

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/09/2023



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

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

**Par: NAIMI Yaakoub**

**Intitulé**

**Etude systématique de la réaction nucléaire  
(n,<sup>3</sup>He) et calcul des fonctions d'excitation  
avec le code EMPIRE**

**Soutenu le 21 / 06 /2023 devant le jury composé de:**

A. METATLA	Université de Msila	Président
S. NEHAOUA	Université de Msila	Rapporteur
M-L. YAHIAOUI	Centre de recherches nucléaires de Birine CRNB	Co-rapporteur
R. BOUCHAMA	Centre de recherches nucléaires de Birine CRNB	Examineur
O. DENDEN	Centre de recherches nucléaires de Birine CRNB	Examineur

**Année universitaire : 2022/2023**

## *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire avec ma profonde gratitude à :  
ma mère, mon père, ma sœur et ma tante pour m'avoir  
motivé tout au long de mon parcours universitaire et pour  
m'avoir fourni tous les moyens de soutien.*

*Je tiens également à remercier tous mes amis et collègues,  
en particulier ceux qui m'ont apporté un soutien moral, une  
amitié précieuse et inoubliable, et tous ceux qui ont contribué  
de près ou de loin à ce travail*

***Yaakoub NAIMI***

## **Remerciement**

*Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un mémoire de fin d'études à l'université Mohamed Boudiaf de Msila et le centre de recherche nucléaire de Birine CRNB.*

*Je présente mes remerciements à mon rapporteur **Dr. Samra Nehaoua, maître de conférences à l'université de Msila**, pour ses conseils et sa disponibilité.*

*Je voudrais également adresser mes sincères remerciements à mon co-rapporteur **Dr Mohammed Laid Yahiaoui, chercheur principal au centre de recherche nucléaire de Birine CRNB** pour ses informations précieuses, ainsi qu'un soutien moral*

*Je remercie sincèrement les membres du jury pour l'honneur de partager leur expertise et leurs compétences dans l'évaluation de ce modeste travail : le président de jury **Dr. A. Metatla, maître de conférence à l'université de Msila**, **Dr Bouchama Rafik, chercheur confirmé au Centre de recherche nucléaire de Birine CRNB**, et **Dr Omar Denden, chercheur principal au Centre de recherche nucléaire de Birine CRNB** d'avoir accepté d'évaluer ce travail.*

*Je remercie tout le personnel du département de physique de l'université de Msila, en particulier mes professeurs, qui m'ont enseigné pendant mes études, et les remercier pour leurs efforts dans mon cursus pour m'amener à la fin de la formation.*

**Yaakoub NAIMI**

# Sommaire

Introduction générale	Er
.....	
<b>reur ! Signet non défini.</b>	

## Chapitre I: Modèles théoriques des réactions nucléaires

I.1. Réactions neutroniques	Er
.....	
<b>reur ! Signet non défini.</b>	

I.2. Modèles théoriques :	Er
.....	
<b>reur ! Signet non défini.</b>	

I.2.1. Modèle du noyau composé	Er
.....	
<b>reur ! Signet non défini.</b>	

I.2.2. Le modèle optique	Er
.....	
<b>reur ! Signet non défini.</b>	

I.2.3. Le modèle de pré-équilibre	Er
.....	
<b>reur ! Signet non défini.</b>	

I.2.4. Le modèle excitant	Er
.....	
<b>reur ! Signet non défini.</b>	

I.3. section efficace totale	Er
.....	
<b>reur ! Signet non défini.</b>	

## Chapitre II : Code de simulation nucléaire EMPIRE

II-1 Code EMPIRE	Er
.....	
<b>reur ! Signet non défini.</b>	

II-2 Structure et modules EMPIRE	Er
.....	
<b>reur ! Signet non défini.</b>	

II-3 Fichiers input et output de Empire	Er
.....	

reur ! Signet non défini.

II-4 Bibliothèque de données nucléaires expérimentales EXFOR  
..... Er

reur ! Signet non défini.

II-5 Bibliothèque des données nucléaires évaluées ENDF  
..... Er

reur ! Signet non défini.

### Chapitre III: Analyse des réactions nucléaires induites par des neutrons rapides productrices de $^3\text{He}$ avec le code EMPIRE

III-1 Étude des données expérimentales de la réaction neutronique ( $n, ^3\text{He}$ )  
..... Er

reur ! Signet non défini.

III-2 Calcul des sections efficaces de la réaction ( $n, ^3\text{He}$ ) en utilisant le code EMPIRE  
..... Er

reur ! Signet non défini.

III-3 Comparaison des sections efficaces expérimentales et calculées  
..... Er

reur ! Signet non défini.

III-4 Évaluation du rapport entre les sections efficaces expérimentales et calculées  
..... Er

reur ! Signet non défini.

III-5 Résultats et discussion  
..... Er

reur ! Signet non défini.

### Chapitre IV :Étude systématique de la réactionneutronique ( $n, ^3\text{He}$ )

IV-1 Formule semi-empirique proposée pour le calcul de la sectionefficace de la réaction  
neutronique ( $n, ^3\text{He}$ )  
..... Er

reur ! Signet non défini.

IV-2 Paramètre statistique  
..... Er

	<b>reur ! Signet non défini.</b>	
IV-3 Paramètre statistique global	.....	<b>Er</b>
	<b>reur ! Signet non défini.</b>	
IV-4 Comparaison des données expérimentales et systématique	.....	<b>Er</b>
	<b>reur ! Signet non défini.</b>	
IV-5 Résultats et discussion	.....	<b>Er</b>
	<b>reur ! Signet non défini.</b>	
Conclusion générale	.....	<b>Er</b>
	<b>reur ! Signet non défini.</b>	
Annexe	.....	<b>Err</b>
	<b>eur ! Signet non défini.</b>	
Bibliographie	.....	<b>Err</b>
	<b>eur ! Signet non défini.</b>	
Résumé	.....	<b>Er</b>
	<b>reur ! Signet non défini.</b>	

## Introduction générale

Les fonctions d'excitation des réactions nucléaires induites par des nucléons ont fait l'objet des études intenses en physique nucléaire, en particulier celles induites par des neutrons d'énergie allant de quelques MeV à des centaines de MeV, ces grandeurs aident les scientifiques à mieux comprendre la structure du noyau et le scénario des différentes réactions nucléaires, il est important dans plusieurs applications académiques, industrielles ou médicales. Le besoin croissant en données nucléaires relatives à ces réactions nucléaires a poussé les expérimentateurs et les théoriciens à développer des méthodes et des modèles théoriques. Les données expérimentales représentent un test pour vérifier la consistance et la validité des modèles nucléaires conçus pour l'analyse des interactions nucléaires. Ces modèles théoriques permettent à leur tour de combler le vide des données qui ne peuvent pas être mesurées, cette procédure permet de créer une bibliothèque internationale des données évaluées qui regroupe les données expérimentales et les données théoriques comme: ENDF, TENDL, JENDL, JEFF.

Dans ce travail on s'intéresse à la réaction neutronique produisant l'hélium 3, on explore les modèles théoriques et les mesures expérimentales qui déterminent la section efficace à une énergie d'incidence égale à 14,6 MeV. Vu les difficultés rencontrées dans la mesure des sections efficaces des réactions neutroniques ( $n, {}^3\text{He}$ ) les expérimentateurs n'ont réussi qu'à déterminer quelques valeurs pour une dizaine d'atomes :  ${}^{31}\text{P}(n, {}^3\text{He}){}^{29}\text{Si}$ ,  ${}^{41}\text{K}(n, {}^3\text{He}){}^{39}\text{Cl}$ ,  ${}^{45}\text{Sc}(n, {}^3\text{He}){}^{43}\text{K}$ ,  ${}^{59}\text{Co}(n, {}^3\text{He}){}^{59}\text{Fe}$ ,  ${}^{63}\text{Cu}(n, {}^3\text{He}){}^{61}\text{Co}$ ,  ${}^{75}\text{As}(n, {}^3\text{He}){}^{73}\text{Ga}$ ,  ${}^{93}\text{Nb}(n, {}^3\text{He}){}^{91}\text{Y}$ ,  ${}^{103}\text{Rh}(n, {}^3\text{He}){}^{101}\text{Tc}$ ,  ${}^{133}\text{Cs}(n, {}^3\text{He}){}^{131}\text{I}$ ,  ${}^{142}\text{Ce}(n, {}^3\text{He}){}^{140}\text{Ba}$ ,  ${}^{159}\text{Tb}(n, {}^3\text{He}){}^{157}\text{Eu}$ ,  ${}^{169}\text{Tm}(n, {}^3\text{He}){}^{167}\text{Ho}$  et  ${}^{181}\text{Ta}(n, {}^3\text{He}){}^{179}\text{Lu}$ .

Les nucléaristes ont utilisé des modèles théoriques pour décrire la réaction neutronique produisant l'hélium 3, l'étude systématique s'appuie sur ces modèles en particulier le modèle de pré-équilibre et sur une paramétrisation fixée par les données expérimentales. Cette étude systématique aide à extrapoler les sections efficaces pour des atomes qui ne n'ont pas été le siège d'une expérience.

Le code nucléaire EMPIRE est un outil flexible et utile pour la recherche fondamentale et l'évaluation des données nucléaires. Ce code permet la simulation et la modélisation avancée des réactions nucléaires avec plusieurs modèles théoriques, il offre la possibilité de combiner plusieurs approches théoriques, en choisissant les paramètres d'entrée appropriés pour définir le

système de réaction :(cible et projectile), les produits (particules émises : He,  $^3\text{He}$ , n, p,.. rayonnement gamma, ions chargées, isotopes stables ou excités), ainsi les conditions de réactions nucléaires : énergie de réaction,... le code cède plusieurs grandeurs de la réaction en particulier les sections efficaces microscopiques et les sections efficaces différentielles. Le fichier output peut être écrit dans un format ENDF. Le code donne aussi la possibilité de comparer les données expérimentales et les données théoriques pour une réaction nucléaire spécifique. Il est composé d'un certain nombre de codes écrits en fortran, de bibliothèques de paramètres d'entrée et de bibliothèques de données expérimentales (EXFOR/CSISRS) exploitées au moyen de l'interface utilisateur graphique (GUI).

Dans ce travail, nous présentons les sections efficaces de la réaction nucléaire (n,  $^3\text{He}$ ) pour 13 cibles atomiques avec un nombre de masse A qui varie de 31 à 187, qui sont inclus dans le code nucléaire Empire, ensuite nous reproduisant ces sections efficaces en utilisant une formule semi-empirique, on compare les données systématiques aux données issues du code Empire et on essaye de focaliser sur la qualité de la formule semi empirique et les limites du code Empire.

Ce manuscrit se subdivise en quatre chapitres. Dans le premier, on rappelle les modèles et mécanismes théoriques utilisées pour la description des réactions nucléaires, ainsi les différents réactions possibles induites par un neutron rapide, on présente également la notion de la section efficace totale. Au second chapitre on expose le code de simulation nucléaire EMPIRE, ses fichiers input et output et les différentes données accessibles à travers ce code, on analyse son fonctionnement et ses caractéristiques tout en fournissant des exemples de fichiers d'entrée et de sortie, ainsi on verra un aperçu des données nucléaires expérimentales et évaluées EXFOR et ENDF. Au troisième chapitre, on présente la variation des fonctions d'excitation déduites du code Empire en fonction de l'énergie incidente. Au quatrième chapitre on entame une étude systématique et on définit les paramètres statistiques, cela est réalisé en proposant une formule contenant 3 paramètres libres En fin on conclue ce mémoire par une évaluation les données incluses dans le code EMPIRE, et on reproductions les fonctions d'excitation pour les 13 réactions considérées avec la systématique proposée.

# **Chapitre I**

## **Modèles théoriques des réactions nucléaires**

Dans ce chapitre on cite les réactions neutroniques possibles en envoyant un neutron sur une cible atomique telles que : la diffusion élastique et inélastique, la fusion nucléaire, la fission nucléaire, la capture de neutron et la désintégration radioactive, ensuite on présente les modèles théorique utilisés pour la description des réactions nucléaires en particulier le modèle de pré-équilibre et le modèle exciton qui ont réussi à décrire les réactions neutroniques produisant l'hélium 3. En fin du chapitre on définit la grandeur principale utilisée dans l'analyse des réactions nucléaires qui est la section efficace microscopique.

### I.1. Réactions neutroniques

La compréhension des réactions nucléaires est cruciale pour la compréhension des réactions de fusion. Quand on envoie un neutron sur un noyau cible il y a plusieurs réactions nucléaires possibles. Les réactions nucléaires peuvent être initiées par des particules légères telles que : proton, neutrons, électron. Les réactions neutroniques peuvent se produire de plusieurs façons [1] :

- **La diffusion élastique et inélastique** : Si le neutron sortant a la même énergie que le neutron projectile, on aura affaire à la réaction appelée diffusion élastique. Si le neutron est diffusé avec une énergie différente de celle d'incidence, on parle de diffusion inélastique.
- **La fission nucléaire**, c'est le processus par lequel un noyau lourd provoqué par un neutron thermique ou rapide se divise en deux noyaux plus légers en libérant également une grande quantité d'énergie. Ce processus est utilisé dans les réacteurs nucléaires pour produire de l'énergie électrique.
- **La capture de neutrons** est un processus par lequel un noyau absorbe un neutron, formant ainsi un noyau plus lourd et plus instable. Ce processus est utilisé pour produire des isotopes radioactifs pour la médecine et l'industrie.
- **la désintégration radioactive** est le processus par lequel un noyau instable après l'absorption d'un neutron se désintègre en émettant une particule ou un rayonnement gamma.

Dans notre étude on s'intéresse particulièrement aux réactions impliquant des neutrons comme projectile.

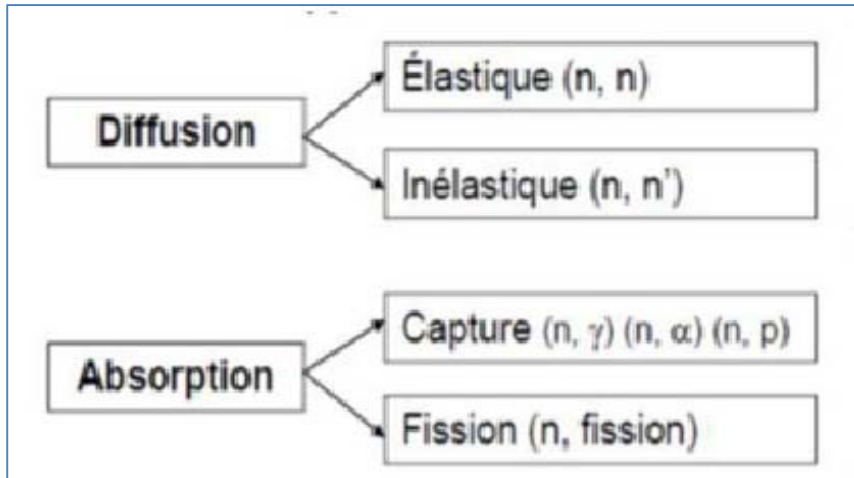
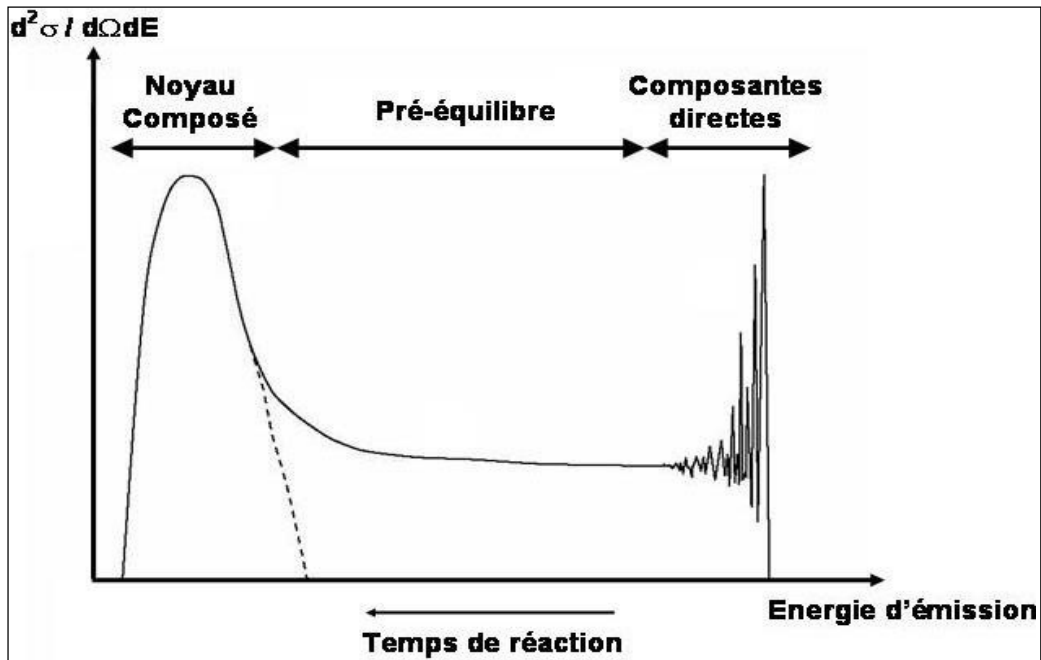


Figure I.1 : réactions neutroniques possibles

## I.2. Modèles théoriques :

Le mécanisme des réactions nucléaires est le processus par lequel les noyaux atomiques interagissent les uns avec les autres qui conduisent à des changements des éléments ou seulement de leurs énergies. La modélisation des réactions nucléaires est complexe, malgré plus de cinquante années d'efforts, elle ne cesse de progresser par des améliorations régulières des théories.

Pour les réactions dit directes telle que la diffusion élastique ou la diffusion inélastique on utilise le **modèle optique** pour les décrire. Pour les réactions impliquant l'absorption du neutron projectile, le noyau résultant de cette réaction peut être excité et tendre à se désexciter en émettant des particules, Ces particules auront une énergie d'émission faible, on observe un spectre d'évaporation qui est décrit avec le **modèle du noyau composé** [2]. 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. Les réactions qui n'impliquent pas l'absorption du neutron et ne sont pas assez rapides sont dans la zone de recouvrement décrite par le **modèle de pré-équilibre** si l'énergie du projectile est inférieure à 200 MeV et par le **modèle de cascade intra nucléaire** pour de plus hautes énergies [3].



**Figure I.2** : section efficace doublement différentielle pour les modèles : noyau composé, pré équilibre et le modèle optique.

### I.2.1. Modèle du noyau composé

En 1935 le modèle du noyau composé est introduite, il repose sur la fameuse image utilisée par Niels Bohr : *" Les nucléons qui composent le noyau sont maintenus dans un puits de potentiel, comme des billes aux creux d'un cendrier. Quand une nouvelle bille entre dans le cendrier, elle subit de multiples collisions et ne peut s'échapper que difficilement "*.

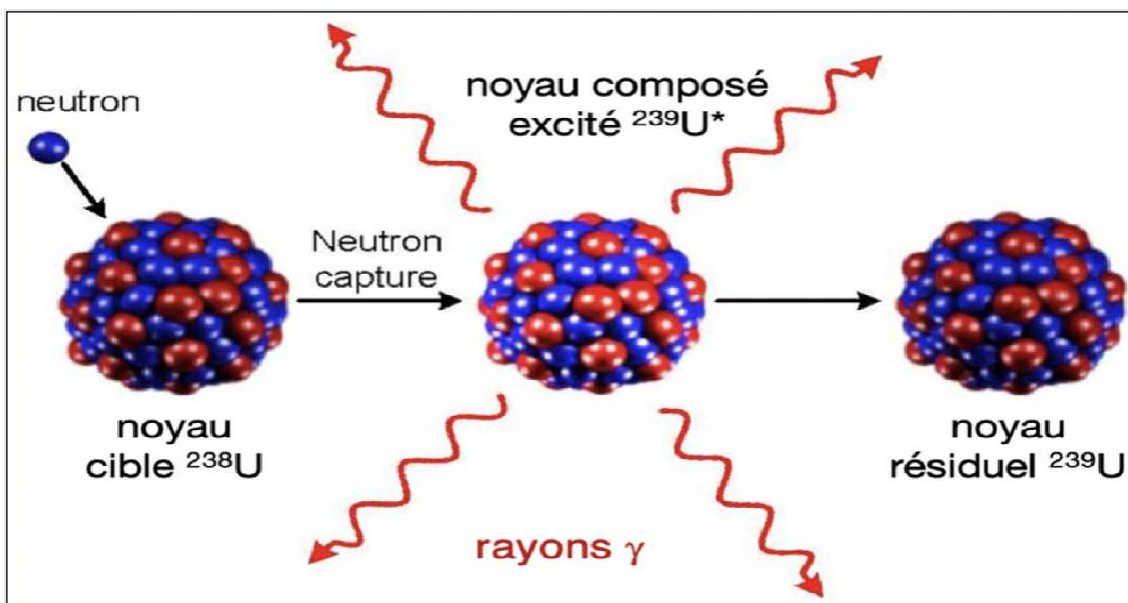
Cette vision revient à considérer que les forces nucléaires sont si fortes que lors d'une réaction entre un projectile et un noyau, le projectile est capturé et ne peut s'échapper avant d'avoir partagé son énergie avec les nucléons constituant le noyau [4]. Cette conception implique que le noyau composé = projectile +cible oublie complètement la façon dont il a été formé. Plus précisément, la formation et la désexcitation du noyau composé sont deux processus indépendants. En d'autres termes, la désexcitation du noyau composé dépend uniquement de ses caractéristiques intrinsèques (énergie, moment angulaire, parité). Cette propriété est

particulièrement intéressante puisqu'elle permet de calculer les sections efficaces des différentes voies de réactions ouvertes à l'aide de considérations purement statistiques.

Dans ce modèle deux approches sont possibles. La première, développée dans les années 40 par Weisskopf et Ewing ne prend pas en compte la conservation du moment angulaire. Elle ne permet donc pas de décrire les sections efficaces de réaction vers des niveaux discrets et ne peut pas non plus permettre de calculer des distributions angulaires. La seconde est la théorie de Hauser- Feshbach développée en 1952, qui pallie les manques de la théorie de Weisskopf - Ewing [5] :

Quelle que soit la théorie utilisée, l'hypothèse d'indépendance entre la formation du noyau composé et sa désexcitation permet d'écrire la section efficace de réaction comme le produit de la section efficace de formation du noyau composé par sa probabilité de décroissance dans une voie de sortie donnée. Les deux termes peuvent être exprimés en fonction de coefficients fournis par le modèle optique appelés coefficients de transmission. Lorsque l'on décompose l'onde associée à un projectile en une superposition d'ondes partielles, les coefficients de transmission représentent la fraction de chacune des ondes partielles absorbée par le noyau. Bien sûr, on peut aussi voir ces coefficients comme la fraction émise par le noyau ce qui permet alors de traiter la désexcitation du noyau composé. Donc il faut disposer d'un potentiel optique pour décrire l'interaction entre le projectile et la cible, mais aussi de potentiels optiques pour décrire les émissions de particules légères à partir du noyau composé.

Notons enfin que l'hypothèse d'indépendance entre la formation et la décroissance du noyau composé, si elle est pratique, n'est qu'une approximation. Il a été démontré qu'il est nécessaire de corriger la théorie d'Hauser- Feshbach pour prendre en compte ce que l'on nomme les corrections dues aux fluctuations des largeurs de voie [6].



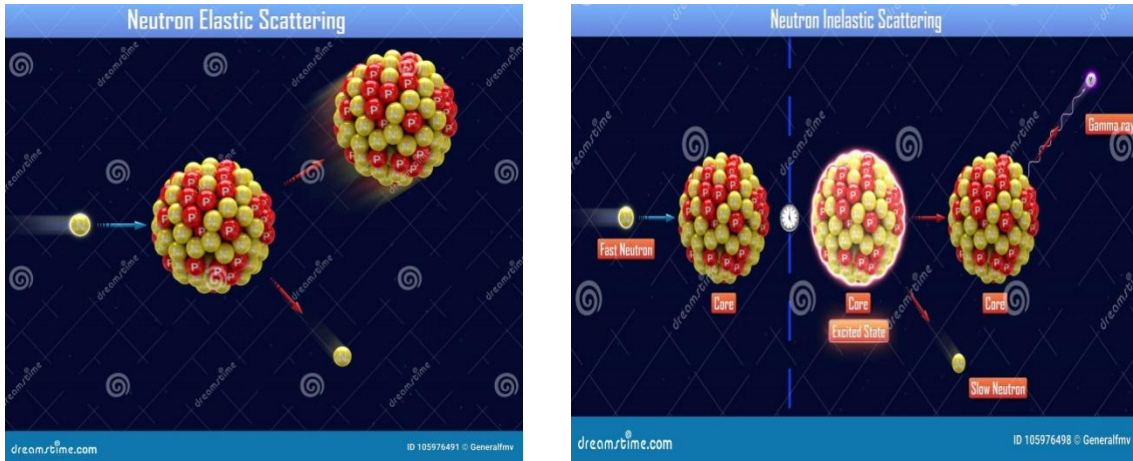
**Figure I.3** : modèle du noyau composé est valable pour la capture d'un neutron.

### I.2.2. Le modèle optique

En physique nucléaire, une réaction directe est une réaction nucléaire qui implique une collision entre deux noyaux où ils interagissent brièvement avant de se séparer, sans former de noyaux composés instables. Elle est produite des particules émises à haute énergie, telles que des protons, des neutrons, des particules alpha. Les réactions directes sont souvent utilisées pour produire des noyaux instables dans des états excités, qui peuvent ensuite être étudiés en détail pour comprendre leurs propriétés. Les réactions directes sont également utilisées pour la production de radio-isotopes pour des applications médicales et industrielles. Cependant, les réactions directes peuvent être difficiles à étudier car elles se produisent à des énergies très élevées et sont souvent accompagnées de bruit de fond dû aux réactions indirectes et à d'autres processus qui se produisent en même temps. Les physiciens nucléaires utilisent des détecteurs sophistiqués et des techniques d'analyse pour séparer les signaux des réactions directes de ceux des autres processus, afin de mieux comprendre les mécanismes de ces réactions.

Pour les réactions nucléaires directes le modèle optique et le plus approprié, il vient de l'analogie entre une onde lumineuse qui rencontre un objet et un projectile nucléaire qui rencontre un noyau cible. C'est une approche de la diffusion nucléon-noyau dans laquelle le nucléon

incident interagit avec un potentiel complexe représentant l'ensemble des nucléons qui constituent le noyau cible. A l'échelle subatomique, c'est la mécanique quantique qui régit ce phénomène. Le nucléon projectile est décrit comme une fonction d'onde, cette onde, réfractée par le potentiel représentant le noyau cible, interfère avec l'onde incidente en produisant des figures de diffraction. De plus, l'onde associée au projectile est partiellement absorbée par la partie imaginaire du potentiel optique, figurant toutes les voies non traitées explicitement.



**Figure I.4 :** Exemples d'une réaction directe : diffusion élastique et inélastique d'un neutron.

La difficulté du modèle optique consiste, pour une cible donnée et un projectile d'une énergie donnée, à connaître le potentiel complexe qui introduit dans l'équation de Schrödinger décrivant le mouvement du projectile. Pour cela, deux approches sont possibles :

- **L'approche semi-microscopique** cherche à évaluer le potentiel optique, à partir d'ingrédients les plus fondamentaux et consiste à séparer le problème en deux sous problèmes plus simples. La description de l'interaction d'un projectile avec l'ensemble des nucléons constituant le noyau cible peut se décomposer en une description de la structure du noyau cible et une description de l'interaction du projectile avec les nucléons de la cible [7].
- **L'approche phénoménologique**, où le potentiel est construit à l'aide de fonctions simples dont les paramètres sont ajustés de façon à reproduire le plus fidèlement possible diverses données expérimentales.

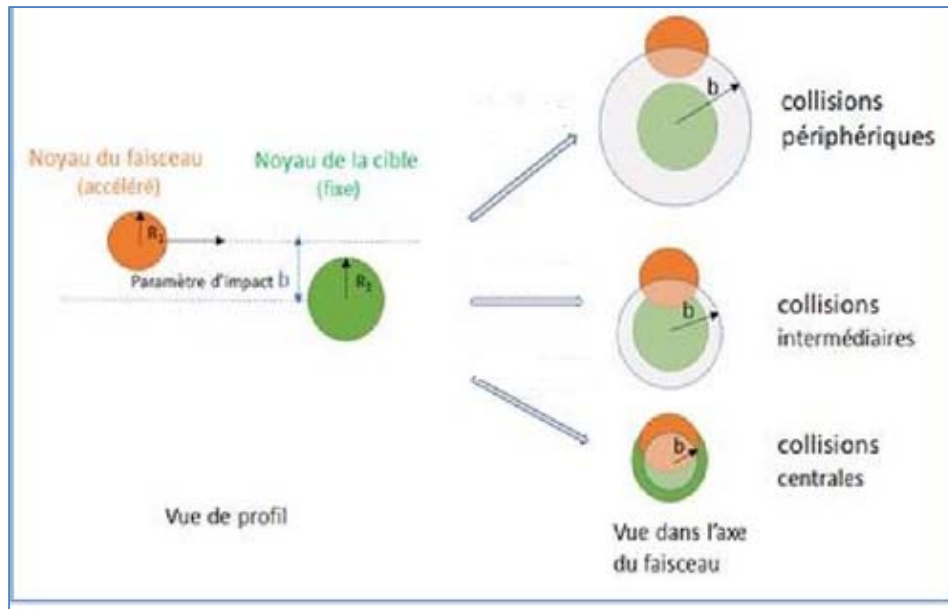
### **I.2.3. Le modèle de pré-équilibre**

Le besoin d'introduire la notion de pré-équilibre est apparu lorsque des énergies de projectile supérieures à la dizaine de MeV ont été disponibles. En effet, à basse énergie, il était parfaitement possible de combiner le modèle du noyau composé avec les composantes directes fournies par le potentiel optique pour décrire de manière satisfaisante les données expérimentales. Par contre dès lors que l'énergie du projectile est grande, il peut y avoir des émissions de particules qui ne sont pas correctement décrites par le modèle du noyau composé.

Dans une vision semi-classique, le projectile subit des chocs successifs avec les nucléons du noyau et le système composé de cible et projectile peut émettre des particules avant de parvenir à une situation d'équilibre. Ces particules ont une énergie moyenne plus élevée que les particules émises après que la situation d'équilibre soit atteinte.

Plusieurs approches ont été utilisées pour décrire le processus de pré-équilibre. On peut grossièrement subdiviser ces approches en deux groupes : les approches semi-classiques et les approches conformes aux règles de la mécanique quantique.

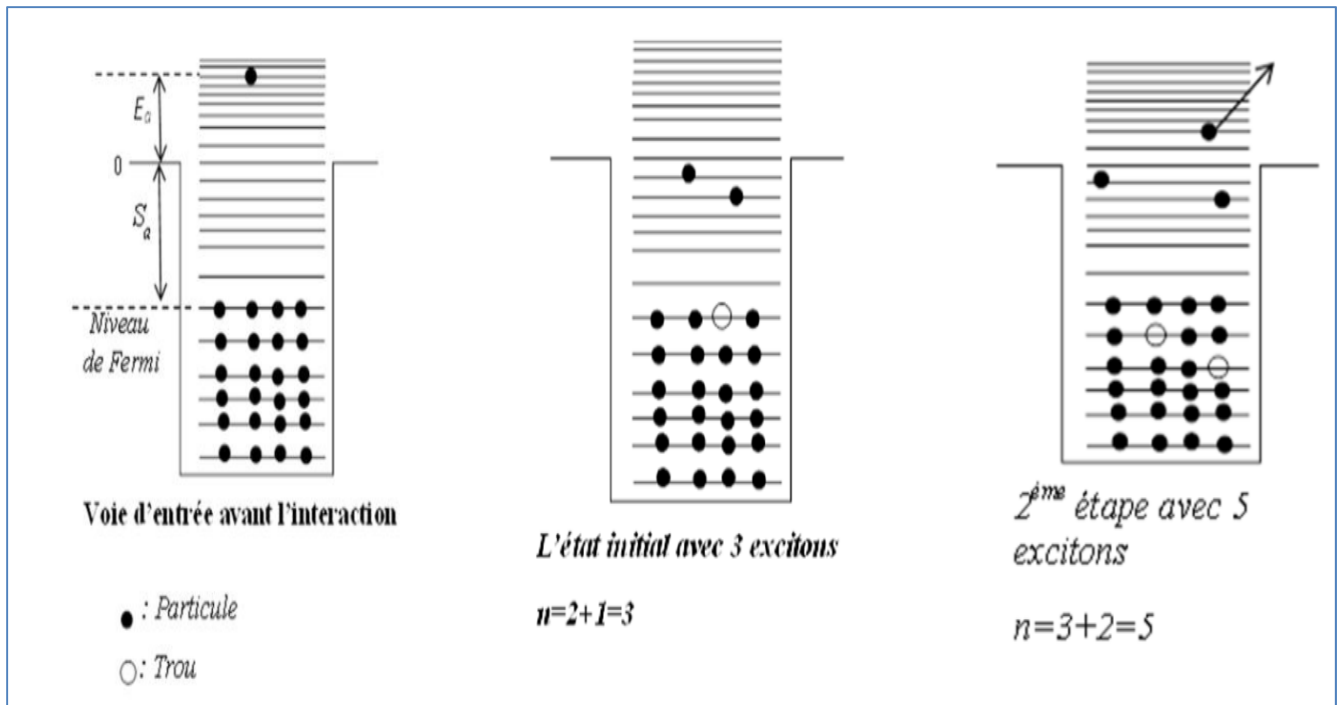
Les approches quantiques sont plus correctes, mais la plus grande ancienneté des approches semi-classiques fait qu'elles sont aussi performantes que les approches quantiques lorsqu'il s'agit de décrire les données expérimentales, et surtout plus faciles à utiliser sur le plan numérique. Ces approches sont actuellement couramment utilisées dans les codes de réactions nucléaires. La phase de pré-équilibre se réfère à la période de temps qui suit immédiatement une réaction nucléaire où les nucléons sont excités et se déplacent rapidement dans le noyau avant qu'il atteigne un état d'équilibre thermique. Pendant cette phase, les noyaux nouvellement formés émettent des particules telles que des protons, des neutrons, des particules alpha, etc., jusqu'à ce qu'ils atteignent un état d'équilibre avec leur environnement. Cette phase peut durer de quelques femtosecondes ( $10^{-15}$  s) à plusieurs picosecondes ( $10^{-12}$  s) selon l'énergie et la nature de la réaction nucléaire. La phase de pré-équilibre est importante, elle influence les propriétés de la désintégration ultérieure des noyaux, ainsi que la distribution de l'énergie et de la quantité de mouvement des produits de la réaction. Ce modèle est essentiel pour comprendre la dynamique des réactions nucléaires et les propriétés des noyaux.



**Figure I.5:** Formulaire de la phase de pré-équilibre.

#### I.2.4. Le modèle excitant

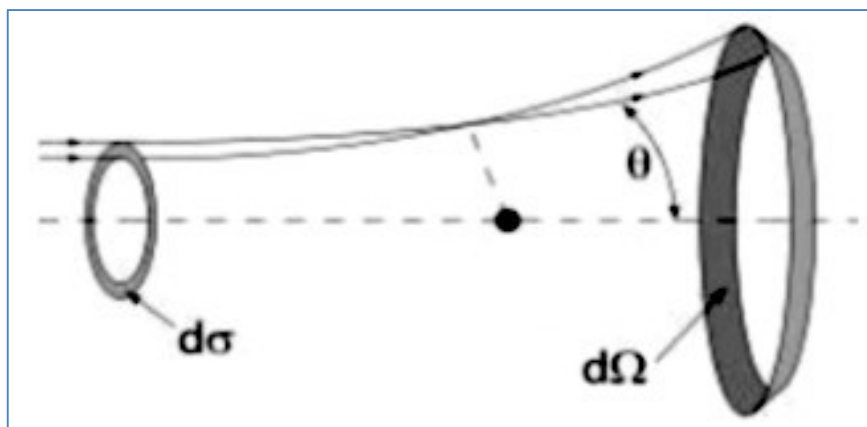
Le modèle excitant est un modèle qui décrit le comportement des noyaux atomiques excités, c'est-à-dire des noyaux qui ont une énergie supérieure à leur état fondamental. Ces noyaux excités se désintègrent rapidement en émettant des particules ou des rayonnements gamma pour atteindre un état plus stable. Le modèle excitant suppose que le noyau excité est un système complexe qui peut être considéré comme un gaz de nucléons (protons et neutrons) interagissant entre eux par des forces nucléaires. Le modèle prend en compte les effets de la structure nucléaire, tels que les niveaux d'énergie des nucléons dans le noyau et les interactions entre eux, ainsi que les interactions électromagnétiques avec les particules environnantes.



**Figure I.6:** Modèle Exciton modélisant les voies d'entrée et de sortie d'une réaction

### I.3. section efficace totale

Le neutron n'ayant aucune charge électrique, il n'agit que sur les noyaux. Il est essentiel de définir sa probabilité de la réalisation d'une réaction nucléaire. On emploie le plus souvent la notion de section efficace du noyau qui caractérise la probabilité de réalisation d'une réaction, elle dépend de la nature des réactant :cible et projectile et de leur état initial (énergie).



**Figure I.5:** section efficace d'une réaction nucléaire

Soit une lame de matière d'épaisseur  $dx$  contenant  $N$  noyaux par  $cm^3$ . Perpendiculairement à cette lame, tombent  $n$  neutrons bien définis en énergie et en direction. Sur ces  $n$  neutrons  $dn$  seront déviés ou absorbés à la suite d'interactions avec les noyaux ; donc chaque neutron a la probabilité  $dp = dn/n$  de subir une collision.

Il est évident que cette probabilité  $dp$  est proportionnelle au nombre de noyaux présents par unité de surface dans l'absorbant soit  $N dx$ . Nous écrivons donc :

$$dp = \sigma N dx \dots\dots\dots I.1$$

$\sigma$  étant le coefficient de proportionnalité qui caractérise l'intensité de l'interaction, il est de la nature d'une surface ; on le nomme section efficace : il peut donc être exprimé en  $cm^2$ .

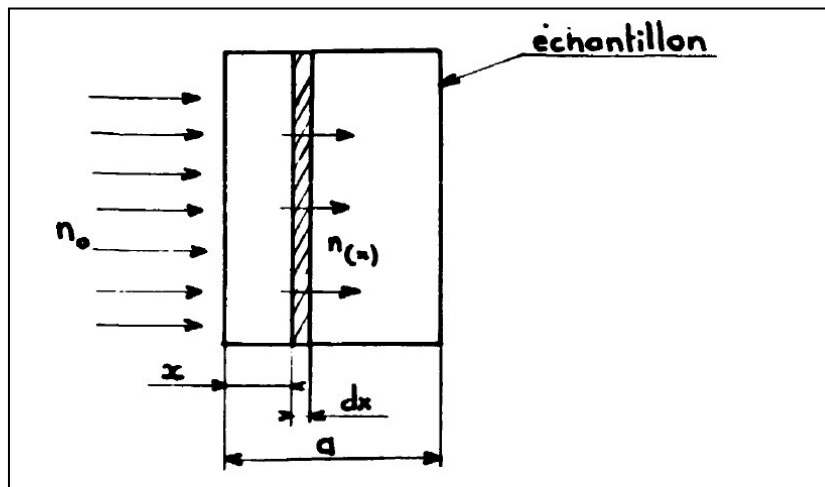


Figure I.6: section efficace macroscopique

On définit une section efficace pour chaque interaction nucléaire et même pour chaque état d'une interaction (par exemple, l'angle d'émission). La section efficace relative à l'ensemble des interactions subies par le neutron est appelée section efficace totale  $\sigma_t$  donnée comme suit :

$$dn = - n N \sigma_t dx \dots\dots\dots I-2$$

Pour chaque type de réaction nucléaires (fission, capture, diffusion, absorption,...) existe une section efficace microscopique, pour un échantillon contenant plusieurs atomes cibles, on peut définir la section efficace macroscopique.

## **Chapitre II**

### **Code de simulation nucléaire EMPIRE**

Dans ce chapitre, on présente le code et sa structure, ainsi les modules compris, on présente le format des fichiers input et output qui permet d'avoir les meilleurs résultats à travers les modèles théorique appropriés, le code est muni de modules de plot qui permet de générer des courbes donnant les grandeurs tels que la section efficace: calculés ou mesurés en fonction de l'énergie de réaction nucléaire.

## **II-1 Code EMPIRE**

EMPIRE est un outil flexible et facile à utiliser pour la recherche fondamentale et l'évaluation des données nucléaires .C'est un système modulaire de codes de réaction nucléaire pour la modélisation avancée des réactions nucléaires utilisant divers modèles théoriques [8].

EMPIRE offre la possibilité de combiner plusieurs approches théoriques, en choisissant parmi d'autres paramètres d'entrée et en calculant un ensemble étendu d'observables en un seul passage. L'évaluation des données nucléaires est facilitée par le formatage ENDF-6, la vérification des fichiers et la comparaison graphique avec les données expérimentales. Système modulaire de codes de réaction nucléaire pour la modélisation avancée des réactions nucléaires utilisant divers modèles théoriques. Il se compose d'un certain nombre de codes fortran, de bibliothèques de paramètres d'entrée et de bibliothèques de données expérimentales (EXFOR/CSISRS) - exploitées au moyen de l'interface utilisateur graphique (GUI).

EMPIRE est un outil général, souple et facile à utiliser pour la recherche fondamentale et l'évaluation des données nucléaires. Il offre la possibilité de combiner plusieurs approches théoriques, de choisir parmi d'autres paramètres d'entrée et de calculer un ensemble étendu d'observables en une seule fois. L'évaluation des données nucléaires est facilitée par le formatage ENDF-6, la vérification des fichiers et la comparaison graphique avec les données expérimentales. Le code EMPIRE est distribué sous la forme d'un paquet complet, il est livré avec des exécutables, des bibliothèques de données, des sources, un compilateur Fortran (gfortran). Le code est prévu pour les trois systèmes d'exploitation les plus populaires : Linux/Unix, Mac et MS Windows [9].

## et modules EMPIRE

La source EMPIRE est divisée en modules qui correspondent généralement à la réaction nucléaire, mécanisme ou une certaine quantité physique. La communication entre les modules est assurée par un ensemble de biens communs situés dans le global.h qui est inclus chaque fois que nécessaire. Les plus importants modules du code Empire sont :

- **empire\_ctl.f** : prépare les paramètres d'entrée pour le modèle.
- **main.f** : appelle l'entrée du module. f pour lire les données et paramètres d'entrée, contrôle le flux de calculs et d'impressions des résultats finaux.

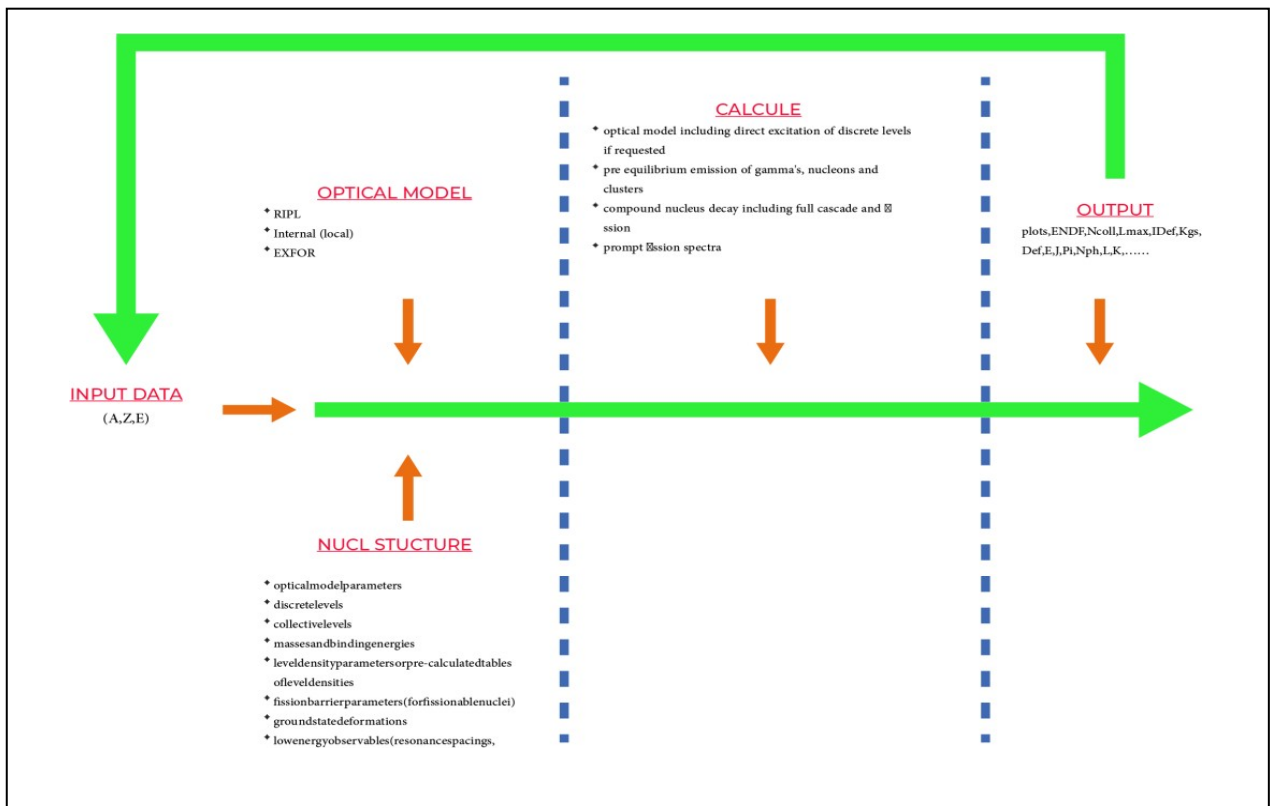


Figure II-1: structure du code EMPIRE.

- **input.f** : définit les valeurs par défaut des paramètres d'entrée, lit les entrées obligatoires et appelle READIN pour une lecture optionnelle. Accède aux bases de données pour récupérer des niveaux discrets, des énergies de liaison, des déformations et shell-corrections ainsi que des données expérimentales de la bibliothèque EXFOR. Il imprime les paramètres d'entrée à la sortie (\*.lst).
- **ccfus.f** : calcule la section transversale de fusion pour les ions lourds.
- **tl.f** : ce module détermine les coefficients de transmission du modèle optique. Les paramètres du modèle optique sont extraits de la bibliothèque RIPL-2. Les coefficients de transmission sont calculés à l'intérieur du tl. f pour les ions lourds seulement.
- **subecis06m.f** : ce module calcule les sections totales, élastiques et d'absorption, la distribution angulaire élastique, les sections inélastiques aux niveaux collectifs et leurs distributions angulaires respectives, ainsi que les coefficients de transmission.
- **fusion.f** : calcule la population initiale du noyau composé après absorption du projectile à l'aide des coefficients de transmission obtenus soit du modèle optique, soit du modèle de barrière distribuée (pour les ions lourds).
- **MSD-orion.f** : Calcule deux amplitudes directes en plusieurs étapes. Les résultats sont ensuite utilisés par TRISTAN pour produire des sections directes.
- **MSC-NVWY.f** : calcule la désintégration des composés en plusieurs étapes. Les neutrons, les protons et les gammas sont pris en compte.
- **ph-lev-dens.f** : contient un certain nombre de routines pour le calcul des densités d'état des trous de particules pour différents types de transitions.
- **ddhms.f** : Calcule les spectres de pré équilibre.
- **pcross.f** : Le module modèle d'exciton, développé spécialement pour EMPIRE, qui prend en compte l'émission de nucléons primaires de gammas.
- **HRTW-comp.f** : Calcule la désintégration du noyau composé.

- **HF-comp.f** : Ce module Hauser-Feshbach effectue la majeure partie des calculs du noyau composé. Suit la désintégration des états dans le continuum du noyau parent au continuum et aux niveaux discrets dans le noyau résiduel par émission de particules (neutrons, protons, alphas, ions).
- **lev-dens.f** : Contient toutes les sous-routines utilisées pour calculer les densités de niveau pour toutes les approches utilisées dans EMPIRE.
- **gamma-strgth.f** : Prépare les paramètres de résonance multipôle géante dépendants de la déformation.
- **gamma-strength-analytic.f** : Calcule les fonctions de résistance radiative dipôle pour la décroissance gamma et la photo-absorption.
- **pipe.f** : Une petite sous-routine pour exécuter une ligne de commande UNIX à partir d'un code FORTRAN.
- **fis\_io.f** : Sous-routine qui crée FISSION.INP qui contient tous les paramètres de fission indépendants de l'énergie et la puissance de fission (FISS.OUT) qui contient les résultats de fission pour la dernière énergie incidente.
- **tbarrier.f** : Routines impliquées dans les calculs de fission, y compris adaptation des barrières numériques aux paraboles, WKB de coefficients de transmission de fission.

### II-3 Fichiers input et output de Empire

EMPIRE est configuré pour lire autant de données que possible à partir du répertoire d'entrée de la bibliothèque RIPL et qu'on les appelle les paramètres d'entrée locale. L'utilisateur doit fournir uniquement les paramètres d'entrée que le code ne peut pas connaître qui sont l'énergie d'incidence, le projectile, la cible et le nombre de particules émises : neutrons, protons, deutérium, tritium, He,  $^3\text{He}$  et d'autres ions légers [10]. La version actuelle peut traiter les émissions multiples de ces particules.

Avec la bibliothèque par défaut des paramètres d'entrée, il est possible d'exécuter le code. Dans la deuxième étape, l'utilisateur peut ajuster les paramètres initiaux de manière sélective dans la partie optionnelle de l'entrée EMPIRE, ou directement dans le projet local produit par EMPIRE pendant son première marche.

Les données d'entrée proviennent de différentes sources sont dans la priorité décroissante suivante :

1. les cas particuliers (\*. lev, \*-lev.col, \*-omp. \*, \*-inp.s)
2. fichier d'entrée (\*.inp)
3. bibliothèque de paramètres d'entrée générales incluant les bibliothèques locales et RIPL.

La contribution à EMPIRE comprend deux parties : une partie obligatoire qui contient les données de base nécessaires pour spécifier le cas et la structure, elle est nécessaire pour l'exécution sans erreurs du codes, elle s'écrit sous le format ci-dessous (**figure II.2**). Et une partie optionnelle qui peut être ignoré par l'utilisateur.

```
14.8                ;INCIDENT ENERGY (IN LAB)
56      26          ;TARGET A , Z
 1      0           ;PROJECTILE A, Z
3          ;NUMBER OF NEUTRONS TO BE EMITTED
1          ;NUMBER OF PROTONS TO BE EMITTED
1          ;NUMBER OF ALPHAS TO BE EMITTED
1          ;NUMBER OF DEUTERONS TO BE EMITTED
1          ;NUMBER OF TRITONS TO BE EMITTED
1          ;NUMBER OF HELIONS (3He=h) TO BE EMITTED
0      0.      0.   ;NUMBER OF L.I. TO BE EMITTED, AND ITS A AND Z
```

**Figure II.2** : partie nécessaire dans le fichier input du code Empire

```

Isotope:
-----
Z= 94  A=243
-----

Nr.parabolas =3      Nr.wells=1

  Va      ha      Vb(SL)  hb(SL)  Vb(ST1)  hb(ST1)  Vb(ST2)  hb(ST2)  Vi      hi (in Mev)
  6.050   0.700   7.450   1.200   5.450   0.700   5.550   0.700   2.000   1.000

h2/2J(A) h2/2J(B) h2/2J(I) (in MeV)
0.0050   0.0025   0.0035

Beta2(A) Beta2(B) Beta2(I)
0.4438   0.9232   0.6634

-----
Parameters of the imaginary potential used only if FISOPT>0
=====
      W0      W1      W2
    1.0000   0.1000   0.1000

=====
Discrete transitional states
=====
Number of discrete states at hump 1 = 4
Kdis  Pdis  Edis  homega
0.5    1    0.000  0.700
2.5    1    0.080  0.700
0.5   -1    0.050  0.700
1.5   -1    0.010  0.700
Number of discrete states at hump 2 = 4
Kdis  Pdis  Edis  homega
0.5    1    0.000  1.200  0.000  0.700  0.000  0.700
2.5    1    0.010  1.200  0.010  0.700  0.010  0.700
0.5   -1    0.010  1.200  0.010  0.700  0.010  0.700
1.5   -1    0.000  1.200  0.000  0.700  0.000  0.700
Number of discrete states in well 3 = 4
Kdis  Pdis  Edis  homega
0.5    1    0.000  1.000
2.5    1    0.000  1.000

```

Figure II.3 : fichier output du code Empire

```

0.5   -1    0.000  1.000
1.5   -1    0.000  1.000

=====
Quantities used only if FISDEN=0 to calculate LD at saddles
=====
      Asym shellcorr  Ushif  gamm  atilf/atil  Ecf  VIB1/2  VIBdt  Norm
Barrier 1  2  2.600  0.300  0.600  1.000  0.000  1.000  0.100  1.000
Barrier 2  1  0  0.540  0.300  0.600  1.000  0.000  1.000  0.100  1.000
Barrier 2  2  0  0.540  0.300  0.600  1.000  0.000  1.000  0.100  1.000
Barrier 2  3  0  0.540  0.300  0.600  1.000  0.000  1.000  0.100  1.000

=====
Coefficients used only if FISDEN=3 to adjust HFB LD at saddles
=====
      Asym  Delta  alpha  Norm
Barrier 1  2  0.000  0.000  1.000
Barrier 2  3  0.000  0.000  1.000

=====
Coefficient(s) used to calculate the direct continuum weight(s)
=====
Well 1  0.000

*****
*****

```

Figure II-4: OUTPUT.DAT Cette sortie EMPIRE est utilisée par EMPEND pour créer le format ENDF-6.

Il existe une abréviation utilisé dans Empire afin d'alléger l'écriture et la lecture des paramètres inputs et des résultats de sorties, ces mots clés sont présenter dans le manuel du code Empire.

## II-4 Bibliothèque de données nucléaires expérimentales EXFOR

La bibliothèque EXFOR est une collection des données expérimentales des réactions nucléaires, c'est une ressource précieuse pour les utilisateurs dans le domaine de la physique nucléaire. Le centre des données des réactions nucléaires NRDC assure l'accès en ligne des données mesurées à travers le site web : <https://www-nds.iaea.org/exfor> . A travers une fenêtre simple l'utilisateur détermine : la réaction, la cible, le projectile, l'énergie du projectile, ainsi les produits de réaction nucléaire et d'autre paramètres qui peuvent être supplémentaire, l'utilisateur accède facilement aux résultats sous un format spécifique (fichier output)[11].

Le centre facilite l'accès aux mesures de la bibliothèque EXFOR , Le code **X4TOC4** développé par D.E. Cullen convertit les entrées EXFOR en format tabulaire. Le code **ENDVER** développé par A. Trkov peut convertir les données EXFOR au format de calcul **C4**. Le code **x4i** développé par D.A. Brown fournit une interface programmable à EXFOR.

The screenshot displays the 'Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR) Database Version of 2023-04-19' interface. At the top, there are navigation tabs for 'Manual', 'PDF', 'Lexfor', 'Output', 'Plot+', 'R33', 'Databases', 'ENDF', 'CINDA', 'IBANDL', 'CD-ROM', 'EXFOR-CINDA', 'X4Lite', and 'CD-Catalog'. The main header includes the NRDC logo and the text 'Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR) Database Version of 2023-04-19'. Below this, a paragraph describes the database's content and retrieval system. A search bar is located on the right side of the header.

The main content area is divided into several sections:

- Request:** A form with fields for Target, Reaction, Quantity, Product, Energy from, Author(s), Publication year, Last modified, and Accession #. There are 'Submit', 'Reset', and 'Help' buttons.
- Options:** A list of checkboxes for search criteria: 'Exclude superseded data', 'No reaction combinations (ratios...)', 'Exclude evaluated/calculated data', 'Enhanced search of Products', 'Show evaluators flags /2021', 'Retrieve listing only', and 'Disable Prompt-help'. There are also radio buttons for 'Sort by: reaction' and 'publication', and a 'View: basic' / 'extended' selector.
- Plotting:** A section with the text 'See also: [video-guide]'.
- Extended, Keywords, Expert, Evaluator:** A vertical list of expandable sections.
- Feedback and User's Input:** A section with 'Clone Request:' and buttons for 'CINDA' and 'ENDF'.
- More Web Tools:** A section with a link to 'More Web Tools'.

At the bottom, there is a 'Note' section with search criteria instructions, a 'Statistics of usage' section, and a footer with contact information for the Database Manager and Web and Database Programming.

Figure II.5: EXFOR l'interface de la bibliothèque EXFOR

Request #8016 www.nds.iaea.org 2023-04-26,08:54:08  
Results: Reactions: 40 Datasets: 139

Data Selection  
Retrieve:  Selected  Unselected  All   in new Window  
Output:  X4+  EXFOR  Bibliography  TAB  C4  PlotC4 CSV:  original  basic  universal  compact  
Plot:  Quick-plot (cross-sections)  ungroup /product:  Advanced plot (how-to) using  C5 with  cm2lab, convert  ratios to 0  
Narrow incident energy (optional), eV: Min:  Max:   
 Apply (32A)  Data re-normalization (for advanced users, results in: C4, TAB and Plots)

n	Display	Year	Author-1	Energy range, eV	Points	Reference	Subentry#	NSR-Key	Info-	
1	Quantity: [C2] Cross section	1982	J. Janczaryszyn	1.49e7	1	+ C, SZANTHNER,, 569, 198209	30774004	[?]		
2	Quantity: [C2] Cross section	1979	C. H. Wu+	2.25e7	1	+ J, NP/A, 329, 43, 197910	21009006	[?]	1979W011	
3	Quantity: [C2] Cross section	2001	H. Sakane+	1.34e7	1.49e7	6	+ J, AME, 28, 1179, 2001	22442003	[?]	2001SA27
4	Quantity: [C2] Cross section	1976	R. A. Sizzo	1.44e7	1	+ T, SIOG, 1976	10774016	[?]		
5	Quantity: [C2] Cross section	1976	G. Szanyi	1.55e7	1	+ R, IZIS-MF-3663, 83, 197612	30447003	[?]		
6	Quantity: [C2] Cross section	1973	J. Adamowicz+	1.44e7	1	+ P, IIR-1464, 14, 1973	30244005	[?]	1973AR21	
7	Quantity: [C2] Cross section	1967	A. Paquarelli	1.47e7	1	+ J, NP/A, 93, 218, 4703	20585014	[?]	1967PA27	
8	Quantity: [C2] Cross section	1967	B. Nucra	1.45e7	1	+ J, ICP, 41, 752, 1967	31070002	[?]	1967NI18	
9	Quantity: [C2] Cross section	1966	R. Frazard+	1.45e7	1	+ J, NP, 55, 349, 1966	30015002	[?]	1966FR13	
10	Quantity: [C2] Cross section	1965	B. Grimsland+	1.45e7	1	+ J, FR, 137, 878, 196502	20106003	[?]	1965GR41	
11	Quantity: [C2] Cross section	1964	B. Grimsland+	1.45e7	1	+ J, NP, 51, 302, 196409	20087002	[?]	1964GR06	
12	Quantity: [C2] Cross section	1963	M. Bormann+	1.32e7	1.97e7	7	+ J, ZP, 174, 1, 196302	21343002	[?]	
13	Quantity: [C2] Cross section	1963	C. Carles	1.41e7	1	+ J, CR, 257, 659, 1963	21400002	[?]		
14	Quantity: [C2] Cross section	1962	J. Kantele+	1.47e7	1	+ J, NP, 35, 353, 62	11196010	[?]	1962KA37	
15	Quantity: [C2] Cross section	1962	M. Cavolani+	1.41e7	1	+ J, NC, 24, 1328, 6212	21246004	[?]		
16	Quantity: [C2] Cross section	1961	L. A. Rayburn	1.44e7	1	+ J, FR, 122, 168, 61	11328004	[?]	1961RA06 #2 1966a18	
17	Quantity: [C2] Cross section	1960	J. M. Ferguson+	1.47e7	1.80e7	3	+ J, FR, 118, 228, 1960	11336003	[?]	1960FE12
41	Quantity: [C2] Cross section					[Derived data]				
42	Quantity: [C2] Cross section					[Derived data]				
43	Quantity: [C2] Cross section					[Derived data]				
44	Quantity: [C2] Cross section					[Derived data]				
45	Quantity: [C2] Cross section					[Derived data]				

Figure II.6 : fichier output de EXFOR

## II-5 Bibliothèque des données nucléaires évaluées ENDF

En 1990, la bibliothèque des données évaluées ENDF/B-VI est rendu public. Ensuite en décembre 2006, le groupe américain d'évaluation de la section efficace CSEWG a publié la nouvelle bibliothèque ENDF/B-VII.0. Les deux bibliothèques ont été publiées dans le même format, ENDF-6, l'évaluation est une procédure qui vérifie les données expérimentales et théoriques pour les regrouper. Une seule source, il existe plusieurs banques de données nucléaires évaluées telles que : ENDF, GENDL, JEFF, TENDEL... issues de plusieurs laboratoires et centres de recherche mondiales. Le centre international des données nucléaires NDC donne en ligne aux utilisateurs un interface simple et similaire à celui de EXFOR, et qui garantit un accès rapide aux données nucléaires évaluées.

Les données expérimentales représentent un test pour vérifier la consistance et la validité des modèles nucléaires conçus pour l'analyse des interactions nucléaires. Ces modèles théoriques permettent à leur tour de combler le vide des données qui ne peuvent pas être mesurées, cette procédure permet de créer une bibliothèque mondiale des données évaluées qui regroupe les données expérimentales et les données théoriques comme: ENDF, TENDL, JENDL, JEFF.....

Manual » ENDF-6 Help » Plot+ Databases » Medical NGAtlas RIPL FENDL IRDFF EXFOR CINDA

## Evaluated Nuclear Data File (ENDF)

Database Version of 2022-10-07  
Software Version of 2023-04-19

News & History

2023/03 New software feature: plotting covariances of the average number of neutrons per fission MF31 [example]  
 2023/02 New software tool: EE-View - fast experimental-evaluated data viewer [about] → go to SIG:[eview1]; DA:[eview1]  
 2022/10 New software feature: plotting covariances for angular distributions of secondary particles MF34 [example]  
 2022/09 New library: **INDEN-Oct2022** evaluations produced by International Nuclear Data Evaluators Network (coord. by the IAEA) [page]  
 2022/09 New library: **TENDL-2021** TALYS-based Evaluated Nuclear Data Library, 2021 [page]  
 2022/07 New feature: **Indefat** libraries

Core nuclear reaction database contain recommended, evaluated cross sections, spectra, angular distributions, fission product yields, photo-atomic and thermal scattering law data, with emphasis on neutron induced reactions. The data were analyzed by experienced nuclear physicists to produce recommended libraries for one of the national nuclear data projects (USA, Europe, Japan, Russia and China). All data are stored in the internationally-adopted ENDF-6 format maintained by CSEWG. See database summary [here].

**Standard Request** Examples:  Go to: [Advanced Request](#); [ENDF-Database Explorer](#)

**Parameters:**

Target    
 Reaction    
 Quantity

**More Parameters...**

**Libraries:**  All  Selected   [How to plot](#)

Major Libraries  Special Libraries  
 IAEA Project Libraries  Archival  
 Derived

**Options:**  
 Sort by:  Reactions  Evaluations

**Clone Request:**   **Feedback:**

**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  
 - wildcards and intervals are available  
 - pointwise libraries contain reconstructed resonances using parameters from MF=2 and applied Doppler broadening at a given temperature.  
 Statistics of usage: visits: 338, requests: 15169, since 20-Apr-2023

**Original ENDF libraries and files for FTP downloading:** [\[ENDF-Archive\]](#)  
 Extensive temperature dependent pointwise libraries: [Point-2016 \(ENDFB-VIII.0\)](#), [Pointwise2020 \(TENDL-2019\)](#)

Database Manager: Viktor Zerkin, NDS, International Atomic Energy Agency (V.Zerkin@iaea.org)  
 Web and Database Programming: Viktor Zerkin, NDS, International Atomic Energy Agency (V.Zerkin@iaea.org)  
 Data Source: IAEA-NDS, WPEC, CSEWG, IPPE, CNOC, IAEA, NRG, CCFE, FEK

Figure II.7: interface de la bibliothèque des données évaluées ENDF

Request #15170

### ENDF Data Selection

Retrieve   Selected  Unselected  All

**Plotting options:**  Quick plot (cross-sections only: σ)  MF3-Plot  
 Universal plot (σ<sub>tot</sub>, σ<sub>el</sub>/σ<sub>T</sub>, σ<sub>el</sub>/σ<sub>T</sub>, σ\*σ<sub>el</sub>/σ<sub>T</sub>) beta version

Sorted by: [Reactions] Reorder by: [Libraries] View:  basic  extended: get MAT, PEN, GND, run inter resonance integrals, etc.

MT=1 MF=3 NSUB=10	MT=1 MF=3 NSUB=10	MT=1 MF=3 NSUB=10	MT=1 MF=3 NSUB=10	MT=1 MF=3 NSUB=10
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1	ENDF-6	Interpreted	Plot	ENDF/B-VIII.0
2	ENDF-6	Interpreted	Plot	ENDF/B-VII.1
3	ENDF-6	Interpreted	Plot	ENDF/B-VII.0
4	ENDF-6	Interpreted	Plot	JEFF-3.3
5	ENDF-6	Interpreted	Plot	JEFF-3.2
6	ENDF-6	Interpreted	Plot	JEFF-3.1.2
7	ENDF-6	Interpreted	Plot	JEFF-3.1
8	ENDF-6	Interpreted	Plot	TENDL-5
9	ENDF-6	Interpreted	Plot	TENDL-4.0
10	ENDF-6	Interpreted	Plot	TENDL-3.5
11	ENDF-6	Interpreted	Plot	TENDL-3.3
12	ENDF-6	Interpreted	Plot	ENDF/B-VI
13	ENDF-6	Interpreted	Plot	ENDF/B-VI
14	ENDF-6	Interpreted	Plot	ENDF/B-VI
15	ENDF-6	Interpreted	Plot	ENDF/B-VI
16	ENDF-6	Interpreted	Plot	ENDF/B-VI
17	ENDF-6	Interpreted	Plot	ENDF/B-VI
18	ENDF-6	Interpreted	Plot	ENDF/B-VI
19	ENDF-6	Interpreted	Plot	ENDF/B-VI
20	ENDF-6	Interpreted	Plot	ENDF/B-VI
21	ENDF-6	Interpreted	Plot	ENDF/B-VI
22	ENDF-6	Interpreted	Plot	ENDF/B-VI
23	ENDF-6	Interpreted	Plot	ENDF/B-VI
24	ENDF-6	Interpreted	Plot	ENDF/B-VI
25	ENDF-6	Interpreted	Plot	ENDF/B-VI
26	ENDF-6	Interpreted	Plot	ENDF/B-VI
27	ENDF-6	Interpreted	Plot	ENDF/B-VI
28	ENDF-6	Interpreted	Plot	ENDF/B-VI

Figure II.8: fichier de sortie de la bibliothèque des données évaluées ENDF

## **Chapitre III**

**Analyse des réactions nucléaires induites par des neutrons rapides productrices de  $^3\text{He}$  avec le code EM**

Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur l'analyse des réactions nucléaires induites par des neutrons rapides qui produisent de l'hélium-3 ( $^3\text{He}$ ). L'étude de ces réactions est cruciale pour comprendre les processus nucléaires qui se produisent dans divers contextes, allant des réacteurs nucléaires aux étoiles.

La réaction nucléaire ( $n, ^3\text{He}$ ) est particulièrement intéressante en raison de sa complexité et de son importance dans la compréhension des interactions neutroniques. Pour analyser cette réaction, nous utiliserons le code EMPIRE, un outil puissant pour le calcul des sections efficaces dans les réactions nucléaires.

L'objectif de ce chapitre est d'explorer les valeurs expérimentales de cette réaction, de calculer les sections efficaces en utilisant le code EMPIRE, et d'évaluer le rapport entre les sections efficaces expérimentales et calculées.

Dans les sections suivantes, nous commencerons par une exploration des valeurs expérimentales de la réaction ( $n, ^3\text{He}$ ). Ensuite, nous présenterons le processus de calcul des sections efficaces en utilisant le code EMPIRE et évaluerons le rapport entre les sections efficaces expérimentales et calculées. Enfin, nous conclurons avec un résumé des résultats clés et leurs implications pour l'étude de la réaction nucléaire ( $n, ^3\text{He}$ ).

### **III-1 Étude des données expérimentales de la réaction neutronique ( $n, ^3\text{He}$ )**

Le code EMPIRE est une ressource précieuse pour l'étude des réactions nucléaires, car il contient une vaste collection de données expérimentales et évaluées. Pour la réaction ( $n, ^3\text{He}$ ), nous avons accès à une variété de données, y compris les sections efficaces expérimentales d'EXFOR pour différents éléments à une énergie de neutrons incidents de 14.6 MeV. Ces données sont résumées dans le tableau III.1 ci-dessous :

<b>A</b>	<b>Z</b>	<b>En(MeV)</b>	<b><math>\sigma^{\text{exp}} \pm \Delta\sigma^{\text{exp}}</math> (<math>\mu\text{b}</math>)</b>	<b>References</b>
31	15	14.7	30. $\pm$ 10	R.Pepelnik,1985
41	19	14.6	6. $\pm$ 3	S.M.Qaim,1978
			848. $\pm$ 320	M.Diksic,1974
45	21	14.6	8.6 $\pm$ 4	S.M.Qaim,1972
59	27	14.6	4.6 $\pm$ 2.1	S.M.Qaim,1972
			62 $\pm$ 30	M.Dissic,1974
63	29	14.6	4. $\pm$ 2	S.M.Qaim,1978
			113 $\pm$ 40	M.Diksic,1974
75	33	14.6	3.5 $\pm$ 1.9	S.M.Qaim,1972
			578. $\pm$ 200	M.Diksic,1974
93	41	14.6	3.1 $\pm$ 1.5	S.M.Qaim,1972
103	45	14.7	1.2 $\pm$ 0.6	J.Csikai,1966
			0.4 $\pm$ 507mb	P.R.Gray,1966
133	55	14.7	5. $\pm$ 3.	J.Csikai,1966
142	58	14.6	3.3 $\pm$ 1.3	S.M.Qaim,1978
159	65	14.6	4.6 $\pm$ 1.8	S.M.Qaim,1978
169	69	14.6	4. $\pm$ 2	S.M.Qaim,1978
181	73	14.6	3.4 $\pm$ 1.5	S.M.Qaim,1972

**Tableau III.1** : Sections efficaces expérimentales de la réaction (n,  $^3\text{He}$ ) pour différents éléments à une énergie de neutrons incidents de 14.6 MeV

Ces données expérimentales sont essentielles pour notre analyse. Elles nous fournissent des informations précieuses sur la section efficace de la réaction (n,  $^3\text{He}$ ) pour différents éléments à une énergie de neutrons incidents spécifique. De plus, elles nous permettent de comprendre la variabilité de la section efficace entre différents éléments et de voir comment la section efficace peut changer en fonction de la masse atomique A et le nombre atomique Z.

Dans le cadre de notre analyse, nous examinerons ces données, en explorant les valeurs expérimentales de la réaction (n,  $^3\text{He}$ ) pour chaque élément. Nous utiliserons également ces données pour évaluer le rapport entre les sections efficaces expérimentales et calculées par le code EMPIRE.

### III-2 Calcul des sections efficaces de la réaction (n, $^3\text{He}$ ) en utilisant le code EMPIRE

Pour approfondir notre compréhension de la réaction (n, He3), nous avons calculé les sections efficaces pour une série de réactions nucléaires à une gamme d'énergie de neutrons incidents entre 10 MeV et 30 MeV. Ces réactions incluent  $^{31}\text{P}(n, ^3\text{He})^{29}\text{Si}$ ,  $^{41}\text{K}(n, ^3\text{He})^{39}\text{Cl}$ ,  $^{45}\text{Sc}(n, ^3\text{He})^{43}\text{K}$ ,  $^{59}\text{Co}(n, ^3\text{He})^{59}\text{Fe}$ ,  $^{63}\text{Cu}(n, ^3\text{He})^{61}\text{Co}$ ,  $^{75}\text{As}(n, ^3\text{He})^{73}\text{Ga}$ ,  $^{93}\text{Nb}(n, ^3\text{He})^{91}\text{Y}$ ,  $^{103}\text{Rh}(n, ^3\text{He})^{101}\text{Tc}$ ,  $^{133}\text{Cs}(n, ^3\text{He})^{131}\text{I}$ ,  $^{142}\text{Ce}(n, ^3\text{He})^{140}\text{Ba}$ ,  $^{159}\text{Tb}(n, ^3\text{He})^{157}\text{Eu}$ ,  $^{169}\text{Tm}(n, ^3\text{He})^{167}\text{Ho}$  et  $^{181}\text{Ta}(n, ^3\text{He})^{179}\text{Lu}$ .

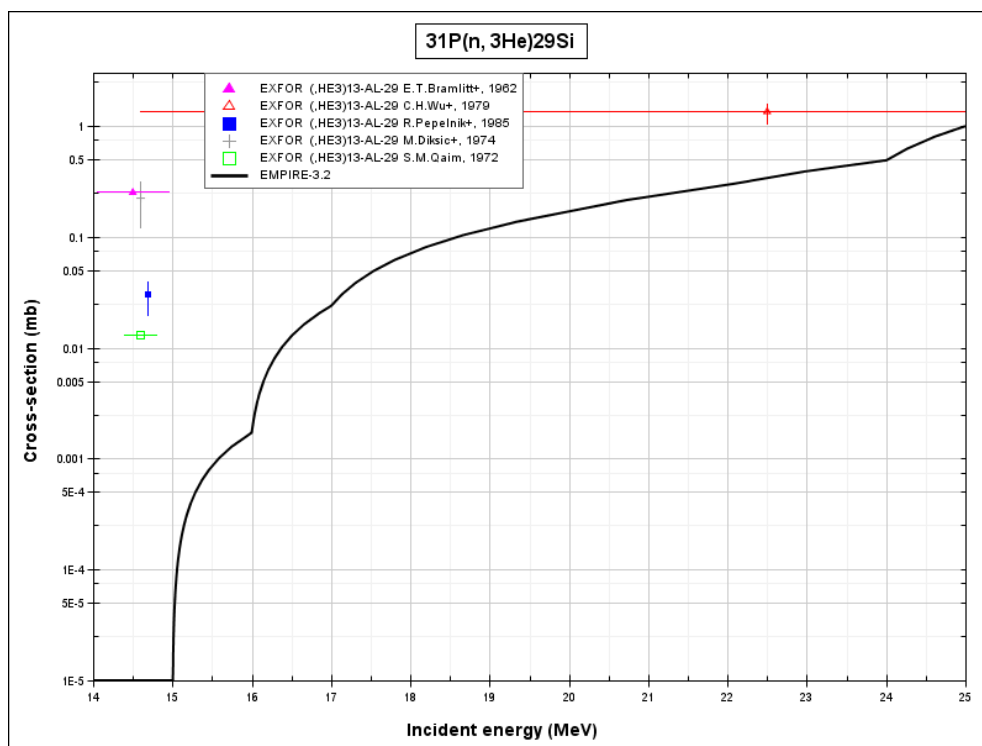
Réactions	En(MeV)	Valeurs de Q calculées (Mev)	$\sigma^{\text{exp}}_{\pm\Delta\sigma^{\text{exp}}}$ ( $\mu\text{b}$ )	Sections efficaces calculées ( $\mu\text{b}$ )
$^{31}\text{P}(n, ^3\text{He})^{29}\text{Si}$	14.6	-13.0850	30. $\pm$ 10	1.419527E-7
$^{41}\text{K}(n, ^3\text{He})^{39}\text{Cl}$	14.6	-12.6180	6. $\pm$ 3	4.8326E-3
$^{45}\text{Sc}(n, ^3\text{He})^{43}\text{K}$	14.6	-11.3360	8.6 $\pm$ 4	2.28592E-2
$^{59}\text{Co}(n, ^3\text{He})^{59}\text{F}$	14.6	-11.5990	4.6 $\pm$ 2.1	2.737934E-4
$^{63}\text{Cu}(n, ^3\text{He})^{61}\text{Co}$	14.6	-9.5410	4. $\pm$ 2	8.78885E -2
$^{75}\text{As}(n, ^3\text{He})^{73}\text{Ga}$	14.6	-10.1880	3.5 $\pm$ 1.9	1.718296 E -4
$^{93}\text{Nb}(n, ^3\text{He})^{91}\text{Y}$	14.6	-7.7230	3.1 $\pm$ 1.5	3.1686 E -3
$^{103}\text{Rh}(n, ^3\text{He})^{101}\text{Tc}$	14.6	-8.5460	1.2 $\pm$ 0.6	6.95787 E -5
$^{133}\text{Cs}(n, ^3\text{He})^{131}\text{I}$	14.6	-7.4910	5. $\pm$ 3.	6.7731 E -6
$^{142}\text{Ce}(n, ^3\text{He})^{140}\text{Ba}$	14.6	-8.1270	3.3 $\pm$ 1.3	6.56128 E -8
$^{159}\text{Tb}(n, ^3\text{He})^{157}\text{Eu}$	14.6	-6.9310	4.6 $\pm$ 1.8	2.188248 E -7
$^{169}\text{Tm}(n, ^3\text{He})^{167}\text{Ho}$	14.6	-5.8490	4. $\pm$ 2	1.31622 E -5
$^{181}\text{Ta}(n, ^3\text{He})^{179}\text{Lu}$	14.6	-6.2340	3.4 $\pm$ 1.5	5.578349 E -7

**Tableau III.2 :** Comparaison des sections efficaces expérimentales d'EXFOR et des sections efficaces calculées pour la réaction (n, He3) à une énergie de neutrons incidents de 14.6 MeV

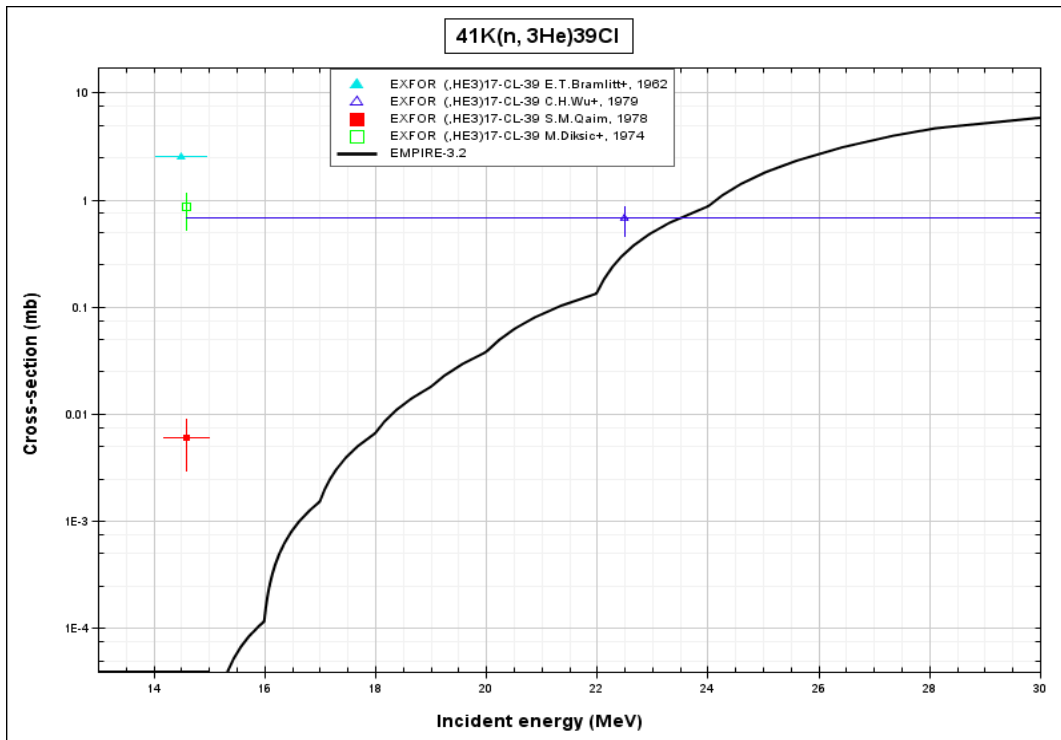
Ces calculs ont été effectués en utilisant le modèle exciton de pré-équilibre du code EMPIRE-3.2. Ce modèle est largement utilisé pour l'étude des réactions nucléaires de pré-équilibre. Les sections efficaces calculées pour ces réactions sont présentées dans le tableau III.2 et les figures III.1 à III.13. Ces résultats représentent une contribution importante à notre analyse, car ils nous permettent de comparer les sections efficaces expérimentales et calculées pour la réaction (n,  $^3\text{He}$ ).

### III-3 Comparaison des sections efficaces expérimentales et calculées

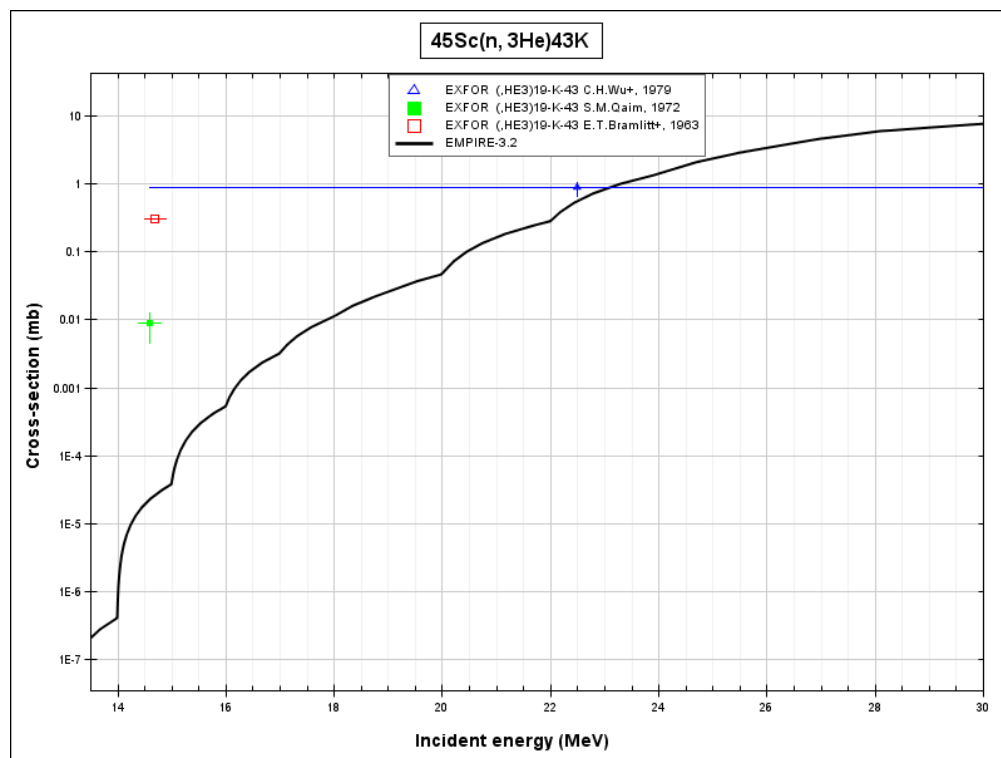
Nous présentons dans cette parties les résultats de calculs des section efficaces des treize éléments choisis dans notre étude, et qui sont obtenues avec le code EMPIRE, pour chaque élément on présente la section efficace en fonction de l'énergie du neutron incident qui varie de 14 MeV à 23 MeV.



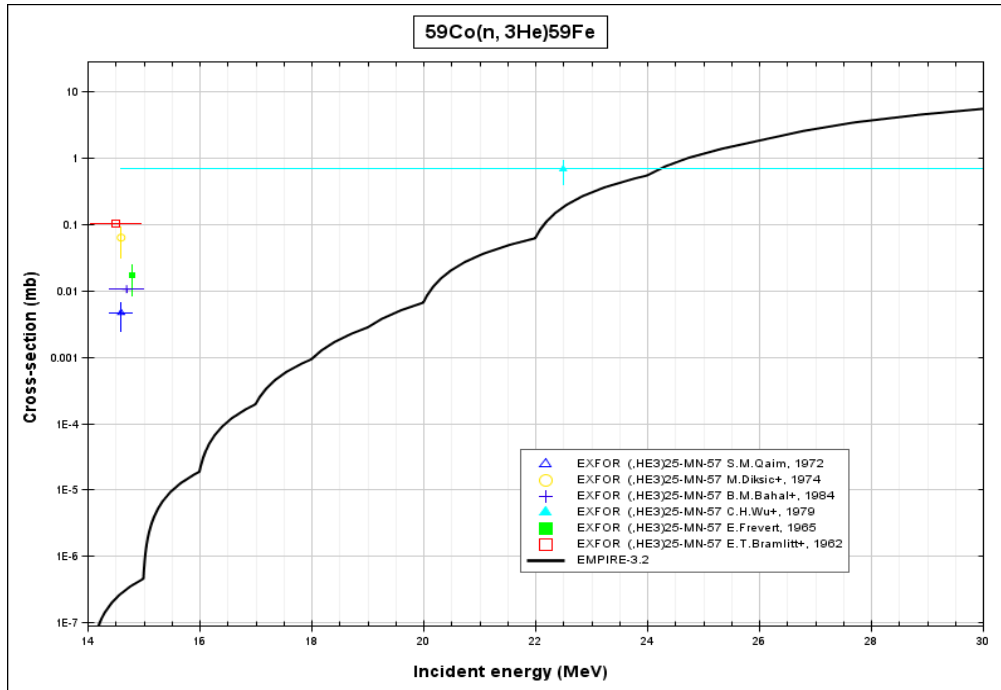
**Figure III.1** : Comparaison des sections efficaces expérimentales et calculées pour la réaction  $^{31}\text{P}(n, ^3\text{He})^{29}\text{Si}$



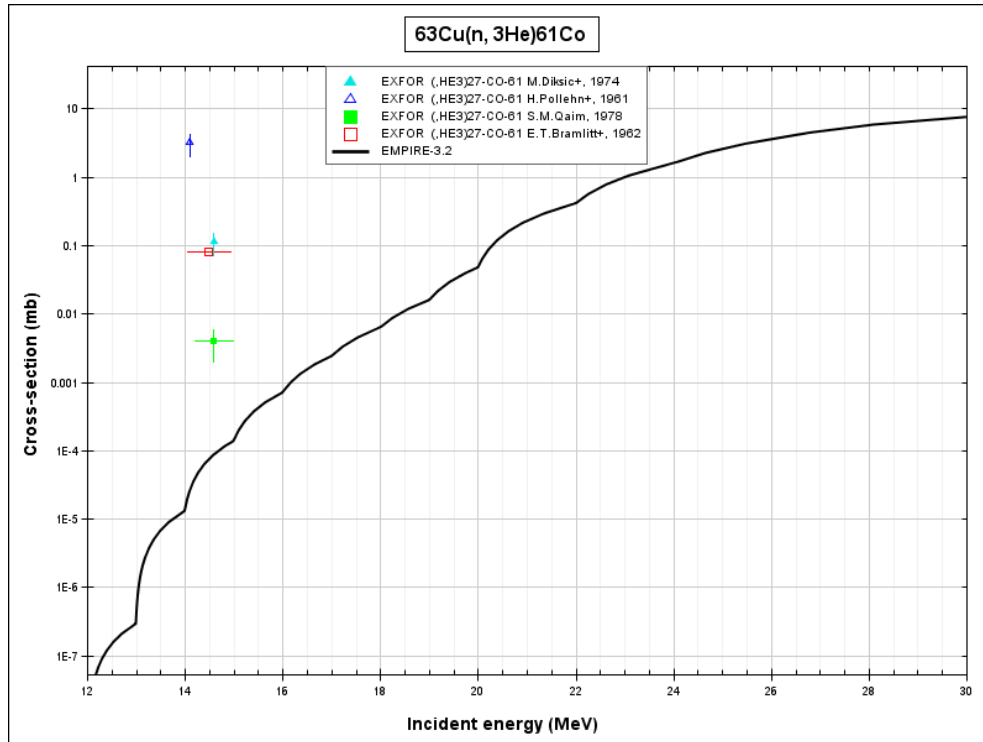
**Figure III.2** : Comparaison des sections efficaces expérimentales et calculées pour la réaction  $^{41}\text{K}(n, ^3\text{He})^{39}\text{Cl}$



**Figure III.3** : Comparaison des sections efficaces expérimentales et calculées pour la réaction  $^{45}\text{Sc}(n, ^3\text{He})^{43}\text{K}$



**Figure III.4 :** Comparaison des sections efficaces expérimentales et calculées pour la réaction  $^{59}\text{Co}(n, ^3\text{He})^{59}\text{Fe}$



**Figure III.5 :** Comparaison des sections efficaces expérimentales et calculées pour la réaction  $^{63}\text{Cu}(n, ^3\text{He})^{61}\text{Co}$

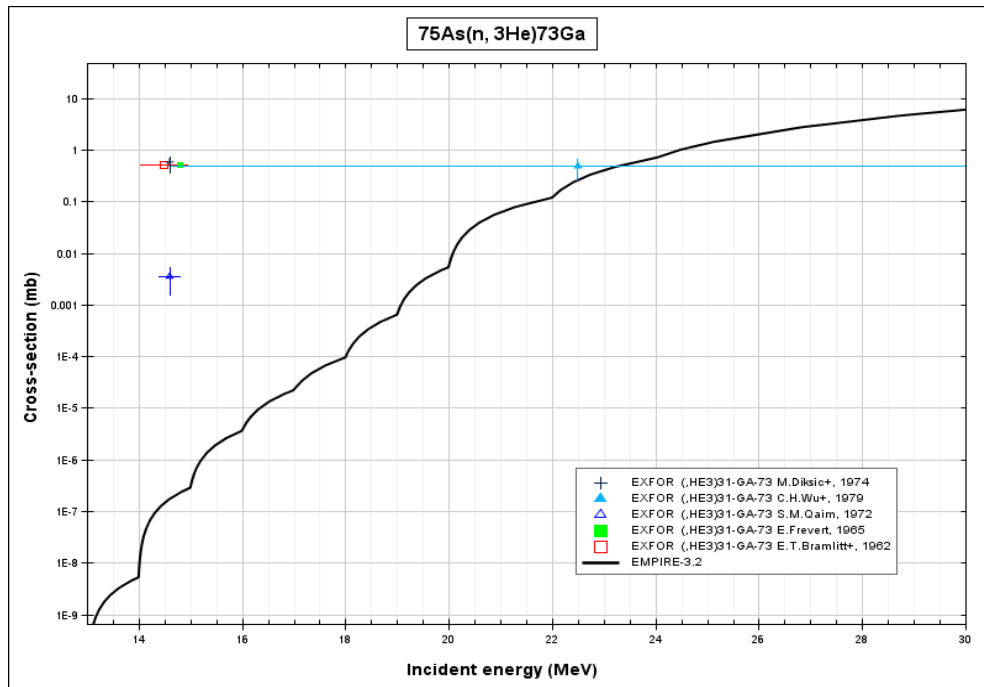


Figure III.6 : Comparaison des sections efficaces expérimentales et calculées pour la réaction  $^{75}\text{As}(n, {}^3\text{He})^{73}\text{Ga}$

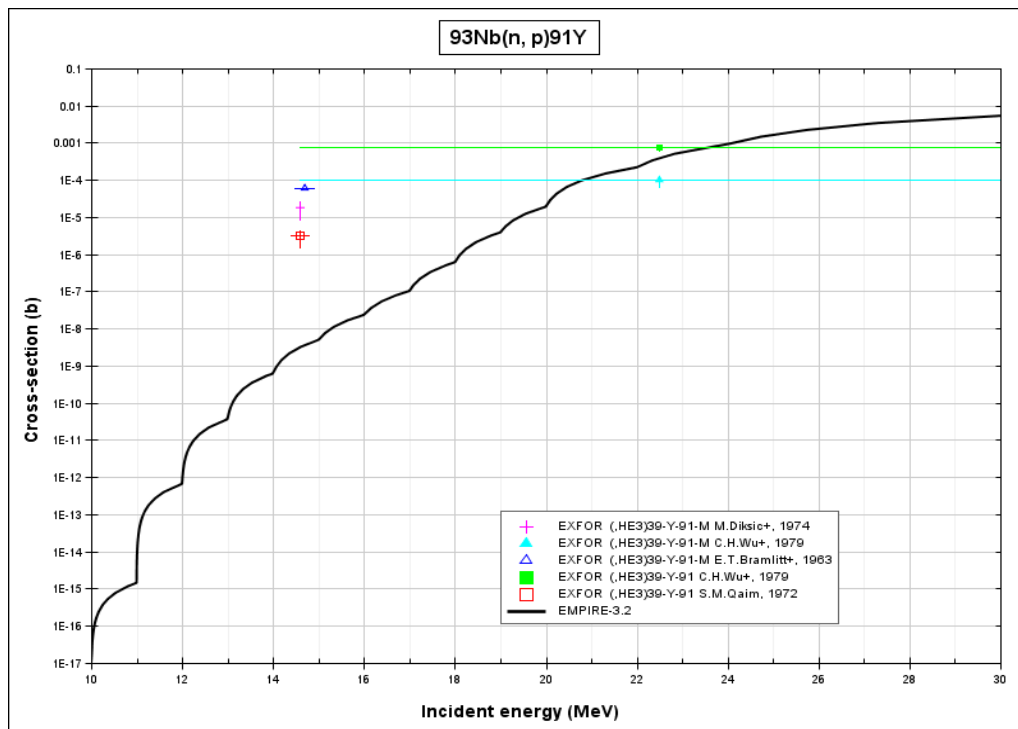
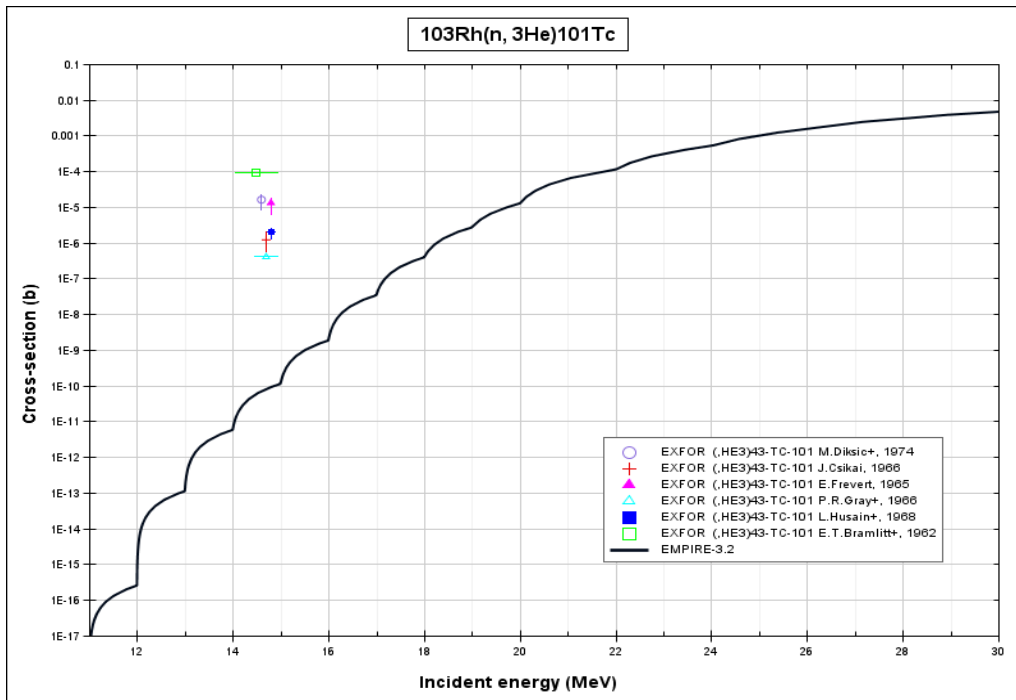
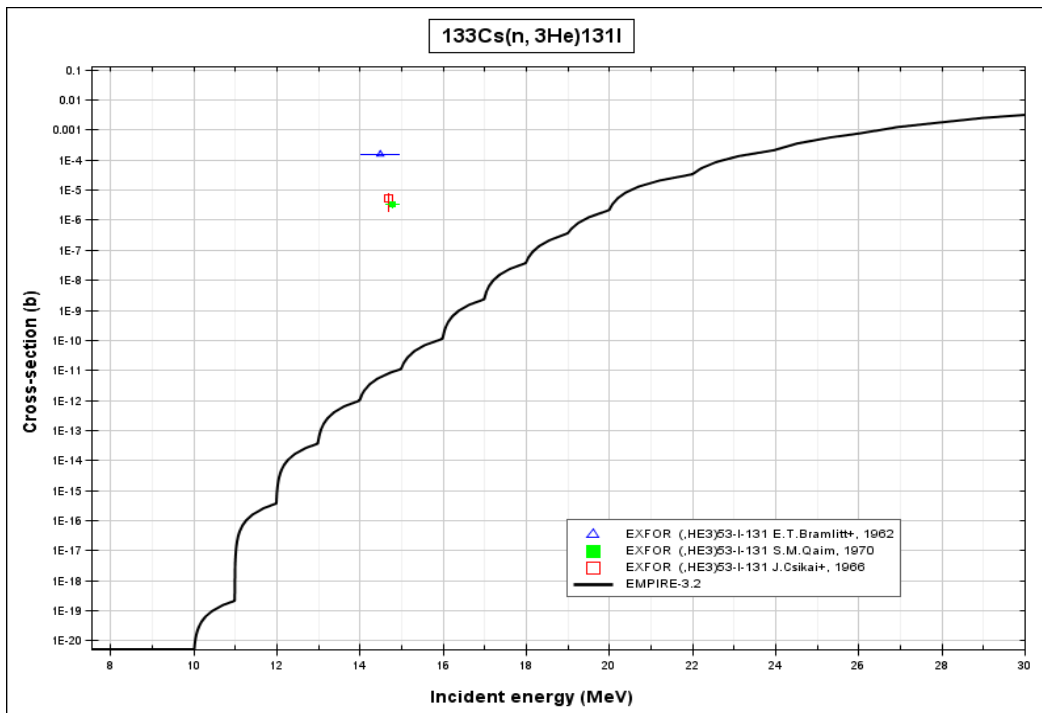
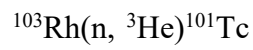


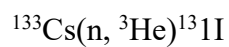
Figure III.7 : Comparaison des sections efficaces expérimentales et calculées pour la réaction  $^{93}\text{Nb}(n, {}^3\text{He})^{91}\text{Y}$

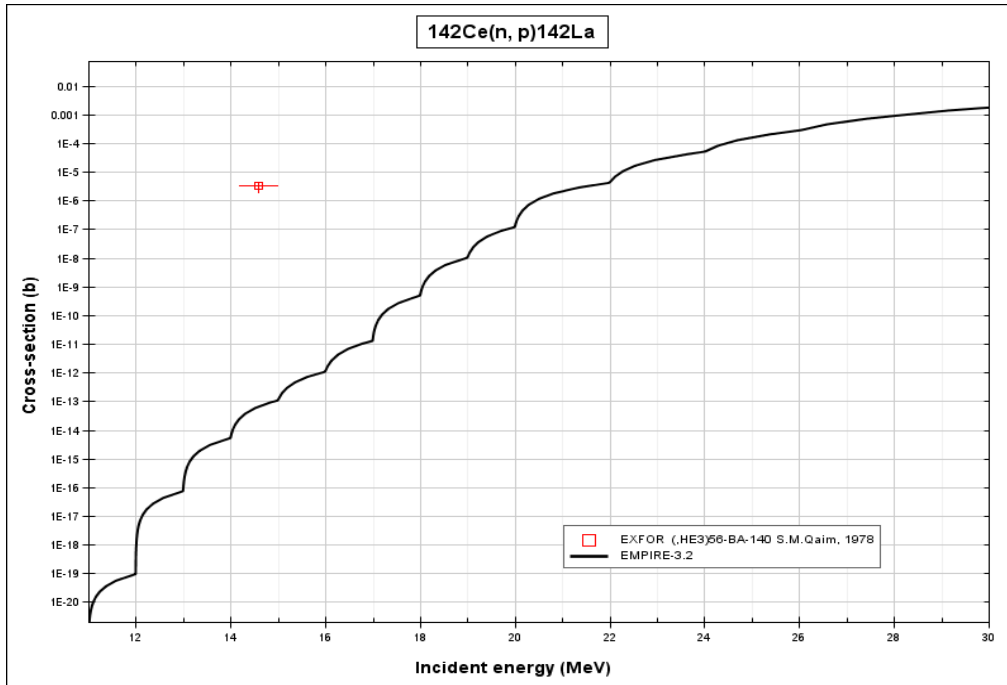


**Figure III.8** : Comparaison des sections efficaces expérimentales et calculées pour la réaction

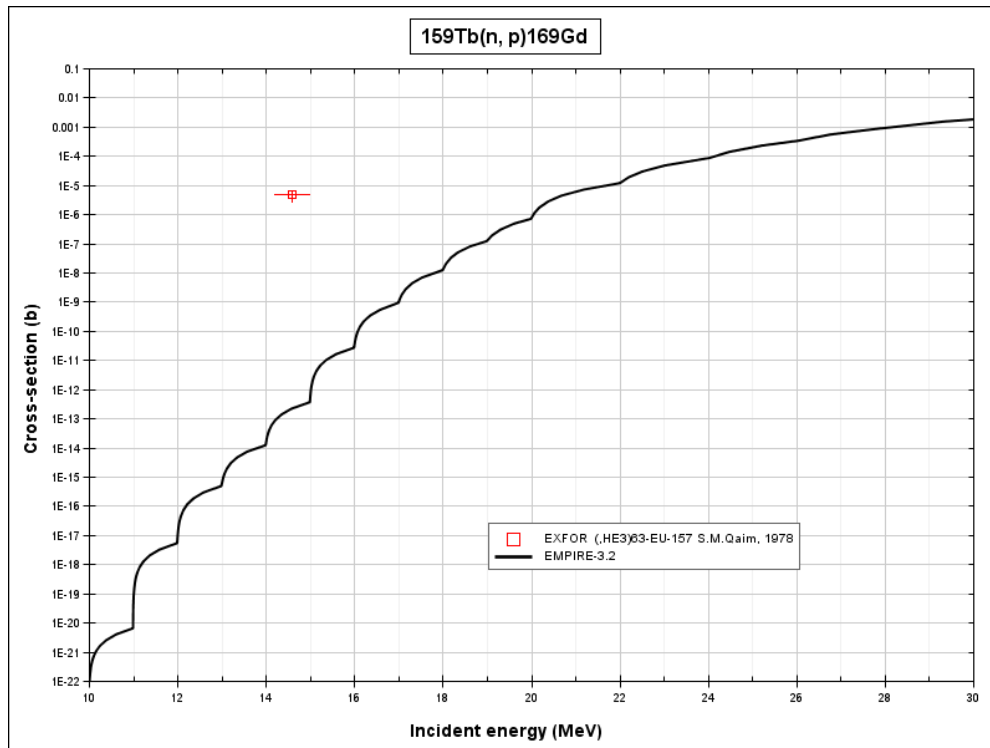


**Figure III.9** : Comparaison des sections efficaces expérimentales et calculées pour la réaction





**Figure III.10** : Comparaison des sections efficaces expérimentales et calculées pour la réaction  $^{142}\text{Ce}(n, ^3\text{He})^{140}\text{Ba}$



**Figure III.11** : Comparaison des sections efficaces expérimentales et calculées pour la réaction  $^{159}\text{Tb}(n, ^3\text{He})^{157}\text{Eu}$

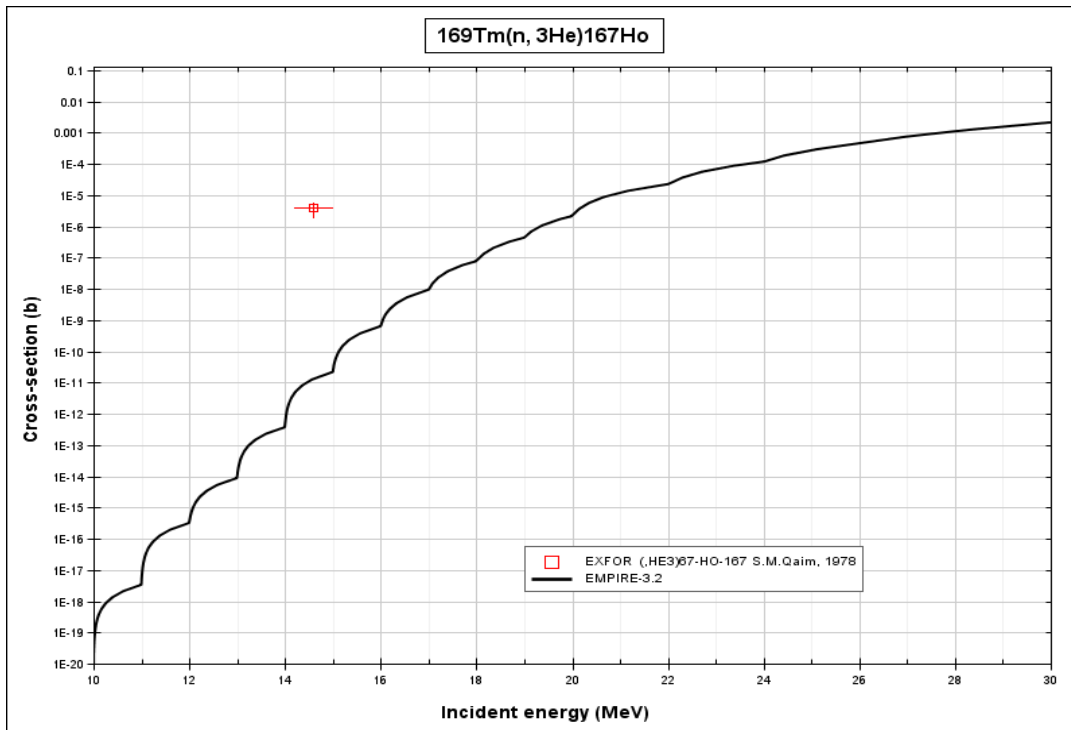


Figure III.12 : Comparaison des sections efficaces expérimentales et calculées pour la réaction  $^{169}\text{Tm}(n, ^3\text{He})^{167}\text{Ho}$

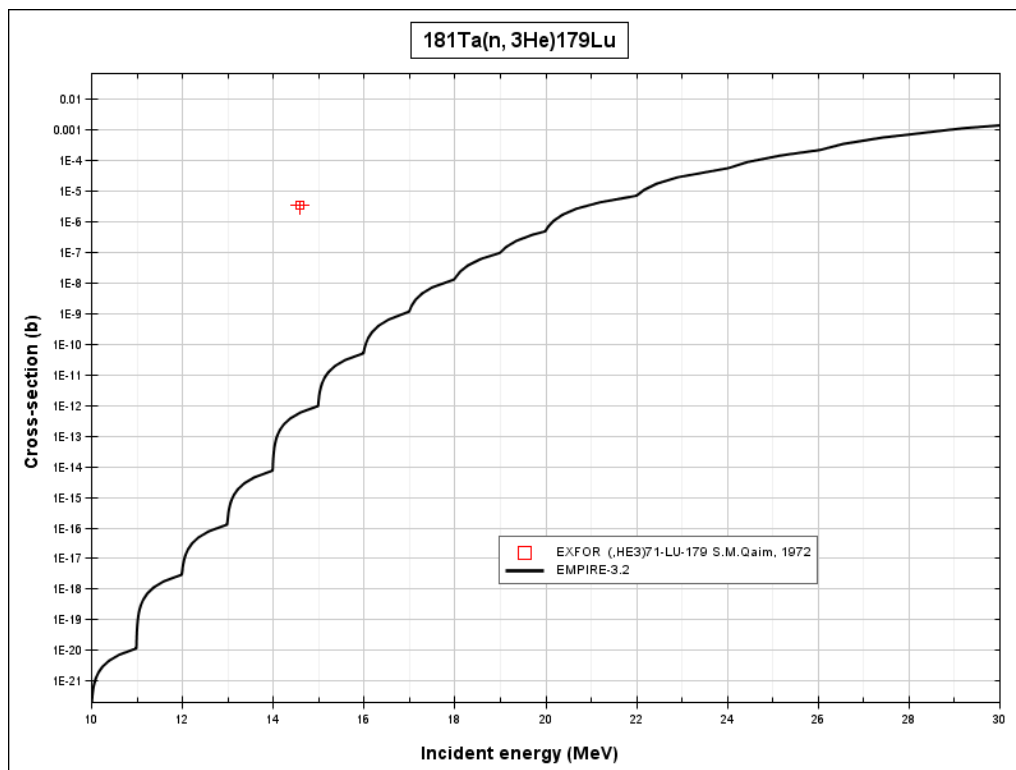
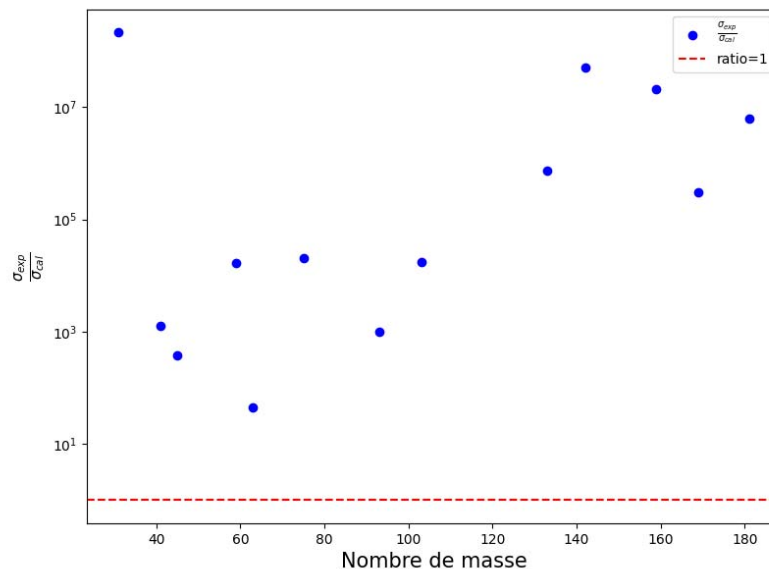


Figure III.13 : Comparaison des sections efficaces expérimentales et calculées pour la réaction  $^{181}\text{Ta}(n, ^3\text{He})^{179}\text{Lu}$ .

Il est important de noter que ces calculs sont basés sur le modèle théorique et peuvent donc présenter des différences par rapport aux valeurs expérimentales. Cependant, ces différences peuvent nous fournir des informations précieuses sur les limites du modèle et les aspects de la réaction ( $n, {}^3\text{He}$ ) qui nécessitent une étude plus approfondie.

### III-4 Évaluation du rapport entre les sections efficaces expérimentales et calculées

Après avoir calculé les sections efficaces de la réaction ( $n, {}^3\text{He}$ ) en utilisant le code EMPIRE et examiné les valeurs expérimentales disponibles, nous avons calculé le rapport  $\frac{\sigma_{exp}}{\sigma_{cal}}$  en divisant la section efficace expérimentale par la section efficace calculée. Ces rapports sont illustrés dans la **figure III.14**.



**Figure III.14** : Rapport de la section efficace expérimentale aux sections efficace calculée.

Il est à noter que le rapport  $\frac{\sigma_{exp}}{\sigma_{cal}}$  est souvent éloigné de la valeur 1. Il est important de noter que les calculs sont basés un modèle théorique et, par conséquent, peuvent présenter des écarts par rapport aux valeurs expérimentales. Ces écarts ne sont pas nécessairement des erreurs, mais plutôt des indicateurs précieux de la complexité inhérente à la réaction ( $n, {}^3\text{He}$ ) et des limites du modèle théorique utilisé.

De plus, l'observation de ces différences peut nous inciter à explorer l'utilisation de formules semi-empiriques. Ces formules, qui combinent des éléments théoriques et expérimentaux, peuvent souvent offrir une correspondance plus précise avec les données expérimentales et peuvent être particulièrement utiles lorsque les modèles théoriques purs sont insuffisants.

## **II-1 Résultats et discussion**

Dans ce chapitre, nous avons exploré la réaction nucléaire ( $n, {}^3\text{He}$ ) à travers une analyse des données expérimentales et des calculs théoriques effectués avec le code EMPIRE. Les sections efficaces ont été calculées pour une série de réactions nucléaires, et le rapport entre les sections efficaces expérimentales et calculées a été évalué.

Nos résultats ont montré une variabilité significative dans les sections efficaces entre différents éléments et ont souligné l'importance de la confrontation entre les prédictions théoriques et les données expérimentales. Les écarts observés indiquent la nécessité d'une amélioration continue des modèles théoriques pour une meilleure compréhension de la réaction ( $n, {}^3\text{He}$ ).

En résumé, cette analyse nous a aidé à comprendre à quel point la réaction ( $n, {}^3\text{He}$ ) est compliquée. Elle a aussi montré qu'il est important d'utiliser l'approche combinée expérimentale et théorique pour l'étude des réactions nucléaires.

**Chapitre IV**  
**Étude systématique de la réaction**  
**neutronique (n, <sup>3</sup>He)**

Dans ce chapitre, on a recours à l'étude systématique pour générer des sections efficaces proches des données mesurées, cela est réalisé à travers une expression semi empirique écrite à la base du modèle de pré-équilibre et qui comporte des paramètres libres, ces derniers sont déterminées par la minimisation des paramètres statistiques de la méthode des moindres carrée. L'étude concerne toujours les 13 éléments pris dans le précédent chapitre.

#### **IV-1 Formule semi-empirique proposée pour le calcul de la section efficace de la réaction neutronique (n, <sup>3</sup>He)**

Les formules proposées auparavant varient suivant les modèles utilisés pour décrire les réactions neutroniques. Il existe des formules empiriques ou on observe une dépendance exponentielle en fonction de nombre de masse A et de nombre de charge Z de la cible [18]. Les formules semi-empiriques ou on a en plus de la dépendance exponentielle il y a une dépendance polynomiale [19]. Les formules empiriques ou semi-empiriques ont des paramètres libres, le nombre de ces derniers peut être supérieur de 1, ils sont fixées par les données expérimentales et les valeurs des paramètres statistiques  $\Sigma$  et  $\chi^2$ . Dans ce travail on propose la formule semi-empirique suivante :

$$\sigma_{3He}^{pre} = \pi r_0^2 \left( A^{1/3} + 1 \right)^2 A^{\alpha_3} \left( \alpha_1 \left( \frac{N-Z+1}{A} \right) + \alpha_2 \right)^{15} \dots\dots\dots (IV.1)$$

$r_0$  est le rayon du noyau qui vaut 1.3 fm. Cette formule contient trois paramètres  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  et  $\alpha_3$ .

On a déterminées les valeurs des paramètres statistiques  $\Sigma$  et  $\chi^2$ , et les sections efficaces de la réaction (n, <sup>3</sup>He) à l'aide d'un algorithme écrit en

langage Python et exécuté en ligne sur le site de Jupyter. les données expérimentales nous aident à fixer les paramètres de la formule semi empirique.

#### IV-2 Paramètre statistique $\Sigma$

La formule proposée pour générer les fonctions d'excitation de la réaction (n,  $^3\text{He}$ ) pour des neutrons incidents de 14,6 MeV comporte des paramètres libres, ces derniers sont ajustés pour donner le minimum des paramètres statistiques  $\Sigma$  et  $\chi^2$ ,  $\Sigma$  est défini comme suit:

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

Où :

$N$  est le nombre des cibles prises dans le calcul.

$\sigma_i^{exp}$  est la section efficace mesurée expérimentalement pour la cible  $i$ .

$\sigma_i^{cal}$  est la section efficace calculée théoriquement pour la cible  $i$ .

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

#### IV-3 Paramètre statistique global $\chi^2$

Un autre paramètre statistique global  $\chi^2$  qui nous aide à évaluer l'expression proposé (l'équation (IV.1)) et qui dépend au premier lieu de nombre des données expérimentales et au second lieu de nombre des paramètres libres. Le paramètre  $\chi^2$  est défini comme suit :

$$\chi^2 = \frac{\Sigma}{(N-M)} \dots\dots\dots (IV.3)$$

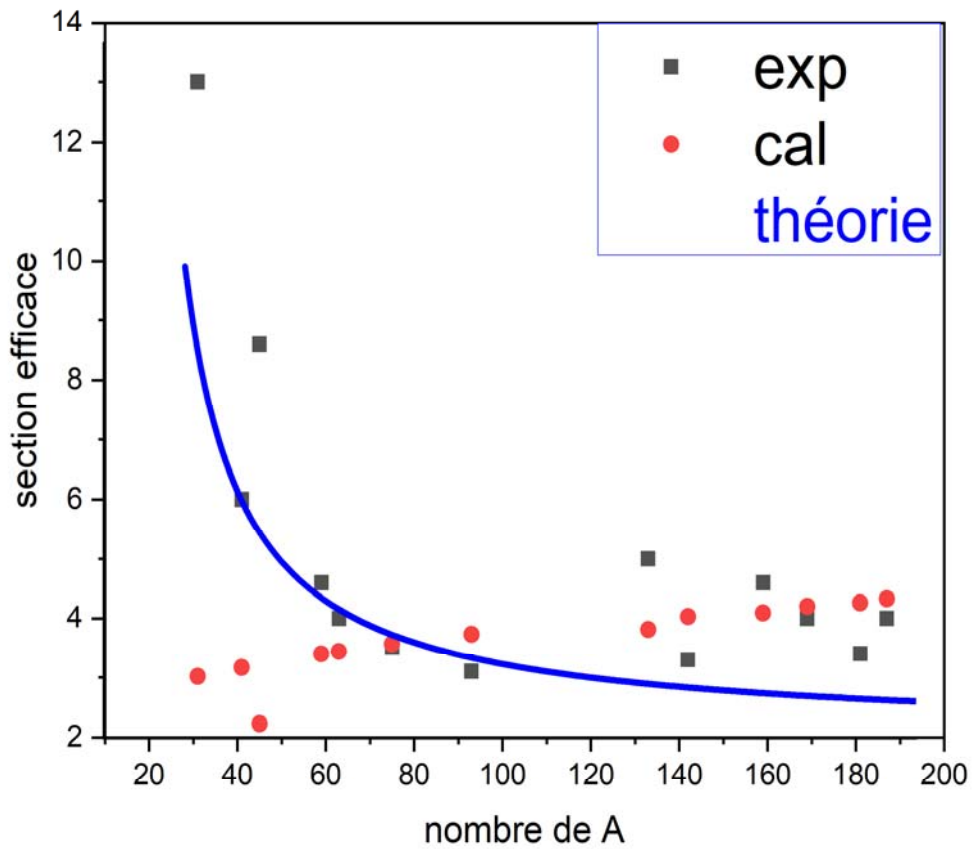
Avec :

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

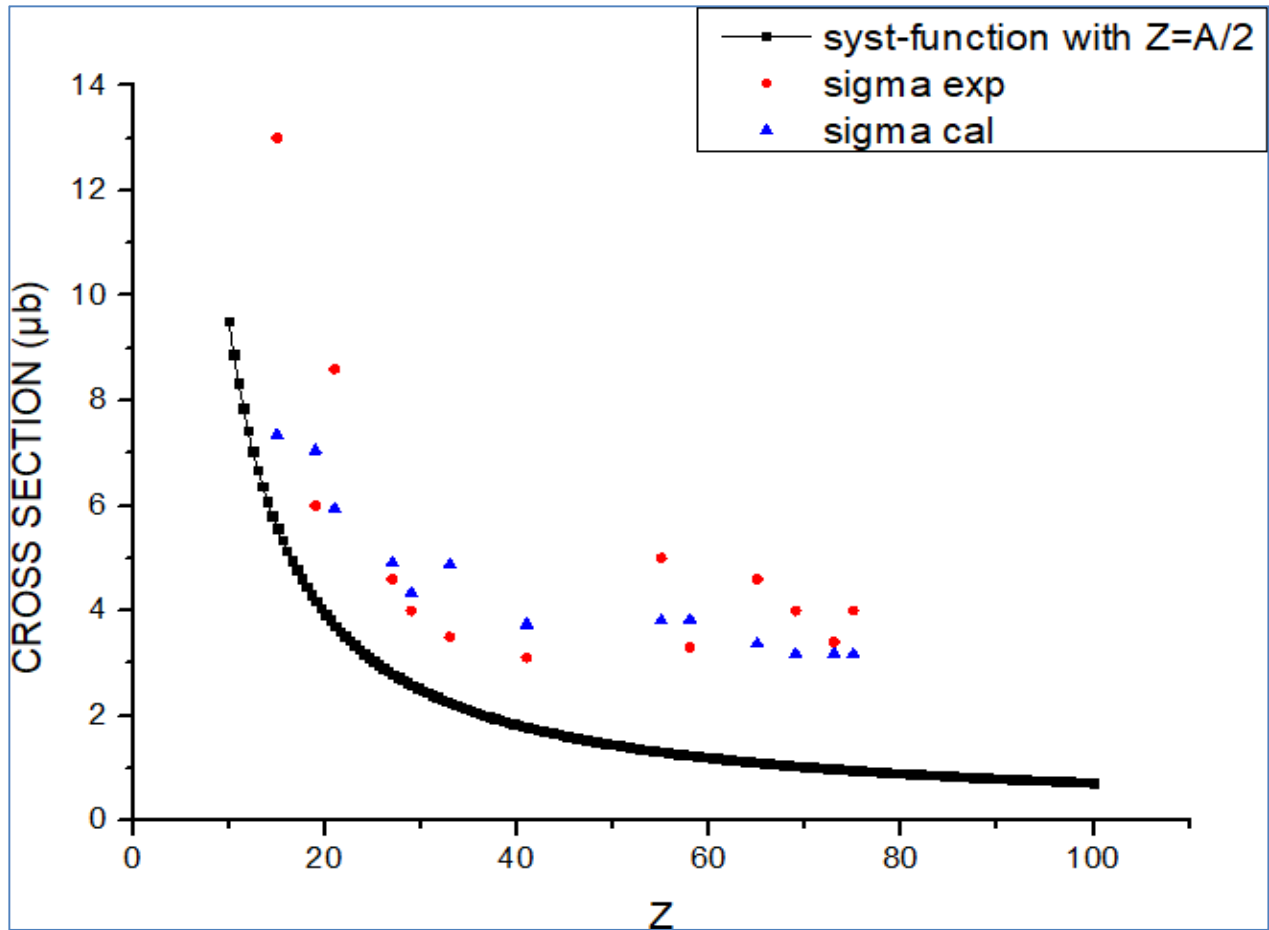
$M$  est le nombre de paramètres d'ajustement qui assure une bonne convergence des données théoriques vers les données expérimentales.

#### IV-4 Comparaison des données expérimentales et systématique

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 [13-14] Csikai [15] et Szalay [16] et Dilksič et al [17]. Ces mesures expérimentales sont accumulées dans la base de données EXFOR, on les utilise afin d'évaluer l'expression semi empirique.



**Figure IV.1** : les sections efficaces de la réaction (n,  $^3\text{He}$ ) expérimentales (carré) et calculés (point), pour les 13 cibles, la courbe continue concerne la variation de la formule systématique en fonction de A.



**Figure.VI-2** : les sections efficaces de la réaction (n,  $^3\text{He}$ ) expérimentales (carré) et calculés (point), pour les 13 cibles, la courbe continue présente la formule systématique en fonction de Z.

Dans les deux figures VI-1 et VI-2 Les courbes discontinues présentent les sections efficaces calculées (point) et les données expérimentales (carré),

la figure VI-1 représente la variation en fonction de nombre de masse A et la figure VI-2 représente la variation en fonction de nombre de masse Z.

La courbe continue dans les figures VI-1 et VI-2 représente le comportement de l'expression systématique en fonction de nombre de masse A variant de 1 jusqu'à 200, et pour Z qui varie de 1 jusqu'à 100.

Pour les valeurs des paramètres statistiques  $\Sigma$  et  $\chi^2$ , les résultats sont classés au tableau VI-1.

Formula	$\Sigma$	$\chi^2$ .	Parameters
Ce travail	<b>3.08</b>	<b>0.31</b>	<b><math>\alpha_1=3.1683.10^{-1}\mu b, \alpha_2=6.2143.10^{-1}\mu b, \alpha_3 =-1.5</math></b>
Nehaoua	7.45	0.83	$\alpha_1 = 2.1136 \times 10^{-2} \mu b, \alpha_2= 9.8232 \times 10^{-1} \mu b,$ $\alpha_3 = 1.62, \alpha_4 = 374.23$
Yigit	10. 23	0.93	$\alpha_1=0.0042 \mu b, \alpha_2=0.375$
Yettou et al.	13.26	1.32	$\alpha_1=5.583.10^2 \mu b, \alpha_2=-0.42631 \mu b, \alpha_3=-61.492$
Broeders et al.	15.1	1.51	$\alpha_1=1.6534 \mu b, \alpha_2=0.15257 \mu b, \alpha_3=-2.3$
Broeders et al.	20.8	1.89	$\alpha_1=5.8701.10^{-3} \mu b, \alpha_2=1.7378.10^{-2} \mu b,$
Qaim	21.8	1.99	$\alpha_1=8.475.10^{-2} \mu b, \alpha_2=-1.6467$

**Tableau VI-1:** valeurs des paramètres statistiques pour les formules empiriques et semi empiriques.

#### IV-5 Résultats et discussion

Nous observons dans les deux figures VI-1 et VI-2 que les sections efficaces de la réaction nucléaire (n,  $^3\text{He}$ ) sont inversement proportionnellement en fonction de Z et de A, mais leurs valeurs restent très faibles de l'ordre de quelque micro barns (inferieurs de 5 micro barns).

On trouve que notre les sections efficaces systématiques convergent vers les données expérimentale, donc la formule proposée minimise de façon remarquable la différence entres eux.

Dans les deux figures VI-1 et VI-2 La courbe discontinus qui présente les sections efficaces calculées démontre que notre formule semi empirique converge convenablement vers les données expérimentales. et qui prouve la réussite du modèle pré équilibre à mieux décrire la production de l'hélium dans les réactions induites par des neutrons rapides, ou l'ajout à la variation exponentielle un polynôme contenant une dépendance en nombre de masse A et du nombre de charge est nécessaire.

Pour la courbe continue qui représente le comportement de l'expression en fonction de nombre de masse A qui varie de 1 jusqu'à 200, on constate que la formule garde une certaine stabilité, et nécessite la connaissance davantage de mesures pour des cibles avec un nombre de masse élevé A , donc pour l'évaluation complète de la fonction on doit réaliser plus de mesures.

Pour la courbe continue qui représente le comportement de l'expression en fonction de nombre de masse Z qui varie de 1 jusqu'à 100, on voit que la différence entre la courbe continue et les courbes discrètes augmente, qui est expliqué par la prise de la variable  $Z=A/2$  et qui s'éloigne de la vallée de stabilités des isotopes ou  $Z < A/2$ .

On compare nos resultants avec ceux obtenus par: Nehaoua [1], Yiğit [2], Yettou, Belgaid [3], Broeders , Konobeyev [4], Qaim [5]. On trouve que notre formule minimise davantage les valeurs des paramètres statistiques  $\Sigma$  et  $\chi^2$ ,  $\Sigma$  atteint la valeur 3.08 et  $\chi^2$  vaut 0.31, ces valeurs peuvent être améliorés en assurant plus de données expérimentales.

Au dernier lieu , et en utilisant la formule semi empirique (l'équation (IV.1)), avec les paramètres suivants :  $\alpha_1=3.1683.10^{-1}\mu b$ ,  $\alpha_2=6.2143.10^{-1}\mu b$ ,  $\alpha_3 =-1.5$ . Pour les 13 réactions nucléaires:  $^{31}\text{P}(n, ^3\text{He})^{29}\text{Si}$ ,  $^{41}\text{K}(n, ^3\text{He})^{39}\text{Cl}$ ,  $^{45}\text{Sc}(n, ^3\text{He})^{43}\text{K}$ ,  $^{59}\text{Co}(n, ^3\text{He})^{59}\text{Fe}$ ,  $^{63}\text{Cu}(n, ^3\text{He})^{61}\text{Co}$ ,  $^{75}\text{As}(n, ^3\text{He})^{73}\text{Ga}$ ,  $^{93}\text{Nb}(n, ^3\text{He})^{91}\text{Y}$ ,  $^{103}\text{Rh}(n, ^3\text{He})^{101}\text{Tc}$ ,  $^{133}\text{Cs}(n, ^3\text{He})^{131}\text{I}$ ,  $^{142}\text{Ce}(n, ^3\text{He})^{140}\text{Ba}$ ,  $^{159}\text{Tb}(n, ^3\text{He})^{157}\text{Eu}$ ,  $^{169}\text{Tm}(n, ^3\text{He})^{167}\text{Ho}$  et  $^{181}\text{Ta}(n, ^3\text{He})^{179}\text{Lu}$ , on régénère les fonctions d'excitation qui sont présentées dans le tableau VI.2

Z	A	$E_n$ (MeV)	$\sigma_i^{exp} \pm \sigma\Delta_i^{exp}$ ( $\mu b$ )	$\sigma_i^{calc}$ ( $\mu b$ )	$\Sigma$
15	31	14.6	<b>13.±6.5</b>	7.35	0.765
19	41	14.6	6. ±3.	7.05	0.123
21	45	14.6	8.6±4.	5.94	0.441
27	59	14.6	4.6±2.1	4.91	0.021
29	63	14.6	4. ±2.	4.34	0.029
33	75	14.6	3.5±1.9	4.87	0.518
41	93	14.6	3.1±1.5	3.74	0.181
55	133	14.7	5. ±3.	3.81	0.156
58	142	14.6	3.3±1.3	3.83	0.168
65	159	14.6	4.6±1.8	3.37	0.470
69	169	14.6	4. ±2.	3.17	0.171
73	181	14.6	3.4±1.5	3.18	0.022
75	187	14.6	4.±3.	3.17	0.076

**Tableau VI-1:** sections efficaces calculées avec la formule systématique avec les paramètres :  $\alpha_1=3.1683.10^{-1}\mu b$ ,  $\alpha_2=6.2143.10^{-1}\mu b$ ,  $\alpha_3 =-1.5$

## Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons étudié les réactions nucléaires induites par des neutrons rapides d'énergie 14,6 MeV conduisant à la formation d'hélium  $^3\text{He}$ . Il est à noter que ces réactions nucléaires se produisent dans des environnements où les neutrons libres existent (au sein d'un réacteur nucléaire, un générateurs de neutrons intégrées ou portatives, les accélérateurs, un système ADS.....) avec une énergie de quelques millions d'électronvolts. L'étude de ces interactions est importante pour comprendre la physique des réacteurs nucléaires et la radioprotection qui s'intéressent aux neutrons en tant que projectiles.

Les valeurs des fonctions d'excitation des réactions  $(n, ^3\text{He})$  ont été évaluées pour 13 noyaux cibles de nombre de neutron  $N$  de 16 à 112. les 13 réactions nucléaires prises dans notre études sont :  $^{31}\text{P}(n, ^3\text{He})^{29}\text{Si}$ ,  $^{41}\text{K}(n, ^3\text{He})^{39}\text{Cl}$ ,  $^{45}\text{Sc}(n, ^3\text{He})^{43}\text{K}$ ,  $^{59}\text{Co}(n, ^3\text{He})^{59}\text{Fe}$ ,  $^{63}\text{Cu}(n, ^3\text{He})^{61}\text{Co}$ ,  $^{75}\text{As}(n, ^3\text{He})^{73}\text{Ga}$ ,  $^{93}\text{Nb}(n, ^3\text{He})^{91}\text{Y}$ ,  $^{103}\text{Rh}(n, ^3\text{He})^{101}\text{Tc}$ ,  $^{133}\text{Cs}(n, ^3\text{He})^{131}\text{I}$ ,  $^{142}\text{Ce}(n, ^3\text{He})^{140}\text{Ba}$ ,  $^{159}\text{Tb}(n, ^3\text{He})^{157}\text{Eu}$ ,  $^{169}\text{Tm}(n, ^3\text{He})^{167}\text{Ho}$  et  $^{181}\text{Ta}(n, ^3\text{He})^{179}\text{Lu}$ .

Au premier lieu, on a exploré les données expérimentales et évaluées des fonctions d'excitation des réactions  $(n, ^3\text{He})$  incluses dans le code de simulation nucléaire EMPIRE. On a constaté que le code à des limites et des manques de données pour ce type de réaction malgré sa grande puissance pour les réactions de fission, de fusion et les captures radioactives. Même on remarque une divergence entre les données calculées et les données expérimentales insérées dans le code EMPIRE.

Au second lieu, on a mené une étude systématique, cela est réalisé en proposant une formule contenant 3 paramètres libres, et qui s'élabore de la façon suivante :

$$\sigma_{^3\text{He}}^{pre} = \pi r_0^2 \left( A^{1/3} + 1 \right)^2 A^{-1.5} \left( 3.1683 \cdot 10^{-1} \left( \frac{N-Z+1}{A} \right) + 6.2143 \cdot 10^{-1} \right)^{15}.$$

Cette formule semi-empirique réussit à donner des paramètres statistiques  $\Sigma$  et  $\chi^2$  qui atteignent respectivement 3.08 et  $\chi^2$  0.31.

On constate que le modèle de pré-équilibre et le modèle exciton est les plus appropriés pour l'étude de la production de l'hélium 3 en envoyant un neutron rapide sur une cible. Cette

réaction à une faible probabilité de se produire, ce qui explique le peu de données expérimentales avec une erreur absolue importante.

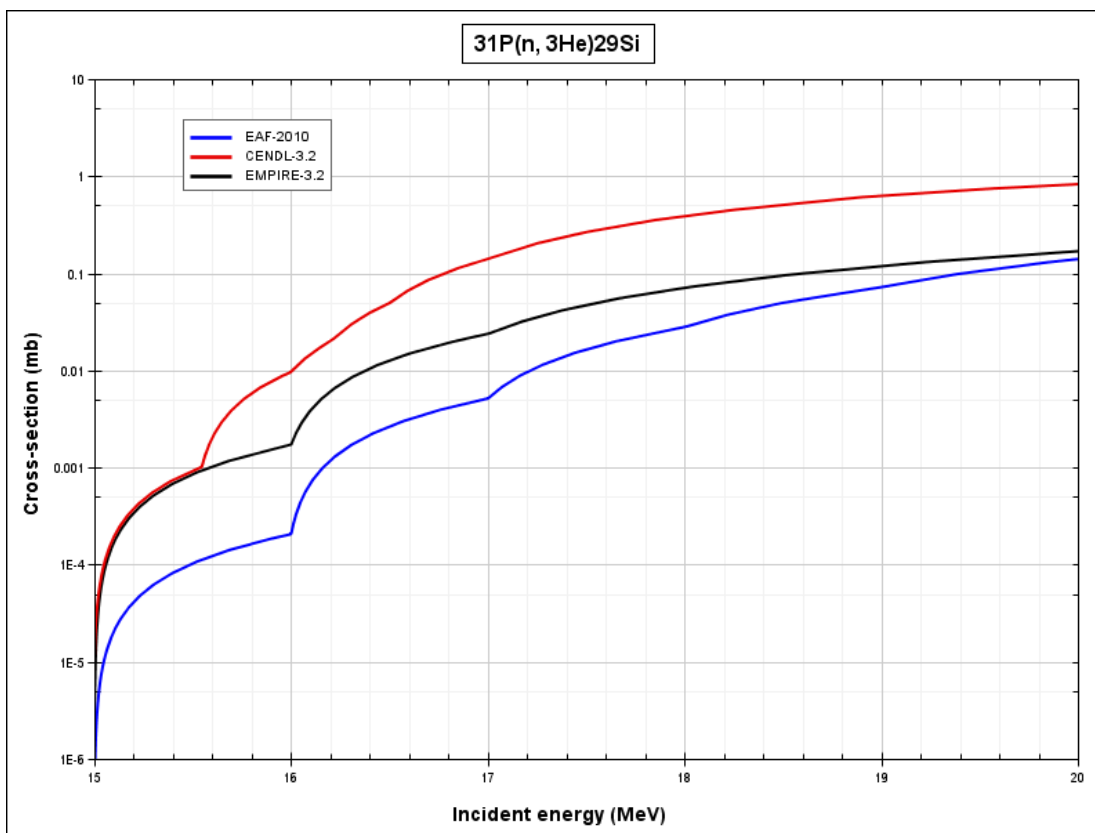
Au dernier lieu, les recherches doit être poussé dans les trois axes : expérimentale pour augmenter le nombre de mesures, et l'axe théorique pour perfectionner les modèles des réactions nucléaires, et en troisième axe la simulation, ou l'amélioration et la mise en jour des données expérimentales et évaluées dans le code de calcul EMPIRE.

## Annexe

### JANIS

**JANIS** : (Java-based nuclear information software) Programme d'affichage conçu pour faciliter la visualisation et la manipulation des données nucléaires ,Il est disponible en ligne sue le site

web :[https://www.oecd-nea.org/jcms/pl\\_39963/janis-downloads](https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_39963/janis-downloads)



## Bibliographie

- [1] Hodgson, P. E., & Běták, E. (2003). Cluster emission, transfer and capture in nuclear reactions. *Physics reports*, 374(1), 1-89.
- [2] Gauvin, H., & ORSAY, F. (1968). Emission de Neutrons Différentes dans les Réactions Nucléaires Induites par des Particules de Haute Energie. *DELAYED FISSION NEUTRONS*, 167.
- [3] Avrigeanu, V., Chuvaev, S. V., Eichin, R., Filatenkov, A. A., Forrest, R. A., Freiesleben, H., Seidel, K. (2006). Pre-equilibrium reactions on the stable tungsten isotopes at low energy. *Nuclear Physics A*, 765(1-2), 1-28.
- [4] Simenel, C. (2003). Dynamique nucléaire autour de la barrière: de la fusion à l'évaporation (Doctoral dissertation, Université de Caen).
- [5] Abdellah, A. Z. I. Z. O. U. (2016). Développement d'un modèle semi-empirique pour calculer les sections efficaces des réactions nucléaires induites par les neutrons rapides. Réalisé par.
- [6] BOUDJELLA SORAYA, G. W. (2017). Etude de la distribution angulaire et énergétique des particules émises dans une réaction nucléaire.
- [7] Le Meur, L. (2018). Etude des propriétés de désintégration bêta de noyaux exotiques d'intérêts pour la physique des réacteurs, la structure nucléaire et l'astrophysique nucléaire, à l'aide de la technique de Spectroscopie Gamma par Absorption Totale (TAGS) (Doctoral dissertation, Nantes).
- [8] Herman, M., Capote-Noy, R., Obložinský, P., Trkov, A., & Zerkin, V. (2002). Recent development and validation of the nuclear reaction code EMPIRE. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 39(sup2), 116-119.
- [9] Tcl/Tk software package, available free of charge from <http://dev.scriptics.com/software/tcltk/>.
- [10] IAEA-CRP, Reference Input Parameter Library (RIPL), IAEA-TECDOC-1034, Vienna, <http://www-nds.iaea.org/ripl/>, 1998
- [11] Schwerer, O. (2008). EXFOR formats description for users (EXFOR basics). Documentation Series of the IAEA Nuclear Data Section

- [12] Herman, M. (2009). ENDF-6 Formats Manual Data Formats and Procedures for the Evaluated Nuclear Data File ENDF/B-VI and ENDF/B-VII (No. BNL-90365-2009). Brookhaven National Lab.(BNL), Upton, NY (United States). National Nuclear Data Center (NNDC).
- [13] Qaim, S.M., (1974). A study of (n,He-3) reactions at 14.6 MeV on medium and heavy mass nuclei. *J. Inorg. Nucl. Chem.* 36, 239
- [14] 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.
- [15] Csikai, J., Szalay, A., (1965). Observation of (n,He-3) reaction. *Nucl. Phys.* 68, 546
- [16] Diksic, M., Strohal, P., Slaus, I., (1974). (n,He-3) and (n,t) reaction cross section at 14 MeV. *J. Inorg. Nucl. Chem.* 36, 477
- [17] Yiğit, M. (2015). Empirical formula on (n, 3He) reaction cross sections at 14.6 MeV neutrons. *Applied Radiation and Isotopes*, 105, 15-19.
- [18] 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.
- [19] 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

## Résumé

Dans ce travail, nous avons mené une étude systématique pour reproduire des fonctions d'excitation des réaction neutronique ( $n, {}^3\text{He}$ ) proches des données expérimentales de EXFOR, la formule semi empirique proposée est basée sur le modèles de pré-équilibre, elle contient trois paramètres libres pour avoir le minimum des paramètres statistiques  $\Sigma$  et  $\chi^2$ . En parallèle, on a vérifié les données expérimentales et évaluées du code de simulation nucléaire EMPIRE pour les 13 cibles étudiées, on a remarqué des manques de données pour la réaction neutronique ( $n, {}^3\text{He}$ ) à 14,6 MeV, ainsi une divergence entre les données calculées et les données expérimentales.

## Abstract

A new three parameters formula is proposed to calculate ( $n, {}^3\text{He}$ ) nuclear reaction cross section at 14.6 MeV, this semi-empirical systematic reduces parameters taken in previous proposed formulae which increase the contribution of pre-equilibrium  ${}^3\text{He}$  particle emission. We use exciton model in closed form and coalescence model to describe the pre-equilibrium  ${}^3\text{He}$  particle emission in reaction induced by neutron. To check the formula's quality we compare obtained cross section with measured ones obtained by Empire code. The formula obtained in this work has a good fitting with the lowest value  $\chi^2 = 0.31$ .