3.02 | 4.3 |
| 41 | 19 | 14.6 | 6 ± 3 | 3.17 | 1.89 |
| 45 | 21 | 14.6 | 8.6 ± 4 | 3.23 | 2.66 |
| 59 | 27 | 14.6 | 4.6 ± 2.1 | 3.40 | 1.35 |
| 63 | 29 | 14.6 | 4 ± 2 | 3.44 | 1.16 |
| 75 | 33 | 14.6 | 3.5 ± 1.9 | 3.57 | 0.98 |
| 93 | 41 | 14.6 | 3.1 ± 1.5 | 3.73 | 0.83 |
| 133 | 55 | 14.7 | 5 ± 3 | 3.81 | 1.24 |
| 142 | 58 | 14.7 | 3.3 ± 1.3 | 4.03 | 0.81 |
| 159 | 65 | 14.6 | 4.6 ± 1.8 | 4.09 | 1.1 |
| 169 | 69 | 14.6 | 4 ± 2 | 4.20 | 0.94 |
| 118 | 73 | 14.6 | 3.4 ± 1.5 | 4.26 | 0.87 |
| 187 | 75 | 14.6 | 4 ± 3 | 4.33 | 0.92 |

Tableau III.2 : rapport $\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{cal}}$ obtenu pour la formule proposé en fonction du nombre de masse A.

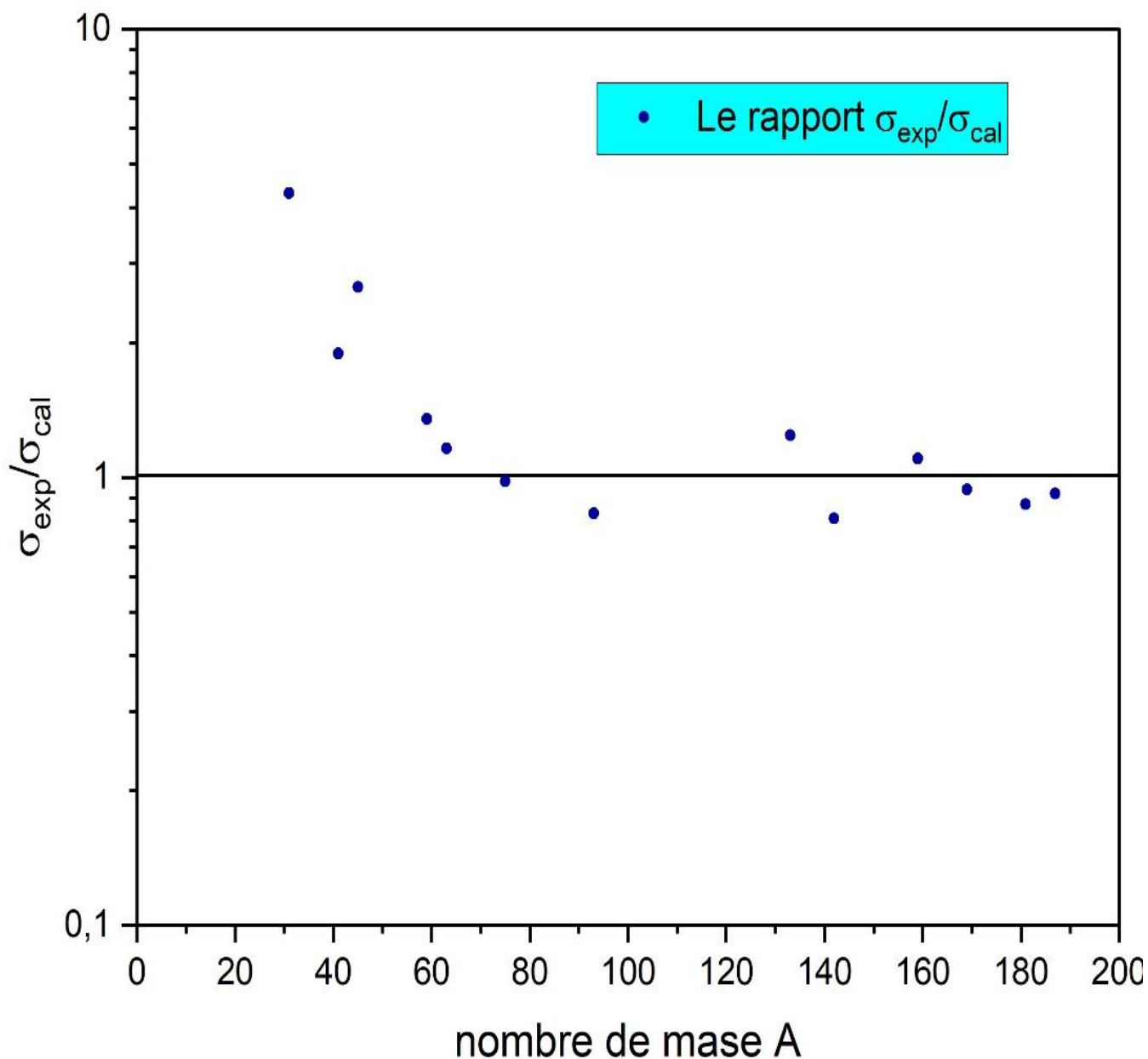


Figure III.4 : $\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{cal}}$ obtenu en fonction de nombre de masse A

Nous pouvons voir que 10 des 13 points sont très proches de 1 ce qui donne une confusion totale des données théoriques et expérimentales.

Au dernier lieu, On utilise la formule avec les trois paramètres pour régénérer les sections efficaces calculées pour les 13 éléments étudiés pour la réaction nucléaire ($n, {}^3\text{He}$) à des neutrons de 14,6 MeV, figure nous comparons les valeurs calculées et mesurées par Csikai et Szalay, Qaim, Diksic et al. Dans la **Figure III.5** Nous avons les sections efficaces calculées avec celles expérimentales.

On observe que notre formule régénère exactement les sections efficaces mesurées pour la réaction nucléaire ($n, {}^3\text{He}$) en particulier pour les 10 éléments étudiés avec un nombre de masse $59 \leq A \leq 187$, la manque des données expérimentales limite notre comparaison.

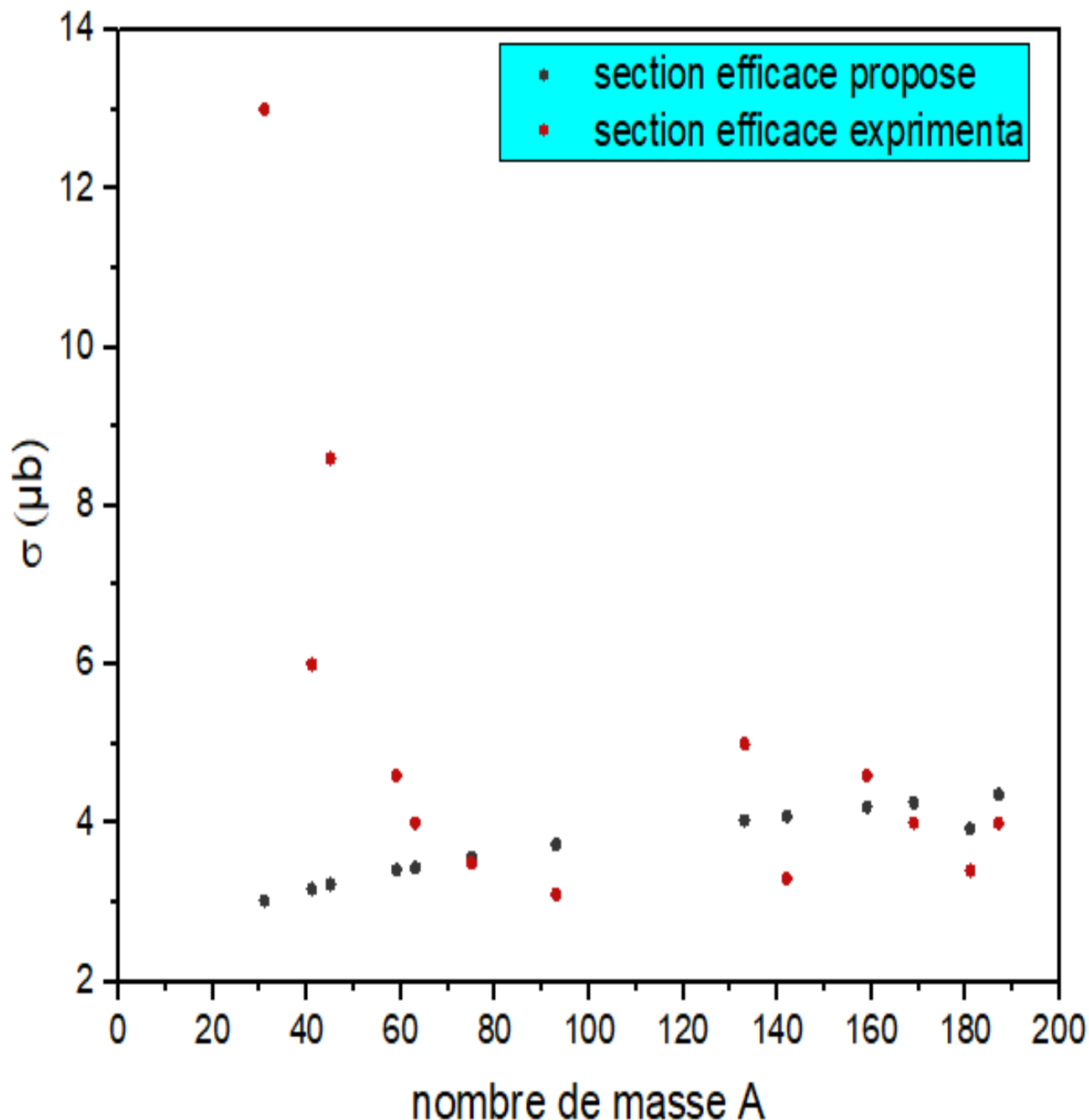


Figure III.5: sections efficaces calculées et mesurées par Csikai et Szalay, Qaim, Diksic et al. de la réaction nucléaire ($n, {}^3\text{He}$) en fonction de nombre de neutrons A pour les 13 atomes pris dans l'étude.

Le **Tableau III.3** donne les sections efficaces calculées de la réaction nucléaire (n, ^3He) en fonction de nombre de neutrons N pour les 13 atomes pris dans l'étude, ainsi le paramètre statistique Σ_i pour chaque cible, pour la réaction ^{75}As (n, ^3He) ^{73}Ga on trouve la plus basse valeur de Σ_i avec une valeur de 0.001.

| A | Z | Energie (MeV) | $\sigma_{exp} \pm \Delta \sigma_{exp}$ (μb) | Références | σ_{cal} (μb) | Σ_i |
|-----|----|------------------|---|----------------------------|-------------------------------|------------|
| 31 | 15 | 14.7 | 13 ± 6.5 | Qaim (1974) | 3.02 | 2.36 |
| 41 | 19 | 14.6 | 6 ± 3 | Qaim (1978) | 3.17 | 0.89 |
| 45 | 21 | 14.6 | 8.6 ± 4 | Qaim (1974) | 3.23 | 1.81 |
| 59 | 27 | 14.6 | 4.6 ± 2.1 | Qaim (1974) | 3.40 | 0.33 |
| 63 | 29 | 14.6 | 4 ± 2 | Qaim (1978) | 3.44 | 0.08 |
| 75 | 33 | 14.6 | 3.5 ± 1.9 | Qaim (1974) | 3.57 | 0.001 |
| 93 | 41 | 14.6 | 3.1 ± 1.5 | Qaim (1974) | 3.73 | 0.18 |
| 133 | 55 | 14.7 | 5 ± 3 | Csikai et Szalay (1965) | 3.81 | 0.16 |
| 142 | 58 | 14.7 | 3.3 ± 1.3 | Qaim (1978) | 4.03 | 0.32 |
| 159 | 65 | 14.6 | 4.6 ± 1.8 | Qaim (1978) | 4.09 | 0.08 |
| 169 | 69 | 14.6 | 4 ± 2 | Qaim (1978) | 4.20 | 0.01 |
| 118 | 73 | 14.6 | 3.4 ± 1.5 | Qaim (1974) | 4.26 | 0.33 |
| 187 | 75 | 14.6 | 4 ± 3 | Diksic et al (1974) | 4.33 | 0.01 |

Tableau III.3 : sections efficaces la réaction nucléaire calculées (n, ^3He) avec une énergie d'incidence de 14,6 MeV calculées par la formule suggérée et les données mesurées par Csikai et Szalay, Qaim, Diksic et al.

Conclusion

Le but de notre étude est de reproduire les sections efficaces expérimentales de la réaction nucléaire (n, ³He) avec une énergie d'incidence de 14,6 MeV, cela est fait en utilisant une formule semi empirique qui est base sur le modelé de pré équilibre, l'étude a concerné 13 éléments avec un nombre A : $31 \leq A \leq 187$ pour lesquels existent peu de mesures réalisées par Csikai et Szalay, Qaim, Diksic et al. L'étude vérifie aussi les données expérimentales qui ont une erreur absolue qui atteint 50%.

En comparant les paramètres statistiques Σ et χ^2 obtenus avec notre formule et les autres formules empiriques et semi empirique, on trouve que nos valeurs coïncident avec les valeurs mesure pour 10 éléments parmi 13 éléments, et les valeurs de Σ et χ^2 obtenus sont respectivement 6.32 et 0.63 qui sont inférieurs aux valeurs obtenues avec les formules de : Yigit, Broeders et konobeyev, Qaim.

On a calculé les sections efficaces de la réaction (n, ³He) ainsi les valeurs des paramètres statistiques via un algorithme écrit en langage Python dans Jupyter Notebook.

Les trois paramètres d'ajustement sont fixés avec un algorithme approprié pour avoir le minimum des paramètres statistiques Σ et χ^2 . Finalement la formule suggérée peut-être écrite comme suit :

$$\sigma(n, 3He) = \pi r_0^2 (A^{-1/3} + 1)^2 A^{-1/3} (\alpha_1(N - Z + 1)/A + \alpha_2)^{\alpha_3} \quad (\text{III.4})$$

Où :

$$r_0^2 = 1.3 \text{ fm}$$

Les paramètres α_1 , α_2 et α_3 sont ajustés respectivement : $9.880820 \times 10^{-9} \mu\text{b}$, $5.073337 \times 10^{-4} \mu\text{b}$, 1.512343.

Les résultats obtenus démontrent la puissance du modèle de pré-équilibre de décrire la réaction nucléaire (n, ³He) avec une énergie d'incidence de 14,6 MeV.

Notre formule semi empirique avec trois paramètres améliore les calculs et les rapproche des résultats expérimentaux.

Conclusion générale

Au cours de ce travail, nous étudions théoriquement les réactions nucléaires induites par des neutrons rapides d'énergie 14.6 MeV et qui conduit à la création de l'isotope de l'hélium ^3He . On note que ces réactions nucléaires sont réalisées existent dans des environnements où les neutrons libres existent avec une énergie et une vie longue telle que les réacteurs nucléaires, les accélérateurs, les sources neutroniques compactes et portatives. L'étude de ces réactions est important pour comprendre la physique des réacteurs nucléaires et aussi pour les recherches de radio protection et des techniques qui se basent sur les neutrons comme projectile.

Notre formule qui est une expression semi empirique en faisant appel à plusieurs variables comme le nombre de masse A, le nombre de charge Z et le nombre de neutrons N, et en contenant 3 paramètres fixés par un algorithme approprié pour coïncider les sections efficaces calculées avec celles mesurées. Notre formule est déduite de la formule semi-empirique proposée par Konobeyev et Broeders (2007), mais en introduisant le troisième paramètre afin d'améliorer les calculs. Dans la comparaison on utilise les données de la section efficace de la réaction nucléaire expérimentale $(n, ^3\text{He})$ mesurées par Csikai et Szalay, Qaim, Diksic et al. Avec une énergie 14,6 MeV.

Les valeurs des sections efficaces $(n, ^3\text{He})$ ont été évaluées pour 13 noyaux cibles de nombre de neutron N de 16 à 112. les 13 réactions nucléaires prises dans nos études sont : $^{31}\text{P} (n, ^3\text{He}) ^{29}\text{Al}$, $^{41}\text{K} (n, ^3\text{He}) ^{39}\text{Cl}$, $^{45}\text{Sc} (n, ^3\text{He}) ^{43}\text{K}$, $^{59}\text{Co} (n, ^3\text{He}) ^{59}\text{Mn}$, $^{63}\text{Cu} (n, ^3\text{He}) ^{61}\text{Co}$, $^{75}\text{As} (n, ^3\text{He}) ^{73}\text{Ga}$, $^{93}\text{Nb} (n, ^3\text{He}) ^{91}\text{Y}$, $^{103}\text{Rh} (n, ^3\text{He}) ^{101}\text{Tc}$, $^{133}\text{Cs} (n, ^3\text{He}) ^{131}\text{I}$, $^{142}\text{Ce} (n, ^3\text{He}) ^{140}\text{Ba}$, $^{169}\text{Tm} (n, ^3\text{He}) ^{167}\text{Ho}$, $^{187}\text{Re} (n, ^3\text{He}) ^{185}\text{Ta}$.

La formule semi-empirique proposée s'écrit :

$$\sigma(n, ^3\text{He}) = \pi r_0^2 (A^{-1/3} + 1)^2 A^{-1/3} \left(9.880820 \times 10^{-9} \frac{N - Z + 1}{A} + 5.073337 \right)^{1.512343} \times 10^{-4}$$

Avec trois cette formule donne une bonne description de la section efficace de réaction $(n, ^3\text{He})$ et donne la valeur la plus basse $\chi^2 = 0,63$ par rapport aux études précédentes.

Le but de ce travail est de calculer les sections efficaces de la réaction nucléaire ($n, {}^3\text{He}$) avec une énergie d'incidence de 14,6 MeV, l'étude a concerné 13 éléments pour lesquels existent peu de mesures. En comparant les paramètres statistiques Σ et χ^2 obtenus avec notre formule et les autres formules empiriques et semi empirique, on trouve que nos valeurs coïncident avec les valeurs mesurées.

Les résultats obtenus démontrent la puissance du modèle de pré-équilibre de décrire la réaction nucléaire ($n, {}^3\text{He}$) avec une énergie d'incidence de 14,6 MeV, et arrive à reproduire les sections efficaces notamment pour des cibles de nombre de masse $60 \leq A \leq 187$

Annexe

Program calcule la section efficace propose dans cette mémoire

```
#ce programme calcule la section efficace propose dans cette mémoire
import numpy as np
from math import pi
alpha1=9.880820e-9
alpha2=5.073337e-4
alpha3=1.512343
r=1.3e-13 #conversion du fm au cm
n=13
m=3
A=np.array([31,41,45,59,63,75,93,133,142,159,169,118,187]) #Nombre de masse

Z=np.array([15,19,21,27,29,33,41,55,58,65,69,73,75]) #nombre de protons(de_
↳charge)

erreurs_exp=[6.5,3,4,2.1,2,1.9,1.5,3,1.3,1.8,2,1.5,3] #les erreurs_
↳expérimentales
s_exp=[13,6,8.6,4.6,4,3.5,3.1,5,3.3,4.6,4,3.4,4] #les valeurs expérimentales de_
↳la section efficace

N=A-Z #calcule N (nombre de neutrons)
print("N=",N)

Xi=[]

for A,Z,N ,s_exp,erreurs_exp in zip (A,Z,N,s_exp,erreurs_exp):
#calcule la section efficace inelastique
    s_e=pi*r**2*(A**(1/3)+1)**2
    #print('s_e=',s_e)
#calcule la section efficace propose
    S_cal=s_e*A**(-1/3)*(alpha1*((N-Z+1)/A)+alpha2)**alpha3
    s_cal=S_cal*1e30 #conversion du cm² au µb
    print ("la section efficace calcule est : ",end="")
    print (round(s_cal,2))

#calcule le paramètre SIGMA
```

```

SIGMA = ((s_exp-s_cal)/erreurs_exp)**2

rapport=s_exp / s_cal
print ("le rapport s_exp / s_cal est : ",end="")
print (round(rapport,2))

#print('si',si)

Xi.append(SIGMA)
print (" SIGMA = ",end="")
print (round(SIGMA,2))

#calcule la somme du Paramètre du moindre carrée

SIGMA =sum(Xi)

print("\n*****\n")
print ("le Paramètre du moindre carrée est : ",end="")
print (round(SIGMA ,2))

xsquare=(SIGMA/(n-m)) #calcule le paramètre des échantillons
print("le paramètre des échantillons est : ",end="")
print (round(xsquare,2))

print("\x1b[6;30;42m" + "          THE END          " + "\x1b[0m")

```

N= [16 22 24 32 34 42 52 78 84 94 100 45 112]

la section efficace calcule est : 3.02

le rapport s_exp / s_cal est : 4.31

SIGMA = 2.36

la section efficace calcule est : 3.17

le rapport s_exp / s_cal est : 1.89

SIGMA = 0.89

la section efficace calcule est : 3.23

le rapport s_exp / s_cal est : 2.67

SIGMA = 1.81

la section efficace calcule est : 3.4

le rapport s_{exp}/s_{cal} est : 1.35
SIGMA = 0.33
la section efficace calcule est : 3.44
le rapport s_{exp}/s_{cal} est : 1.16
SIGMA = 0.08
la section efficace calcule est : 3.57
le rapport s_{exp}/s_{cal} est : 0.98
SIGMA = 0.0
la section efficace calcule est : 3.73
le rapport s_{exp}/s_{cal} est : 0.83
SIGMA = 0.18
la section efficace calcule est : 4.03
le rapport s_{exp}/s_{cal} est : 1.24
SIGMA = 0.1
la section efficace calcule est : 4.09
le rapport s_{exp}/s_{cal} est : 0.81
SIGMA = 0.37
la section efficace calcule est : 4.2
le rapport s_{exp}/s_{cal} est : 1.1
SIGMA = 0.05
la section efficace calcule est : 4.26
le rapport s_{exp}/s_{cal} est : 0.94
SIGMA = 0.02
la section efficace calcule est : 3.93
le rapport s_{exp}/s_{cal} est : 0.87
SIGMA = 0.12
la section efficace calcule est : 4.36
le rapport s_{exp}/s_{cal} est : 0.92
SIGMA = 0.01

le Paramètre du moindre carrée est : 6.32
le paramètre des échantillons est : 0.63

THE END

Références Bibliographiques

- [1] Broeders, C. H. M., & Konobeyev, A. Y. (2006). Semi-empirical systematics of (n, p) reaction cross-section at 14.5, 20, and 30 MeV. Nuclear Physics A, 780(3-4), 130-145.
- [2] Suomijärvi Tiina. Physique Nucléaire et Applications, P 19.
- [3] NAIDJI, S. (2018). Évaluation empirique des sections efficaces de la réaction (n, ^3He). mémoire Master. M'sila. P 5
- [4] 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, ^3He), thèse doctorat, USTHB, 2016, P11-19
- [5] <http://hebergement.u-psud.fr/m2apim/cours/cours%20APIM-1/1.%20Classif-character.%20neutrons%20-%202010.pdf>
- [6] Principes fondamentaux des réacteurs CANDU, P48,49
- [7] <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-fission-nucleaire-2462/>
- [8] Qaim, S.M., (1974). A study of (n, ^3He) reactions at 14.6 MeV on medium and heavy mass nuclei. J. Inorg. Nucl. Chem. 36, 239
- [9] Qaim, S. M. (1978). A systematic investigation of (n, ^3He) reactions at 14.6 mev and an analysis of the gross trend in the cross-section data. Radiochimica Acta, 25(1), 13-16.
- [10] Csikai, J., Szalay, A., (1965). Observation of (n, ^3He) reaction. Nucl. Phys. 68, 546
- [11] Diksic, M., Strohal, P., Slaus, I., (1974). (n, ^3He) and (n,t) reaction cross section at 14 MeV. J. Inorg. Nucl. Chem. 36, 477
- [12] Yiğit, M. (2015). Empirical formula on (n, ^3He) reaction cross sections at 14.6 MeV neutrons. Applied Radiation and Isotopes, 105, 15-19.
- [13] Schwerer, O. (2008). EXFOR formats description for users (EXFOR basics). Documentation Series of the IAEA Nuclear Data Section.
- [14] Nehaoua, S. (2020). Semi-empirical systematic of (n, ^3He) reaction cross section at 14, 6 MeV. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 484, 71-74.
- [15] Büyüksülu, H., Kaplan, A., Tel, E., Aydın, A., Yıldırım, G., & Bölükdemir, M. H. (2010). Theoretical cross sections of ^{209}Bi , ^{232}Th , ^{235}U and ^{238}U on deuteron-induced reactions. Annals of Nuclear Energy, 37(4), 534-539.
- [16] Lishan, Y., & Yuling, J. (1992). Systematics of the (n, ^3He) reaction cross sections at 14 MeV. Chin. J. Nucl. Phys, 14, 95.

- [17] Atasoy, H., & Dokmen, S. (1995). Prediction of $(n, \text{sup } 3/\text{He})$ cross-sections around 14 MeV. IEEE transactions on nuclear science, 42(1), 52-54.
- [18] Bölükdemir, M. H., Tel, E., Aktı, N. N., Aydın, A., & Okuducu, Ş. (2010). Improved Formula for $(n, \text{ } 3\text{He})$ Fusion Reactions Cross Sections Using Optical Model. Journal of fusion energy, 29(1), 13-18.
- [19] Yettou, L., & Belgaid, M. (2014). Semi-empirical systematics of $(n, \text{He-3})$ cross sections for 14.6 MeV neutrons. Applied Radiation and Isotopes, 94, 49-53.
- [20] <https://jupyter-notebook.readthedocs.io/en/stable/notebook.html>

ملخص:

في عملنا هذا اقترحنا صيغة نصف عشوائية جديدة لحساب المقطع الفعال للتفاعل $(n, {}^3\text{He})$ مع نيوترونات واردة بطاقة 14.6 MeV . الصيغة المقترحة تحتوي على ثلاث معاملات تعين عشوائيا للحصول على تطابق مثالي بين البيانات الحسابية و التجريبية، الصيغة المقترحة تعتمد على نموذج ما قبل التوازن. يستخدم نموذج الإكسيتون ذي الشكل المغلق ونموذج الاندماج لوصف انبعاث الجسيمات ${}^3\text{He}$ لإعادة التوازن في التفاعل الناجم عن النيوترونات.

Résumé:

Dans ce travail une nouvelle formule semi-empirique est proposée pour le calcul de la section efficace de la réaction nucléaire $(n, {}^3\text{He})$ à une énergie d'incidence de 14.6 MeV . Elle contient trois paramètres libres qui sont ajustés pour se concorder les données calculées avec les données expérimentales, notre formule favorise le processus du pré-équilibre. Le modèle d'exciton en forme fermée et le modèle de coalescence sont utilisés pour décrire l'émission de particules de ${}^3\text{He}$ de pré-équilibre dans la réaction induite par neutron.

Abstract:

A new semi-empirical formula for the calculation of $(n, {}^3\text{He})$ reaction cross section at an energy of 14.6 MeV is suggested, it contains three free parameters to fit few experimental data, this formula is based on pre-equilibrium process. The exciton model in closed form and coalescence model are used to describe the preequilibrium ${}^3\text{He}$ particle emission in reaction induced by neutron.