



**HAL**  
open science

# Etude de la mesure de la section efficace de la réaction $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ du seuil à 10 MeV

Bastien Galhaut

► **To cite this version:**

Bastien Galhaut. Etude de la mesure de la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  du seuil à 10 MeV. Physique [physics]. Normandie Université, 2017. Français. NNT : 2017NORMC231 . tel-01689841

**HAL Id: tel-01689841**

**<https://theses.hal.science/tel-01689841v1>**

Submitted on 22 Jan 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Normandie Université

## THESE

**Pour obtenir le diplôme de doctorat**

**Doctorat de Physique**

**Préparée au sein de l'Université de Caen Normandie**

**Étude de la mesure de la section efficace  
de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  du seuil à 10 MeV**

**Présentée et soutenue par  
Bastien GALHAUT**

**Thèse soutenue publiquement le 26 octobre 2017  
devant le jury composé de**

M. Philippe DESSAGNE	Directeur de Recherche (HDR) IPHC (Strasbourg)	Rapporteur
M. Philippe EUDES	Professeur des universités (HDR) SUBATECH (Nantes)	Rapporteur
M. Dominique DURAND	Directeur de Recherche (HDR) LPC (Caen)	Directeur de thèse
Mme Loredana MANDUCI	Maître de Conférences EAMEA (Cherbourg-en-Cotentin)	Examinatrice

**Thèse dirigée par Dominique DURAND, LPC Caen**



UNIVERSITÉ  
CAEN  
NORMANDIE







Normandie Université

## THESE

**Pour obtenir le diplôme de doctorat**

**Doctorat de Physique**

**Préparée au sein de l'Université de Caen Normandie**

**Étude de la mesure de la section efficace  
de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  du seuil à 10 MeV**

**Présentée et soutenue par  
Bastien GALHAUT**

**Thèse soutenue publiquement le 26 octobre 2017  
devant le jury composé de**

M. Philippe DESSAGNE	Directeur de Recherche (HDR) IPHC (Strasbourg)	Rapporteur
M. Philippe EUDES	Professeur des universités (HDR) SUBATECH (Nantes)	Rapporteur
M. Dominique DURAND	Directeur de Recherche (HDR) LPC (Caen)	Directeur de thèse
Mme Loredana MANDUCI	Maître de Conférences EAMEA (Cherbourg-en-Cotentin)	Examinatrice

**Thèse dirigée par Dominique DURAND, LPC Caen**





# Remerciements

Cette thèse fut l'objet d'un partenariat entre le LPC et l'EAMEA. A ce titre je remercie en premier lieu les deux commandants de l'EAMEA pour qui j'ai travaillé ces trois dernières années (le commandant Frédéric Janci et le commandant Laurent Mandard). Je remercie également les deux directeurs successifs du laboratoire du LPC qui m'ont accueilli (Dominique Durand et Gilles Ban). Mes remerciements vont à l'encontre de mes deux encadrants de thèse, Loredana Manduci et François-René Lecolley, qui ont permis que cette thèse aboutisse, ainsi que mon directeur de thèse, Dominique Durand. Je remercie également Patrick Mary, le directeur scientifique de l'EAMEA, pour ses conseils les plus avisés ces trois dernières années. Je remercie le personnel de l'école atomique et les membres du LPC pour leur accueil ces trois dernières années.

Plus particulièrement, je tiens à remercier le personnel du GEA et du personnel composant la division DSRD de l'EAMEA, ainsi que les membres de l'EAMEA "site historique".

A titre personnel, je veux remercier les membres de ma famille et mes amis qui m'ont supporté (le mot est juste) ces trois dernières années.



# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>v</b>
<b>Liste des acronymes et définitions utilisés dans ce manuscrit</b>	<b>xxiii</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Le contexte scientifique</b>	<b>5</b>
1.1 Les problématiques des sections efficaces d'intérêt pour la physique des réacteurs . . . . .	5
1.1.1 L'importance et influence de l'oxygène dans la physique des réacteurs	7
1.1.2 L'influence de la production d'hélium à partir de l'oxygène sur les paramètres physiques des réacteurs et les produits induits . . . . .	7
1.2 La production des particules alpha dans les réactions induites par neutron	8
1.2.1 Cinématique des réactions $(n,\alpha)$ . . . . .	9
1.2.1.1 Théorie générale . . . . .	9
1.2.1.2 Section efficace et principe de la balance détaillée . . . . .	10
1.2.2 Études expérimentales . . . . .	11
1.2.2.1 Les mesures expérimentales de section efficace sur l'oxygène (réaction directe) . . . . .	12
1.2.2.1.1 Les études expérimentales en-dessous de 6 MeV .	16
1.2.2.1.2 Les études expérimentales de 6 à 9 MeV . . . . .	17
1.2.2.1.3 Les études expérimentales au-dessus de 9 MeV . .	20
1.2.2.1.4 Les mesures expérimentales les plus récentes . . .	21
1.2.2.1.5 Résumé des expériences sur l'oxygène . . . . .	24
1.2.2.2 Les mesures expérimentales de section efficace sur le carbone (réaction inverse) . . . . .	26
1.2.2.3 Les mesures expérimentales sur le fluor . . . . .	27
1.2.2.3.1 Les premières études expérimentales . . . . .	31
1.2.2.3.2 Études de la section efficace du seuil à 9 MeV . .	31
1.2.2.3.3 Études de la section efficace pour des neutrons de 13 MeV et plus . . . . .	34
1.2.2.3.4 Résumé des expériences sur le fluor . . . . .	34
1.2.3 Évaluations des données nucléaires . . . . .	36
1.2.3.1 Les évaluations de la réaction $(n,\alpha)$ sur l'oxygène . . . . .	37
1.2.3.2 Les évaluations de la réaction $(n,\alpha)$ sur le fluor . . . . .	40
1.2.4 Conclusion sur les évaluations . . . . .	40
1.3 Conclusion du chapitre . . . . .	42
<b>2 Le projet SCALP</b>	<b>43</b>
2.1 Principe général du projet SCALP . . . . .	43
2.1.1 Ionisation du gaz . . . . .	44

2.1.2	Scintillation du gaz . . . . .	44
2.1.3	Discrimination des réactions . . . . .	45
2.2	Études expérimentales sur le mélange gazeux . . . . .	46
2.2.1	Études préliminaires . . . . .	46
2.2.1.1	Modèle de Stern-Volmer . . . . .	50
2.2.1.2	Dispositif expérimental utilisé . . . . .	50
2.2.1.3	Études expérimentales . . . . .	51
2.2.1.4	Résultats et analyses des études . . . . .	52
2.2.1.5	Conclusion des études expérimentales et choix du mélange à utiliser . . . . .	55
2.2.2	Simulations du dispositif expérimental . . . . .	55
2.2.3	Le CRT : Coïncidence Resolving Time . . . . .	58
2.2.4	Conclusion . . . . .	58
2.3	Description du dispositif expérimental . . . . .	58
2.3.1	La chambre d'ionisation avec grille de Frisch et le dégradeur de champ	60
2.3.1.1	Principe d'une chambre d'ionisation avec grille de Frisch .	60
2.3.1.2	La chambre d'ionisation de SCALP . . . . .	61
2.3.2	Photomultiplicateurs . . . . .	61
2.3.2.1	Principe général . . . . .	62
2.3.2.2	Les photomultiplicateurs utilisés pour le projet SCALP .	63
2.3.3	Électronique . . . . .	63
2.4	Conclusion du chapitre . . . . .	65
<b>3</b>	<b>Mise en œuvre des simulations</b>	<b>67</b>
3.1	Structure générale du programme de simulation utilisé dans le projet SCALP	67
3.2	Le générateur d'événements SCALPGENERATOR . . . . .	69
3.2.1	Concentration moléculaire du gaz simulé . . . . .	69
3.2.2	Bilan et seuils des réactions simulés . . . . .	71
3.2.3	Sections efficace utilisées par le générateur d'événements . . . . .	72
3.2.4	Flux neutronique . . . . .	72
3.3	Filtre expérimental (programme SICSIMULATION) . . . . .	74
3.3.1	Généralités sur les simulations GEANT4 . . . . .	76
3.3.2	Géométrie utilisée par le programme SICSIMULATION . . . . .	76
3.3.3	Paramètres déterminés à partir des simulations . . . . .	77
3.4	Génération d'événements par SCALPGENERATOR . . . . .	77
3.5	Dimensions de la chambre d'ionisation . . . . .	80
3.6	Conclusion du chapitre . . . . .	86
<b>4</b>	<b>Traitement et analyse des données simulées</b>	<b>87</b>
4.1	Traitement des données des simulations . . . . .	87
4.1.1	Traitement des particules chargées dans la chambre d'ionisation . .	87
4.1.1.1	Efficacité des réactions . . . . .	95
4.1.1.2	Estimation du volume utile . . . . .	95
4.1.2	Traitement de la détection de la lumière par les photo-multiplicateurs	98
4.1.2.1	Quantité de lumière détectée . . . . .	98
4.1.2.2	Estimation du CRT . . . . .	101
4.1.3	Énergie des particules émises et énergie déposée dans le volume utile	106
4.2	Analyse des données simulées . . . . .	113
4.2.1	Estimation de l'énergie du neutron incident et étude de sa dégradation	113
4.2.2	Efficacité lumineuse . . . . .	120

---

4.2.3	Section efficace estimée . . . . .	124
4.2.4	Précisions estimées sur la section efficace . . . . .	127
4.3	Estimation du temps de manipulation . . . . .	130
4.4	Conclusion du chapitre . . . . .	135
	<b>Conclusion générale et perspective</b>	<b>137</b>
<b>A</b>	<b>Annexes du chapitre 1</b>	<b>141</b>
<b>B</b>	<b>Annexes du chapitre 2</b>	<b>145</b>
<b>C</b>	<b>Annexes sur le chapitre 4</b>	<b>149</b>



# Table des figures

1.1	Section efficace des principales réactions $n+^{16}\text{O}$ (issues de la bibliothèque ENDF/B-VII.1) pour des neutrons d'énergie maximale de 20 MeV. La réaction étudiée dans ce travail est en gras et en rouge. . . . .	13
1.2	Section efficace des réactions $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ pour des neutrons d'énergie maximale de 20 MeV (issues de la bibliothèque ENDF/B-VII.1). La section efficace de la réaction $^{16}\text{O}(n,\alpha)$ correspond à la somme des sections efficaces des réactions où le noyau résidu se trouve dans son état fondamental et dans ses états excités. On remarque qu'à partir de 14 MeV le neutron incident est tellement énergétique que la réaction prépondérante est une réaction à trois corps. . . . .	14
1.3	Schéma de désintégration des principaux états excités du $^{17}\text{O}$ (à gauche), du $^{13}\text{C}$ (à droite) et des photons $\gamma$ émis lors de la désexcitation. . . . .	16
1.4	Mesures expérimentales de la section efficace de la réaction $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ du seuil de la réaction à 6 MeV. Les évaluations ENDF/B-VII.1, JEFF-3.2 et JENDL-4.0 sont confondues sur cette gamme en énergie. L'évaluation ENDF/B-VIII.B3 est supérieure aux autres évaluations. . . . .	18
1.5	Mesures expérimentales de la section efficace de la réaction $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ de 6 à 9 MeV. Les évaluations ENDF/B-VIII.B3, ENDF/B-VII.1, JEFF-3.2 et JENDL-4.0 sur la réaction $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ et sur la réaction $^{16}\text{O}(n,\alpha_0)^{13}\text{C}$ sont également représentées. . . . .	19
1.6	Mesures expérimentales de la section efficace de la réaction $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ de 9 à 20 MeV. Les évaluations ENDF/B-VII.1, JEFF-3.2 et ENDF/B-VIII.B3 sur la réaction $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ et sur la réaction $^{16}\text{O}(n,\alpha_0)^{13}\text{C}$ sont confondues sur cette gamme en énergie. . . . .	22
1.7	Comparaison des résultats expérimentaux de section efficace de la réaction $^{16}\text{O}(n,\alpha_0)^{13}\text{C}$ (échelle logarithmique en abscisse). En bleu, les résultats de G. Giorginis en 2007 à l'IRMM, en rouge, ceux de V.A. Khryachkov en 2012 <i>et al.</i> à l'IPPE. Ces mesures sont comparées avec les évaluations de la section efficace de la réaction $^{16}\text{O}(n,\alpha_0)^{13}\text{C}$ . . . . .	23
1.8	Schéma du dispositif expérimental utilisé par Giorginis <i>et al.</i> à l'IRMM en 2007 et par Khryachkov <i>et al.</i> en 2012 à l'IPPE (issu de [1]). . . . .	24
1.9	Principales mesures expérimentales de la section efficace de la réaction $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$ (échelle logarithmique en ordonnée). Les résultats expérimentaux sont comparés avec la dernière évaluation, à savoir la JENDL de 2005. . . . .	28
1.10	Schéma de désintégration du $^{16}\text{N}$ . Par soucis de clarté, les incertitudes et les intensités n'ont pas été répertoriés. La figure A.1 en annexe A donne un schéma plus exhaustif des états excités du $^{16}\text{O}$ . . . . .	29
1.11	Section efficace des principales réactions $n+^{19}\text{F}$ (issues de la bibliothèque ENDF/B-VII.1) pour des neutrons d'énergie maximale de 20 MeV. La réaction $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$ est en gras et en rouge. . . . .	30

1.12	Principales mesures expérimentales de la section efficace de la réaction $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$ du seuil à 9 MeV (échelle logarithmique en abscisse). Les résultats expérimentaux sont comparés avec les évaluations ENDF/B-VII.1 et JENDL-4.0 (courbe noire et verte respectivement). . . . .	32
1.13	Principales mesures expérimentales de la section efficace de la réaction $^{19}\text{F}(\alpha,n)^{16}\text{N}$ de 13 à 20 MeV. Les résultats expérimentaux sont comparés avec les évaluations ENDF/B-VII.1 et JENDL-4.0 (courbe noire et verte respectivement). . . . .	35
1.14	Principales dernières évaluations de la section efficace de la réaction $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ sur une gamme en énergie de 4 à 10 MeV (échelle logarithmique en abscisse). Les versions bêta ENDF/B-VIII.B3 et ENDF/B-VIII.B4 sont confondues. . . . .	39
1.15	Principales évaluations de la section efficace de la réaction $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$ sur une gamme en énergie de 3 à 20 MeV (échelle logarithmique en abscisse). Les évaluations JEFF-3.2, ENDF/V-VII.0, ENDF/V-VII.1 et ENDF/V-VIII.B4 sont confondues avec l'évaluation ENDF/V-VIII.B3. . . . .	41
2.1	Spectre lumineux des photons émis par la scintillation du $\text{CF}_4$ (issu de Gernhäuser [2]). . . . .	45
2.2	Graphe représentant l'énergie déposée dans le volume utile en fonction du temps de vol des neutrons incidents. Les hyperboles représentent les différentes réactions nucléaires émettant une particule chargée (proton, deuton, triton, alpha) dans un mélange de gaz $\text{CF}_4/\text{CO}_2$ . . . . .	47
2.3	Graphe représentant l'énergie déposée dans le volume utile en fonction de l'énergie des neutrons incidents (déterminée à partir du temps de vol). Les courbes représentent les différentes réactions nucléaires émettant une particule chargée (proton, deuton, triton, alpha) dans un mélange de gaz $\text{CF}_4/\text{CO}_2$ . . . . .	48
2.4	Principales études expérimentales et évaluations de ENDF/B-VIII.B3 et JENDL-4.0 sur les réactions $^3\text{He}(n,\text{el})$ en vert, $^3\text{He}(n,\text{p})$ en rouge et $^3\text{He}(n,\text{d})$ en bleu (échelle logarithmique en abscisse et en ordonnée). . . . .	49
2.5	Schéma du dispositif expérimental permettant de mélanger et d'étudier un mélange de deux gaz. . . . .	50
2.6	Charge des signaux collectés par un des deux photo-multiplicateurs (charge normalisée sur le temps d'acquisition). Le pic de gauche correspond à la charge provenant des photo-électrons uniques, le pic de droite à la charge due aux photons provenant de la désexcitation des molécules scintillantes. En noir le spectre brut, et en vert le même spectre représentant les événements en coïncidence entre les deux photomultiplicateurs. En rouge l'ajustement du pic physique avec une fonction gaussienne. . . . .	53
2.7	Nombre moyen de photo-électrons émis par chaque photo-cathode pour différents compositions de mélange $\text{CF}_4/\text{He}$ et $\text{CF}_4/\text{CO}_2$ (respectivement les points de couleur verte et rouge). Les valeurs relatives au $\text{PMn}^\circ 1$ sont représentées par un marqueur en croix, pour le $\text{PMn}^\circ 2$ par un marqueur carré. Les ajustements de Stern-Volmer pour chaque mélange et pour chaque photo-multiplicateur sont représentés par les courbes en pointillées. . . . .	54
2.8	Comparaison entre les résultats obtenus par simulation (en noir pour le mélange $\text{CF}_4/\text{He}$ et en bleu pour le mélange $\text{CF}_4/\text{CO}_2$ ) et les résultats expérimentaux présentés dans la figure 2.7. Les résultats obtenus par simulation ont également été ajustés par la formule de Stern-Volmer. . . . .	57

2.9	CRT en ( ns) estimé pour différents mélanges gazeux. Les résultats ont été ajustés suivant une fonction polynomiale de degré deux. "sim." se réfère aux données issues des simulations et "exp." aux données expérimentales. . . . .	59
2.10	Schéma du principe d'une chambre d'ionisation avec une grille de Frisch (schéma issu de Knoll [3]). . . . .	61
2.11	Schéma de la chambre d'ionisation de SCALP vue de profil. La cathode est l'électrode en bleue, l'anode en orange. Les fils de cuivre du dégradeur de champ sont sur ce schéma parallèle à l'anode et à la cathode. La grille de Frisch est visible devant l'anode (par les petits points noirs). Les deux hublots visibles sont les fenêtres des photomultiplicateurs. . . . .	62
2.12	Schéma du fonctionnement d'un photomultiplicateur représentant les principaux composés : la fenêtre d'entrée (en jaune), la photo-cathode (en vert), les électrodes de focalisation (en gris), les dynodes (en noir) et l'anode (en rouge). Le flux de photon incident est représenté par la flèche noire et le flux d'électrons (photo-électrons) créés par les flèches oranges. . . . .	63
2.13	Efficacité quantique des photomultiplicateurs R2059 d'Hamamatsu. L'efficacité quantique est maximale pour des photons de longueur d'onde d'environ 400 nm (alors que le spectre des photons émis par la scintillation du $CF_4$ est compris entre 160 jusqu'au proche visible). . . . .	64
3.1	Organigramme représentant le programme de simulation utilisé avec toutes les options utilisées. A gauche, l'organigramme relatif à l'utilisation du générateur d'événements SCALPGENERATOR. A droite, l'organigramme relatif à l'utilisation du programme de simulation SICSIMULATION. Les paramètres en sortie de chaque fichier sont expliqués dans les parties 3.2 et 3.3. . . . .	68
3.2	Sections efficaces des réactions (n,p), (n,d), (n,t) et (n, $\alpha$ ) dont le seuil en énergie est en-dessous de 10 MeV, issues de la bibliothèque ENDF/B-VII.1 (excepté pour les réactions sur le $^{18}O$ où est utilisée la bibliothèque JEFF-3.2). Les courbes des sections efficaces des deux réactions d'intérêts, $^{19}F(n,\alpha)^{16}N$ et $^{16}O(n,\alpha)^{13}C$ , sont respectivement représentées en noir et en rouge. . . . .	73
3.3	Flux neutronique (pour un angle d'émission de $0^\circ$ ) estimé de l'installation NFS pour différentes distances entre le convertisseur (la source des neutrons) et le détecteur et pour différentes intensités moyennes du faisceau d'ions attendues. Le flux neutronique utilisé dans les simulations dans le projet SCALP est représenté en noir. . . . .	75
3.4	Schéma de la géométrie (coupe vue de profil) utilisée dans le programme SICSIMULATION pour simuler le dispositif expérimental. En gris les structures en inox 304 qui composent la chambre externe. La chambre d'ionisation, à l'intérieur, est composée de deux électrodes se faisant face (en bleu l'anode et en vert la cathode) et est délimité par les fils de cuivre (en orange) composant le dégradeur de champ), cette chambre a une grille de Frisch (en rouge). En noir la couronne composée de quatre photo-multiplicateurs centrée sur la chambre d'ionisation. Les flèches en pointillés précisent la direction et le sens des neutrons incidents. . . . .	78
3.5	Géométrie du projet SCALP par le programme SICSIMULATION à partir de GEANT4. Les structures (arêtes) des composants du dispositif expérimental sont en blanc. Le vertex de l'interaction est visible en rouge et les photons reçus par les photo-cathodes sont en vert. . . . .	79

3.6	Nombre de coups (par pas en énergie de 10 keV) pour chaque réaction dans du $\text{CF}_4$ pur, pour des neutrons d'énergie maximale de 10 MeV. . . . .	81
3.7	Nombre de coups (par pas en énergie de 10 keV) pour chaque réaction dans le mélange gazeux (97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ ), pour des neutrons d'énergie maximale de 10 MeV. . . . .	82
4.1	Valeurs moyennes des coordonnées $x_0$ en fonction de l'énergie du neutron incident. $x_0$ est une des coordonnées du vertex du point d'interaction pour les diverses réactions. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulées dans le $\text{CF}_4$ . Pour plus de clarté, les incertitudes ne sont pas représentées. . . . .	89
4.2	Valeurs moyennes des coordonnées $x_0$ en fonction de l'énergie déposée. $x_0$ est une des coordonnées du vertex du point d'interaction pour les diverses réactions. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulées dans le $\text{CF}_4$ . Pour plus de clarté, les incertitudes ne sont pas représentées. . . . .	90
4.3	Valeurs moyennes des coordonnées $y_0$ en fonction de l'énergie du neutron incident. $y_0$ est une des coordonnées du vertex du point d'interaction pour les diverses réactions. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulées dans le $\text{CF}_4$ . Pour plus de clarté, les incertitudes ne sont pas représentées. . . . .	91
4.4	Valeurs moyennes des coordonnées $y_0$ en fonction de l'énergie déposée. $y_0$ est une des coordonnées du vertex du point d'interaction pour les diverses réactions. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulées dans le $\text{CF}_4$ . Pour plus de clarté, les incertitudes ne sont pas représentées. . . . .	92
4.5	Valeurs moyennes des coordonnées $z_0$ en fonction de l'énergie du neutron incident. $z_0$ est une des coordonnées du vertex du point d'interaction ( $\vec{z}$ est la direction du faisceau des neutrons incidents) pour les diverses réactions. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulées dans le $\text{CF}_4$ . Pour plus de clarté, les incertitudes ne sont pas représentées. . . . .	93
4.6	Valeurs moyennes des coordonnées $z_0$ en fonction de l'énergie déposée. $z_0$ est une des coordonnées du vertex du point d'interaction ( $\vec{z}$ est la direction du faisceau des neutrons incidents) pour les diverses réactions. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulées dans le $\text{CF}_4$ . Pour plus de clarté, les incertitudes ne sont pas représentées. . . . .	94
4.7	Fraction d'événements bons (Nombre d'événements bons par rapport au nombre total d'événements simulés) en fonction de l'énergie cinétique des neutrons incidents pour les réactions simulées dans le $\text{CF}_4$ pur et dans le mélange gazeux composé de 97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ . . . . .	96

4.8	Fraction d'événements bons (Nombre d'événements bons par rapport aux nombre total d'événements simulés) en fonction de l'énergie déposée dans la chambre d'ionisation pour les réactions simulées dans le $\text{CF}_4$ pur et dans le mélange gazeux composé de 97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ . . . . .	97
4.9	Volume utile estimée en fonction de l'énergie du neutron incident. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulées dans le $\text{CF}_4$ . Pour plus de clarté, les incertitudes ne sont pas représentées. . . . .	99
4.10	Volume utile estimée en fonction de l'énergie déposée. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulées dans le $\text{CF}_4$ . Pour plus de clarté, les incertitudes ne sont pas représentées. . . . .	100
4.11	Nombre moyen de photo-électrons émis par photo-cathode par énergie du neutron incident. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulés dans le mélange gazeux (97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulés dans le $\text{CF}_4$ . Pour plus de clarté, les incertitudes ne sont pas représentées. . . . .	102
4.12	Nombre moyen de photo-électrons émis par photo-cathode en fonction de l'énergie déposée. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulés dans le $\text{CF}_4$ . Pour plus de clarté, les incertitudes ne sont pas représentées. . . . .	103
4.13	Nombre moyen de photo-électrons émis par photo-cathode par énergie du neutron incident, pour le photo-multiplicateur recevant le maximum de lumière. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulées dans le $\text{CF}_4$ . Pour plus de clarté, les incertitudes ne sont pas représentées. . . . .	104
4.14	Nombre moyen de photo-électrons émis par photo-cathode en fonction de l'énergie déposée, pour le photo-multiplicateur recevant le maximum de lumière. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulées dans le $\text{CF}_4$ . Pour plus de clarté, les incertitudes ne sont pas représentées. . . . .	105
4.15	Valeur moyenne des CRT (Coïncidence Resolving Time) estimée. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions dans le mélange gazeux (97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions dans le $\text{CF}_4$ . . . . .	107
4.16	Valeur moyenne des CRT (Coïncidence Resolving Time) estimée en fonction de l'énergie déposée. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulées dans le $\text{CF}_4$ . . . . .	108
4.17	Valeurs moyennes de l'énergie déposée pour chaque énergie du neutron incident. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulées dans le $\text{CF}_4$ . Les courbes en pointillées représentent les ajustements à partir d'une fonction polynomiale d'ordre 1 sur les valeurs expérimentales. . . . .	109

4.18	Valeurs moyennes du temps de vol estimé à partir des énergies des neutrons incidents. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulées dans le $\text{CF}_4$ . . . . .	111
4.19	Valeurs moyennes du temps de vol estimé à partir des énergies des neutrons incidents en fonction de l'énergie déposée. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulées dans le $\text{CF}_4$ . . . . .	112
4.20	Valeurs moyennes de l'énergie des particules émises (proton, deuton, triton, alpha) pour chaque énergie du neutron incident. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulées dans le $\text{CF}_4$ . . . . .	114
4.21	Valeurs moyennes de l'énergie des particules émises (proton, deuton, triton, alpha) en fonction de l'énergie déposée. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulées dans le $\text{CF}_4$ . . . . .	115
4.22	Valeurs moyennes de l'énergie des noyaux résiduels ( $^{19}\text{O}$ , $^{18}\text{O}$ , $^{17}\text{O}$ , $^{16}\text{N}$ , $^{13}\text{C}$ et $^9\text{Be}$ ) pour chaque énergie du neutron incident. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulées dans le $\text{CF}_4$ . . . . .	116
4.23	Valeurs moyennes de l'énergie des noyaux résiduels ( $^{19}\text{O}$ , $^{18}\text{O}$ , $^{17}\text{O}$ , $^{16}\text{N}$ , $^{13}\text{C}$ et $^9\text{Be}$ ) en fonction de l'énergie déposée. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulées dans le $\text{CF}_4$ . . . . .	117
4.24	Distribution de l'énergie cinétique du neutron incident (par intervalle d'énergie de 100 keV) pour le $\text{CF}_4$ (courbes en trait plein) et pour le mélange gazeux (97% $\text{CF}_4$ et 3% $\text{CO}_2$ ) (courbes en pointillés). En noir les courbes représentent l'énergie en fonction de $z_0$ et $t_0$ (équation 4.11) et en rouge l'énergie en fonction de $z_{moy}$ et $t_0 + t_{max}$ (équation 4.12). . . . .	119
4.25	Résolution relative en énergie du dispositif expérimental (en utilisant pour la détermination de l'énergie cinétique du neutron incident l'équation 4.12). La courbe rouge représente la résolution relative en énergie déterminée pour les événements simulés dans du $\text{CF}_4$ et la courbe noire pour le mélange composé de 97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ . . . . .	121
4.26	Efficacité lumineuse en fonction de l'énergie de neutron incident pour la réaction $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$ simulés dans du $\text{CF}_4$ . Les pointillées représentent les ajustements à partir des valeurs expérimentales en utilisant une fonction polynomiale de degré 9 (degré 6 pour la courbe $\langle npe \rangle > 30$ ). . . . .	122
4.27	Efficacité lumineuse en fonction de l'énergie de neutron incident pour les réactions $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$ (courbes en tirets fins) et $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ (courbes en tirets longs) dans le mélange gazeux (97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ ). Les pointillés représentent les ajustements à partir des valeurs expérimentales en utilisant une fonction polynomiale de degré 9 (ou moins dans certains cas). . . . .	123

---

4.28	Section efficace estimée à partir des résultats des simulations GEANT4 après normalisation à 8 MeV des réactions simulées dans du CF <sub>4</sub> : en noir la réaction $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$ , en bleu foncé la réaction $^{19}\text{F}(n,p)^{19}\text{O}$ et en bleu clair la réaction $^{12}\text{C}(n,\alpha)^9\text{Be}$ (qui n'est pas différenciée avec la réaction $^{19}\text{F}(n,d)^{18}\text{O}$ ). En pointillé, sont représentées les évaluations de ces trois réactions par ENDF/B-VII.1. . . . .	125
4.29	Section efficace estimée à partir des résultats des simulations GEANT4 après normalisation à 8 MeV dans le mélange gazeux (97% de CF <sub>4</sub> et 3% de CO <sub>2</sub> ) : en noir la réaction $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$ , en rouge la réaction $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ , en bleu foncé la réaction $^{19}\text{F}(n,p)^{19}\text{O}$ et en bleu clair la réaction $^{12}\text{C}(n,\alpha)^9\text{Be}$ (qui n'est pas différenciée avec la réaction $^{19}\text{F}(n,d)^{18}\text{O}$ ). En pointillé, sont représentées les évaluations de ces quatre réactions par ENDF/B-VII.1. . . . .	126
4.30	Section efficace estimée des réactions simulées dans le CF <sub>4</sub> pur et les incertitudes associées. En pointillé, sont représentées les évaluations de ces trois réactions par ENDF/B-VII.1 (déterminées pour les mêmes intervalles en énergie). . . . .	128
4.31	Section efficace estimée des réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de CF <sub>4</sub> et 3% de CO <sub>2</sub> ) et les incertitudes associées. En pointillé, sont représentées les évaluations de ces trois réactions par ENDF/B-VII.1 (déterminées pour les mêmes intervalles en énergie). . . . .	129
A.1	Schéma des principaux états excités du $^{16}\text{O}$ et des photons $\gamma$ émis lors de la désexcitation. . . . .	141



# Liste des tableaux

1.1	Principales réactions $n+^{16}\text{O}$ représentées sur la figure 1.1. Les états excités des noyaux résidus, pour les réactions dont le seuil est inférieur à 10 MeV, sont également listés (les énergies des états excités et les masses proviennent du site internet de la NEA [4]). Les bilans énergétiques et les seuils ont été calculés suivant les formules décrites en 1.2.1.1. . . . . .	15
1.2	Liste des expériences de mesure de la section efficace de la réaction $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ triées par rapport au détecteur utilisé. La catégorie "CI" se réfère aux expériences utilisant une chambre d'ionisation tandis que la catégorie "AUTRE" regroupe les expériences où d'autres types de détecteurs sont utilisés (chambre à brouillard, compteurs proportionnels, . . .). . . . . .	25
1.3	Liste des expériences réalisées sur la section efficace de la réaction $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$ . . . . . .	27
1.4	Principales réactions $n+^{19}\text{F}$ . Seul le premier état excité (109,894 keV [4]), pour les réactions inélastiques $^{19}\text{F}(n,n')^{19}\text{F}^*$ , est listé. . . . . .	31
1.5	Liste des expériences de mesure de la section efficace de la réaction $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$ triées par rapport au détecteur utilisé. La catégorie "CI" se réfère aux expériences utilisant une chambre d'ionisation tandis que la catégorie "AUTRE" regroupe les expériences où d'autres types de détecteurs sont utilisés (chambre à brouillard, compteurs proportionnels, . . .). . . . . .	36
2.1	Rendement de scintillation et temps de décroissance du signal utilisés par le programme SICSIMULATION pour différentes proportions de gaz désactivateur. . . . . .	56
3.1	Masse des noyaux utilisé par SCALPGENERATOR dans les conditions standards de température et de pression. . . . . .	70
3.2	Masse molaire et masse volumique des gaz simulés utilisés par SCALPGENERATOR dans les conditions standards de température et de pression (25 °C et 1 bar). La ligne "Mélange" symbolise un mélange composé de 97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ . . . . . .	70
3.3	Nombre d'atomes ou d'isotopes en moyenne par molécule et pourcentage associé, dans les conditions standards de température et de pression (25 °C et 1 bar). . . . . .	71
3.4	Concentrations et compositions des noyaux dans le mélange de gaz. . . . . .	71
3.5	Bilan et seuil des réactions prenant place dans les simulations (dans le sens des seuils en énergie croissant). . . . . .	72
3.6	Nombre d'événements (et pourcentage) par réaction simulée dans les deux gaz d'études, pour des neutrons d'énergie maximale de 10 MeV. . . . . .	80
3.7	Temps d'acquisition estimés pour avoir la statistique requise pour atteindre 1% d'erreurs statistiques. Ces estimations sont faites pour les réactions $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$ (en seconde) et $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ (en heure) pour avoir 10 000 événements à une énergie de neutrons de 5,51 MeV. . . . . .	83

3.8	Valeurs moyennes du nombre moyen de photo-électrons $\langle npe \rangle$ et du CRT (Coincidence Resoving Time) pour la réaction $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$ dans le mélange composé de 97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ . . . . .	84
3.9	Valeurs moyennes du nombre moyen de photo-électrons $\langle npe \rangle$ et du CRT (Coincidence Resoving Time) pour la réaction $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ dans le mélange composé de 97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ . . . . .	84
4.1	Constantes déterminées à partir de l'ajustement polynomial d'ordre 1 pour les réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ ). . . . .	110
4.2	Caractéristiques des deux gaz étudiés ( $\text{CF}_4$ et le mélange composé de 97% $\text{CF}_4$ et 3% $\text{CO}_2$ ) pour les deux réactions $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$ et $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ . . . . .	131
4.3	Flux de neutron incident en ( $\text{neutrons.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) pour des neutrons de 5, 51 MeV en fonction de la distance entre le convertisseur et le détecteur et en fonction de l'intensité moyenne du faisceau d'ions. . . . .	132
4.4	Temps de manipulation estimé en heure et en temps UT (1 UT = 8 h) pour avoir 10 000 événements à 5, 51 MeV sur la réaction $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ pour les bibliothèques ENDF/B-VII.1 et ENDF/B-VIII.B3, pour plusieurs intensités moyennes du faisceau d'ions et pour plusieurs distances entre le convertisseur et le détecteur. . . . .	133
4.5	Temps de manipulation estimé en seconde pour avoir 10 000 événements à 5, 51 MeV sur la réaction $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$ sur les deux gaz de réaction, pour plusieurs intensités moyennes du faisceau d'ions et pour plusieurs distances entre le convertisseur et le détecteur. . . . .	134
A.1	États excités du noyau $^{20}\text{F}$ . . . . .	142
A.2	États excités du noyau $^{19}\text{F}$ . . . . .	143
B.1	Nombre moyen de photo-électrons pour chaque mélange gazeux étudié. La colonne "Pression" se réfère à la pression absolue du gaz minoritaire ( $\text{He}$ et $\text{CO}_2$ ). . . . .	145
B.2	Ajustement des courbes présentées dans les figures 2.7 et 2.8 à partir d'une fonction de la forme $y = \frac{[0]}{1+[1].x}$ , où [0] et [1] correspondent respectivement à $\langle npe_0 \rangle$ et $K$ (voir l'équation 2.1). Les valeurs du $\chi^2/ndf$ ne sont déterminées que pour les valeurs issues des simulations. . . . .	146
B.3	Constantes physiques utilisées par le programme SICSIMULATION pour chaque mélange gazeux. . . . .	146
B.4	Constantes physiques utilisées par le programme SICSIMULATION pour chaque mélange gazeux. . . . .	147
B.5	Estimation des valeurs du nombre moyen de photo-électron (par le modèle de Stern-Volmer) pour différentes fraction de gaz désactivateur pour les deux gaz étudiés, à partir des données expérimentales (colonnes "EXP") et à partir des données issues des simulations (colonnes "SIM"). Les colonnes "écart" indiquent les écarts en pourcentage entre les estimations faites à partir des données expérimentales et les estimations faites à partir des données issues des simulations. . . . .	147
B.6	Ajustement des courbes présentées dans la figure 2.9 avec une fonction polynomial de degré 2 de la forme $y = [0] + [1]x + [2]x^2$ . . . . .	148
C.1	Valeurs moyennes des coordonnées $x_0$ pour les réactions simulés dans le $\text{CF}_4$ pur. . . . .	150

---

C.2	Valeurs moyennes des coordonnées $x_0$ pour les réactions simulés dans le mélange gazeux (97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ ). . . . .	151
C.3	Valeurs moyennes des coordonnées $y_0$ pour les réactions simulés dans le $\text{CF}_4$ pur. . . . .	152
C.4	Valeurs moyennes des coordonnées $y_0$ pour les réactions simulés dans le mélange gazeux (97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ ). . . . .	153
C.5	Valeurs moyennes des coordonnées $z_0$ pour les réactions simulés dans le $\text{CF}_4$ pur. . . . .	154
C.6	Valeurs moyennes des coordonnées $z_0$ pour les réactions simulés dans le mélange gazeux (97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ ). . . . .	155
C.7	Pourcentage d'événements considérés comme bons pour les réactions simulés dans le $\text{CF}_4$ pur. . . . .	156
C.8	Pourcentage d'événements considérés comme bons pour les réactions simulés dans le mélange gazeux (97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ ). . . . .	157
C.9	Longueur utile pour les réactions simulés dans le $\text{CF}_4$ pur. . . . .	158
C.10	Longueur utile pour les réactions simulés dans le mélange gazeux (97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ ). . . . .	159
C.11	Volume utile pour les réactions simulés dans le $\text{CF}_4$ pur. . . . .	160
C.12	Volume utile pour les réactions simulés dans le mélange gazeux (97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ ). . . . .	161
C.13	Nombre moyen de photo-électrons pour les réactions simulés dans le $\text{CF}_4$ pur. . . . .	162
C.14	Nombre moyen de photo-électrons pour les réactions simulés dans le mélange gazeux (97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ ). . . . .	163
C.15	Nombre moyen de photo-électrons (pour le photo-multiplicateur recevant le plus de lumières) pour les réactions simulés dans le $\text{CF}_4$ pur. . . . .	164
C.16	Nombre moyen de photo-électrons (pour le photo-multiplicateur recevant le plus de lumières) pour les réactions simulés dans le mélange gazeux (97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ ). . . . .	165
C.17	Valeur moyenne des CRT (Coïncidence Resolving Time) pour les réactions simulés dans le $\text{CF}_4$ pur. . . . .	166
C.18	Valeur moyenne des CRT (Coïncidence Resolving Time) pour les réactions simulés dans le mélange gazeux (97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ ). . . . .	167
C.19	Énergie déposée dans le volume utile pour les réactions simulés dans le $\text{CF}_4$ pur. . . . .	168
C.20	Énergie déposée dans le volume utile pour les réactions simulés dans le mélange gazeux (97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ ). . . . .	169
C.21	Temps de vol estimé pour les réactions simulés dans le $\text{CF}_4$ pur. . . . .	170
C.22	Temps de vol estimé pour les réactions simulés dans le mélange gazeux (97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ ). . . . .	171
C.23	Énergie des particules émises (proton, deuton, triton, alpha) pour les réactions simulés dans le $\text{CF}_4$ pur. . . . .	172
C.24	Énergie des particules émises (proton, deuton, triton, alpha) pour les réactions simulés dans le mélange gazeux (97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ ). . . . .	173
C.25	Énergie du noyau résiduel pour les réactions simulés dans le $\text{CF}_4$ pur. . . . .	174
C.26	Énergie du noyau résiduel pour les réactions simulés dans le mélange gazeux (97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ ). . . . .	175

---

---

C.27	Résolution relative en énergie du dispositif expérimental (en utilisant pour la détermination de l'énergie cinétique du neutron incident l'équation 4.12) pour les événements simulés dans le $\text{CF}_4$ . $\sigma$ est l'écart-type de la distribution des différences entre les énergies déterminées par les équations 4.11 et 4.12, $FWHM$ la largeur à mi-hauteur, et $\frac{\Delta(E)}{E}$ la résolution relative estimée.	176
C.28	Résolution relative en énergie du dispositif expérimental (en utilisant pour la détermination de l'énergie cinétique du neutron incident l'équation 4.12) pour les événements simulés dans le mélange gazeux composé de 97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ . $\sigma$ est l'écart-type de la distribution des différences entre les énergies déterminées par les équations 4.11 et 4.12, $FWHM$ la largeur à mi-hauteur, et $\frac{\Delta(E)}{E}$ la résolution relative estimée. . . . .	177
C.29	Paramètres des ajustements des courbes d'efficacité lumineuse (réaction $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$ dans le $\text{CF}_4$ ) par une fonction polynomiale de la forme : $[0] + [1]x + [2]x^2 + [3]x^3 + [4]x^4 + [5]x^5 + [6]x^6 + [7]x^7 + [8]x^8 + [9]x^9$ . . . . .	178
C.30	Paramètres des ajustements des courbes d'efficacité lumineuse (réaction $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$ et $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ dans le mélange gazeux composé de 97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ ) par une fonction polynomiale de la forme : $[0] + [1]x + [2]x^2 + [3]x^3 + [4]x^4 + [5]x^5 + [6]x^6 + [7]x^7 + [8]x^8 + [9]x^9$ . . . . .	179
C.31	Section efficace estimée (par intervalle d'énergie de 100 keV) de la réaction $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$ dans le $\text{CF}_4$ pur. $E$ est l'énergie du neutron incident, et $\sigma$ la section efficace. . . . .	180
C.32	Section efficace estimée (par intervalle d'énergie de 100 keV) de la réaction $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$ dans le mélange gazeux composé de 97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ . $E$ est l'énergie du neutron incident, et $\sigma$ la section efficace. . . . .	181
C.33	Section efficace estimée (par intervalle d'énergie de 100 keV) de la réaction $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ dans le mélange gazeux composé de 97% de $\text{CF}_4$ et 3% de $\text{CO}_2$ . $E$ est l'énergie du neutron incident, et $\sigma$ la section efficace. . . . .	182

# Liste des acronymes et définitions utilisés dans ce manuscrit

BNL	Brookhaven National Laboratory
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
CIELO	Collaborative International Evaluated Library Organisation
EAMEA	École des Applications Militaires de l'Énergie Atomique
EXFOR	Experimental Nuclear Reaction Data
GANIL	Grand Accélérateur National d'Ions Lourds
HPRL	High Priority Request List
IAEA	Nuclear Data Section et International Atomic Energy Agency (aussi connue en France sous le nom de l'AIEA, l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique, basée à Vienne en Autriche)
LANL	Los Alamos National Laboratory
LPC	Laboratoire de Physique Corpusculaire
NDS	Nuclear Data Section
NFS	Neutrons For Science
NEA	Nuclear Energy Agency (aussi connue en France sous le nom de l'AEN, l'Agence pour l'Énergie Nucléaire, basée à Paris)
NNDC	National Nuclear Data Center
NRDC	international network of Nuclear Reaction Data Centres
REP	Réacteur à eau pressurisée
REB	Réacteur à eau bouillante
SCALP	Scintillating ionization Chamber for ALpha particle Production in neutron induced reactions
SG	Subgroup (Sous-groupe de la WPEC)
SPIRAL2	Système de Production d'Ions RadioActifs en Ligne de 2ème génération
WPEC	Working Party on international nuclear data Evaluation Co-operation



# Introduction générale

Depuis la découverte du neutron par James Chadwick en 1932 et le progrès de la physique nucléaire qui s'en est suivi, la multiplication des données nucléaires (et l'amélioration de leurs précisions) est une des thématiques de recherche importante dans ce domaine. En effet les calculs scientifiques ou les simulations, ou par exemple les évaluations, se basent sur ces données.

Des efforts internationaux sont faits dans le monde pour compléter et préciser ces données, par exemple avec le développement de grands projets dans la recherche scientifique ou par l'utilisation (ou la construction) d'installations nucléaires ou de centres de recherche. Ces efforts ont pour but de rendre plus fiables ou plus précises ces données. Plus les bases de données sont fiables et plus les résultats obtenus par les calculs sont fiables.

Derrière le titre "*Mesure de la section efficace de production d'hélium par réaction induite d'un neutron sur un noyau d'oxygène du seuil à 20 MeV*" de ce manuscrit se dissimule un sujet de recherche en physique expérimental complexe. Cette thèse s'englobe dans une perspective d'amélioration des données nucléaires, principalement dans la physique associée aux réacteurs nucléaires.

La *mesure de la section efficace* d'une réaction nucléaire a fait l'objet de multiples recherches, depuis l'avènement et le développement de la physique nucléaire entre les deux dernières guerres mondiales. La probabilité qu'une particule (incidente) fasse une réaction nucléaire (donnée) sur un noyau (cible) est exprimée par la section efficace. Cette probabilité d'interaction a pour dimension une surface, et elle est d'un intérêt important pour les physiciens, surtout en neutronique. Les mesures précises de sections efficaces ont donc été des sujets de recherches très étudiés en physique nucléaire, en particulier concernant la fission nucléaire (processus à la base du fonctionnement des réacteurs nucléaires utilisés pour la production d'électricité, notamment en France). Elles ont pour but l'amélioration des données nucléaires qui seront ensuite utilisées par les chercheurs et les ingénieurs du monde entier.

Le *neutron* est une particule de charge électrique nulle. Cette particule forme avec le proton (particule similaire de charge positive non nulle) un des composants du noyau atomique. Les neutrons prennent part entièrement dans la fission nucléaire. N'ayant pas de charges électriques, la détection de ces particules est difficile. Elle se base en effet sur la détection des réactions nucléaires provoquées par le neutron incident sur un noyau cible.

L'*oxygène* est un composant essentiel dans les combustibles nucléaires : ils sont en effet majoritairement composé d'oxydes d'uranium ( $\text{UO}_2$ ) ou de mélanges à partir d'oxydes d'uranium MOX ( $\text{PuO}_2/\text{UO}_2$ ).

---

La *production d'hélium* à l'intérieur d'une gaine de combustible au sein même d'un réacteur nucléaire est problématique. L'hélium étant un gaz léger, les atomes de gaz émis se congolent et exercent ainsi des contraintes (minimes mais réelles) sur ces gaines. L'oxygène est également présent dans l'eau utilisé comme modérateur et comme caloporteur par les réacteurs nucléaires à eau légère et à eau lourde. Dans ces systèmes, l'oxygène a une influence sur le facteur de multiplication effectif<sup>1</sup> ( $k_{\text{eff}}$ ).

Les *réactions induites par neutron sur un noyau d'oxygène* sont donc importantes en physique nucléaire. La production de noyaux d'hélium (ou de particules alpha), au sein même du combustible nucléaire, provient entre autre de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  : le neutron incident interagit avec un noyau d'oxygène  $^{16}\text{O}$  (l'isotope de l'oxygène le plus présent) pour former une particule  $\alpha$  (équivalent à un noyau d'hélium) et un noyau résiduel (en l'occurrence le carbone  $^{13}\text{C}$ ). La section efficace de cette réaction a été estimée plusieurs fois depuis le milieu du XXème siècle. Mais l'incertitude relative, estimée à partir des écarts observés entre les différentes mesures expérimentales disponibles, est d'au maximum à 30%. Cet écart implique par conséquent un écart non-négligeable sur la production d'hélium à l'intérieur des gaines de combustibles.

La section efficace peut être représentée en fonction de l'énergie cinétique de la particule incidente : on parle dans ce cas de fonction d'excitation. La section efficace est très faible lorsque l'énergie de la particule est proche du seuil de la réaction (énergie minimale que la particule incidente doit avoir pour que la réaction nucléaire identifiée puisse avoir lieu). Le seuil de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  est de 2,36 MeV. Les énergies des neutrons dans un réacteur nucléaire sont de l'ordre de quelques MeV. Les erreurs sur la section efficace de cette réaction sont maximales dans une gamme en énergie comprise entre 6 et 8 MeV. Les fonctions d'excitation disponibles dans les évaluations de données nucléaires sont comprises entre le seuil des réactions et 20 à 30 MeV. Dans ce projet, la gamme en énergie étudiée sera comprise entre le seuil de la réaction d'intérêt et 10 MeV, car c'est sur cette gamme que l'impact sur le  $k_{\text{eff}}$  est maximal et que la production d'hélium est la plus importante à cette énergie.

Pour mener à bien l'étude de la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  entre le seuil et 10 MeV, le laboratoire LPC (Laboratoire de Physique Corpusculaire), basé à Caen en Normandie, a mis en place un projet de recherche appelé SCALP (acronyme de l'anglais "*Scintillating ionization Chamber for ALPha particle production in neutron induced reaction*"). Ce projet a débuté en 2014 par cette thèse. Ce projet est issu d'un partenariat entre le LPC et l'EAMEA (École des Applications Militaires de l'Énergie Atomique), école de la Marine nationale basée à Cherbourg-en-Cotentin. Les tests et essais seront menés auprès de la ligne PEREN à Grenoble (avec antérieurement des tests en laboratoire à l'EAMEA auprès d'une source de neutrons) et les mesures expérimentales auprès de la ligne de neutrons NFS (Neutrons For Science) (sur l'installation SPIRAL-2 auprès du GANIL à Caen).

La thèse présentée dans ce manuscrit concerne l'aspect "Recherche et Développement" préliminaire au projet SCALP. Cela concerne des tests en laboratoire sur l'étude des propriétés scintillantes des mélanges de gaz, et de l'utilisation d'un programme de scintillation dont l'un des composants est GEANT4 (permettant de simuler le passage d'une particule dans la matière avec la méthode de Monte Carlo). Ces simulations sont menées dans le

---

1. Ce facteur est le rapport du nombre de neutrons produits dans un milieu sur le nombre de neutrons perdus dans ce même milieu (par absorption et par fuite).

---

but de déterminer la meilleure géométrie possible du dispositif expérimental pour permettre d'avoir de les performances optimales pour mener des mesures expérimentales sur un temps de mesure correct. Elles permettent aussi de voir la dégradation de la détermination de l'énergie cinétique des neutrons, et donc d'estimer les erreurs intrinsèques sur la mesure de la section efficace attendue.

Ce manuscrit s'articule autour de quatre chapitres :

- Le premier chapitre introduit au lecteur le but des recherches développées dans ce manuscrit et le contexte scientifique dans lequel elles prennent forme.
- Le second chapitre développe le projet SCALP, ainsi que des tests en laboratoire concernant la composition idéale du mélange gazeux utilisé pour ces études.
- Le troisième chapitre introduit au lecteur le programme de simulations utilisé dans ce projet.
- Enfin le quatrième chapitre développe les résultats des simulations et les performances attendues du dispositif expérimental.



# Chapitre 1

## Le contexte scientifique

*Ce chapitre a pour but d'introduire le lecteur dans la thématique du projet SCALP<sup>1</sup>. Au long des paragraphes de ce chapitre sera présenté un panorama étendu sur les motivations et l'état de l'art actuel pour les réactions d'intérêt pour guider le lecteur vers une compréhension globale du projet développé par la suite.*

L'étude des réactions nucléaires induites par des neutrons a commencé à partir du milieu du XXème siècle, à la suite de la preuve de son existence par James Chadwick en 1932 [5]. Ces expériences ont suivi la prédiction de son collègue de l'université de Cambridge Ernest Rutherford en 1920 [6] sur l'hypothèse de l'existence du neutron et des expériences réalisées ultérieurement par Walter Bothe et Herbert Becker en 1930 [7]. James Chadwick a reçu le prix Nobel de Physique en 1935 "*pour la découverte du neutron*" [8]. Suite à cette découverte, l'intérêt de ces études a été accru dans la course à l'énergie et à la fission nucléaire dans l'époque précédant la seconde guerre mondiale [9].

La mesure de la section efficace pour les réactions induites par neutron a reçu une grande attention depuis le projet Manhattan [10]. Cet intérêt a augmenté car la connaissance des sections efficaces des réactions induites par neutron concerne aussi bien la physique des réacteurs que la physique nucléaire [11]. La structure des niveaux du noyau atomique est à la base des résonances dans la section efficace, si importante pour le contrôle commande des réacteurs.

### 1.1 Les problématiques des sections efficaces d'intérêt pour la physique des réacteurs

La NEA (Nuclear Energy Agency) est une organisation intergouvernementale de l'OCDE<sup>2</sup>. Cette agence a instauré, en collaboration avec la NDS de l'IAEA<sup>3</sup>, des sous-groupes de travail formés par des physiciens nucléaires et des laboratoires de recherche : les WPEC (Working Party on international nuclear data Evaluation Co-operation) [12]. Ces groupes de travail, s'occupant de thématiques bien précises (physique des réacteurs, astrophysique, ...), établissent les besoins en expériences, en évaluations, en calculs et en modèles, dans leur domaine de connaissance.

---

1. Scintillating ionization Chamber for **AL**pha particle **P**roduction in neutron induced reactions

2. Organisation de Coopération et de Développement Économiques, qui regroupe 35 pays.

3. Respectivement Nuclear Data Section et International Atomic Energy Agency (l'AIEA, l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique), basée à Vienne en Autriche.

Ils publient ensuite un rapport contenant les directives de travail pour les futures recherches scientifiques. Sur la base de ces études, la NEA publie une liste prioritaire des thèmes de recherche sur lequel doivent être concentré les efforts de recherche. La HPRL (High Priority Request List [13]) a été publiée au début des années 1980 par la NEA. Cette liste, produite par deux comités appartenant à la NEA spécialisés dans la physique des réacteurs et dans les données nucléaires<sup>4</sup>, oriente ou influence les travaux de recherches en physique nucléaire sur l'étude de certaines réactions nucléaires importantes, dans des buts applicatifs ou théoriques pour l'avancement des travaux de recherche.

En 2005, la NEA a remis à jour une nouvelle liste de requêtes. Ces demandes en études concernent uniquement les sections efficaces sur les réactions en physique nucléaire dont les mesures expérimentales sont en nombre insuffisant pour avoir des évaluations de données nucléaires fiables [14]. Cette liste s'est étoffée au fil des années et contient aujourd'hui 37 requêtes [15], concernant des études sur des noyaux ou des réactions nucléaires présents dans la physique des réacteurs (produits de fission, combustible, matériaux de structure, ...). Au total il y a eu 42 sous-groupes (SG), dont la grande majorité ne sont plus en activité et ont publié leur rapport définitif. Trois de ces sous-groupes sont impliqués dans l'étude de la physique des réacteurs nucléaires : les sous-groupes SG22, SG26 et SG40 (ce sont les sous-groupes les plus "pertinents" dans le cadre de cette étude). Ces sous-groupes se basent sur les requêtes de la HPRL.

En particulier, le sous-groupe SG22 a publié un rapport en 2006 intitulé "*Nuclear Data for improved LEU-LWR reactivity predictions*" [16], concernant les réacteurs à eau légère utilisant de l'uranium faiblement enrichi. Il s'est avéré que le facteur de multiplication effectif ( $k_{\text{eff}}$ ) des réacteurs à eau légère était systématiquement sous-estimé. Un accent est donc mis dans ce rapport sur les discordances entre les évaluations des modèles de données nucléaires. Le rapport cible également les noyaux ou molécules dont l'influence sur l'estimation du  $k_{\text{eff}}$  est avéré : le  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{16}\text{O}$  et  $\text{H}_2\text{O}$ .

Le rapport "*Uncertainty and Target Accuracy Assessment for Innovative Systems Using Recent Covariance Data Evaluations*" [17], publié en 2008 par le sous-groupe SG26, liste les besoins de données nucléaires pour les réacteurs de nouvelles générations<sup>5</sup>. Il met en exergue les influences des incertitudes des sections efficaces de réactions nucléaires induites par les neutrons sur les paramètres liés au cœur d'un réacteur nucléaire et sur le combustible nucléaire. Le but de ce rapport est, entre autre, de comparer différents types de réacteur, avec différentes sortes de combustibles basés sur des oxydes d'uranium, différents caloporteurs et modérateurs.

---

4. Respectivement le NEACRP (NEA Committee on Reactor Physics) et le NEANDC (NEA Nuclear Data Committee). Ces deux comités ont donné naissance au NSC (Nuclear Science Committee) en 1992.

5. Selon le Forum International Génération-IV (GIF) en 2001 [18], les réacteurs nucléaires expérimentaux ou industriels construits avant 1970 sont qualifiés comme faisant partie de la première génération. La deuxième génération représente les types de réacteurs nucléaires construits entre 1970 et 2000 (soit en France les 58 réacteurs à eau pressurisée). La troisième génération concerne les réacteurs nucléaires construits à partir des années 2000 (comme l'EPR en construction à la centrale de Flamanville, en Normandie). La quatrième génération concerne les réacteurs qui seront construits à l'horizon 2030 et prendront en compte plusieurs améliorations sur la sûreté nucléaire ou sur les déchets par exemple. Les six filières de réacteurs nucléaires sélectionnées par le GIF comme faisant partie de la quatrième génération sont les réacteurs nucléaires à haute température, à eau supercritique, à sels fondus et les réacteurs à neutrons rapides (à caloporteur gaz, plomb et sodium).

Le sous-groupe SG40 a été créé en 2013 [19]. Il s’agit du projet CIELO (pour Collaborative International Evaluated Library Organisation) co-ordonné par M. Chadwick du LANL (Los Alamos National Laboratory). L’ambition du projet CIELO est d’améliorer les évaluations sur les données nucléaires en particulier pour les systèmes utilisant la fission ou la fusion nucléaire. Il est nécessaire d’augmenter la précision des mesures effectuées afin de réduire les erreurs qui entachent les données acquises jusqu’à présent. Les isotopes concernés par le projet CIELO sont le  $^1\text{H}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{56}\text{Fe}$ , le  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  et le  $^{239}\text{Pu}$ . Pour ces noyaux, les différences entre les évaluations et les expériences sont importantes. Le rapport dans *Nuclear Data Sheets* du projet CIELO [20], publié en 2013, énumère plus précisément les problèmes. En insistant sur les qualités des bibliothèques des évaluations nucléaires, ce rapport souligne que les écarts entre les bases de données se répercutent sur les estimations des paramètres physiques étudiés.

### 1.1.1 L’importance et influence de l’oxygène dans la physique des réacteurs

Le projet SCALP, comme il sera développé par la suite, est voué à la mesure de la section efficace des réactions induites par neutron sur l’oxygène présent dans le milieu caloporteur des réacteurs nucléaires à eau légère ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ou lourde ( $\text{D}_2\text{O}$ ), ou dans les réacteurs nucléaires utilisant du gaz ( $\text{CO}_2$ ). Dans le milieu modérateur, il est présent dans les réacteurs nucléaires à eau pour thermaliser les neutrons [21, 22]. Enfin, l’oxygène est également présent dans les combustibles sous forme d’oxyde : dioxyde d’uranium ( $\text{UO}_2$ ) dans les pastilles des combustibles d’uranium, mélange de dioxyde d’uranium et de dioxyde de plutonium pour les combustibles MOx (mélange de  $\text{UO}_2$  et de  $\text{PuO}_2$ ) [23]. L’oxygène peut être aussi présent dans la composition de l’alliage des gaines de combustible, mais en quantité négligeable (de l’ordre de 1 100 à 1 400 ppm) [24].

Il est important de noter que les réacteurs contenant de l’oxygène (réacteurs utilisant de l’eau comme modérateur et/ou comme caloporteur, et de l’uranium sous forme oxydé) sont les plus utilisés dans le monde. En effet les réacteurs à eau légère (comme les REP et les REB, respectivement les réacteurs à eau pressurisée [21] et à eau bouillante [22]) représentent plus des trois quarts des réacteurs nucléaires en fonctionnement dans le monde [25]. Actuellement, les réacteurs nucléaires utilisés pour la production d’électricité civile ou pour la propulsion nucléaire navale militaire [26] en France sont tous des REP.

### 1.1.2 L’influence de la production d’hélium à partir de l’oxygène sur les paramètres physiques des réacteurs et les produits induits

Les réactions induites par les neutrons sur l’oxygène ont une grande importance dans le domaine de la physique des réacteurs ainsi que dans l’astrophysique. En effet, une des principales réactions (hormis les réactions élastiques et inélastiques) est la réaction  $(n,\alpha)$ , c’est-à-dire la production d’une particule  $\alpha$  (un noyau d’hélium) après interaction entre un neutron et un noyau d’oxygène ( $^{16}\text{O}$ ). L’hélium ainsi produit fragilise les gaines de combustible et induit des fluctuations sur un des paramètres importants pour les réacteurs, le  $k_{\text{eff}}$  (facteur de multiplication effectif des neutrons), à la base de la sûreté des contrôles-commandes.

Une des premières requêtes de l'HPRL concernait l'étude de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ . Cette requête se base sur le document de travail d'A. Courcelle du CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) de juillet 2005 [27] et du sous-groupe SG22 [16]. Dans ce document, est souligné l'intérêt de connaître la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  avec précision (mieux que 5%) pour une meilleure détermination des paramètres physiques associés aux réacteurs nucléaires et définit dans le cadre de la physique des réacteurs. L'objectif de cette requête est, entre autre, d'améliorer les estimations du facteur  $k_{\text{eff}}$  des réacteurs nucléaires (à neutrons thermiques et à neutrons rapides) et de quantifier la production d'hélium au sein du combustible nucléaire.

A. Courcelle constate que, sur la gamme en énergie entre le seuil de la réaction (2,36 MeV) et 8 MeV, **la section efficace est estimée avec une erreur qui peut atteindre 30%** (due à la dispersion des données expérimentales). Partant de ce constat, il soutient que ces écarts sur la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  ont une influence sur l'estimation du  $k_{\text{eff}}$  et sur la production totale d'hélium au sein du combustible nucléaire. Les incertitudes sur les sections efficaces sont estimées à :

- 100 pcm sur l'incertitude totale de l'estimation du  $k_{\text{eff}}$
- 7% sur l'incertitude sur la production totale d'hélium

A. Courcelle et le SG22 [16] ont rappelé également que la mesure de la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  avec précision est primordiale du fait de la présence de l'oxygène dans le combustible nucléaire et dans l'eau. Pour des neutrons proches du seuil en énergie, la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  a été majoritairement déterminée en utilisant le principe de la balance détaillée. Cette méthode permet à partir de la réaction inverse ( $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$ ) de déterminer la section efficace de la réaction directe, mais cette méthode est valable seulement si le noyau résiduel est dans son état fondamental.

Le travail du SG26 [17] a démontré l'influence de l'oxygène sur certains paramètres physiques de réacteurs nucléaires, principalement sur les systèmes utilisant l'eau comme modérateur et caloporteur (cas des réacteurs REP). L'influence de l'oxygène sur le  $k_{\text{eff}}$  augmente entre le début et la fin du cycle. Dans ce dernier cas, il s'agit d'un des isotopes qui influe le plus sur la détermination de ce facteur. L'effet de l'isotope  $^{16}\text{O}$  est également montré sur le réacteur étudié à neutrons rapides utilisant du combustible uranium. Ce rapport conclut, pour la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ , que son effet est le plus important sur les réacteurs à eau pressurisée (soit la majorité des réacteurs nucléaires en exploitation dans le monde, et plus précisément en France). M. Chadwick a rappelé en 2013 dans le cadre du projet CIELO [20] que les écarts de 30% entre les évaluations et les données expérimentales ont, depuis longtemps, été un problème. Les réactions  $(n,\alpha)$  affectent la criticité. De nouvelles évaluations sur les réactions  $(n,\alpha)$  sont donc nécessaires pour lever cette ambiguïté.

## 1.2 La production des particules alpha dans les réactions induites par neutron

Les réactions  $(n,\alpha)$  sont des réactions importantes en physique nucléaire. Les noyaux d'hélium émis sont, parmi toutes les particules émises dans un processus nucléaire, les plus lourdes : un ensemble de quatre nucléons est émis.

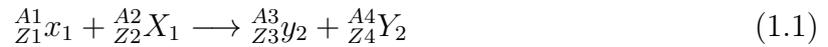
Leurs parcours dans la matière varie, aux énergies impliquées, selon le matériau, de quelques micromètres à quelques millimètres.

*Dans la suite de cette étude, la description écrite dans ce chapitre ne concerne que les particules non-relativiste. Toutes les particules considérées dans cette étude (neutron, alpha, ...) ont une énergie d'au maximum 10 MeV, soit une vitesse inférieure au dixième de la vitesse de la lumière.*

## 1.2.1 Cinématique des réactions ( $n, \alpha$ )

### 1.2.1.1 Théorie générale

En cinématique directe à deux corps, la réaction  $X_1(x_1, y_2)Y_2$  représente la réaction



où  $x_1$  est la particule incidente (ayant une énergie au repos et une énergie cinétique) qui interagit avec le noyau  $X_1$  au repos (pas d'énergie cinétique). Dans le cas où la cinématique est à deux corps, une particule  $y_2$  est émise en plus du noyau résiduel  $Y_2$ . Du fait de la différence de masse entre les deux noyaux, la particule émise emporte la plus grande quantité de l'énergie cinétique mise en jeu dans la réaction. Le noyau résidu recule et peut rester dans son état fondamental ou dans l'un de ses états excités.

Dans l'équation (1.1)  $A_i$  et  $Z_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) sont respectivement le nombre de masse (i.e. le nombre des nucléons du noyau considéré, soit le nombre de protons et le nombre de neutrons) et le numéro atomique (le nombre des protons) :

$$A_1 + A_2 = A_3 + A_4 \quad (1.2)$$

$$Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4 \quad (1.3)$$

Une des lois fondamentales en physique est la loi de la conservation de l'énergie totale [28]. L'énergie totale d'une particule est la somme de son énergie au repos et de son énergie cinétique. A partir de l'équation (1.1), la loi de la conservation de l'énergie implique :

$$m_{X_1}.c^2 + m_{x_1}.c^2 + T_{x_1} = m_{y_2}.c^2 + T_{y_2} + m_{Y_2}.c^2 + T_{Y_2} + E_{Y_2}^* \quad (1.4)$$

où  $T_{x_1}$ ,  $T_{y_2}$  et  $T_{Y_2}$  sont les énergies cinétiques des noyaux  $x_1$ ,  $y_2$  et  $Y_2$  respectivement. Le noyau résidu  $Y_2$  peut être dans un état excité, l'énergie  $E_{Y_2}^*$  est l'énergie d'excitation.

Le bilan de masse  $Q$  d'une réaction nucléaire représente la quantité de masse utilisée (transformée en énergie) [28] dans une réaction nucléaire. Plusieurs cas existent :

- $Q = 0$  : la somme des énergies totales en entrée de réaction est strictement égale à la somme des énergies totales en sortie de réaction. C'est le cas des diffusions élastiques.
- $Q > 0$  : la réaction est exo-thermique (ou exo-énergétique). La réaction se fait sans apport d'énergie.
- $Q < 0$  : la réaction est endo-thermique (endo-énergétique). Cela signifie qu'il faut fournir de l'énergie au système en entrée pour que la réaction puisse avoir lieu. Ce sont des réactions à seuil, car une des particules en entrée doit avoir une énergie cinétique suffisante pour que la réaction se produise.

Dans cette équation, les masses sont exprimées en unité de masse atomique, et les énergies en MeV. Cependant, il est plus aisé en physique nucléaire d'exprimer les masses en  $\text{MeV} \cdot c^{-2}$ , suivant l'équivalence masse-énergie.

Le bilan énergétique de la réaction de l'équation (1.1) vaut :

$$Q = (m_{X_1} + m_{x_1} - m_{y_2} - m_{Y_2}) \cdot c^2 \quad (1.5)$$

Par conséquent, l'équation 1.4 devient donc :

$$Q + T_{x_1} = T_{y_2} + T_{Y_2} + E_{Y_2}^* \quad (1.6)$$

L'énergie  $E_{Y_2}^*$  n'est pas une énergie cinétique. Pour qu'il y ait conservation de l'énergie, on parle de bilan efficace  $Q_{eff}$  :

$$Q_{eff} = Q - E_{Y_2}^* \quad (1.7)$$

$$Q_{eff} + T_{x_1} = T_{y_2} + T_{Y_2} \quad (1.8)$$

Dans le cas des réactions à seuil ( $Q < 0$ ), la réaction peut se produire seulement si la particule incidente a une énergie supérieure à l'énergie seuil  $E_s$ , défini comme :

$$E_s = -Q_{eff} \left( \frac{m_{X_1} + m_{x_1}}{m_{X_1}} \right) \quad (1.9)$$

### 1.2.1.2 Section efficace et principe de la balance détaillée

La notion de section efficace (microscopique) est très importante en physique et également en neutronique. C'est une grandeur physique, homogène à une surface, qui donne une mesure de la probabilité d'interaction rapportée à chaque particule pour une réaction donnée. Une réaction nucléaire ne se produit pas à coup sûr lors d'une interaction entre une particule et un noyau, mais seulement avec une certaine probabilité [29].

On considère un faisceau de particules incidentes dont le flux est  $\Phi$  (en particules. $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Ce faisceau est dirigé vers un volume contenant un nombre connu d'atomes cibles  $N_{cible}$ . Le nombre de particules ayant interagi  $N$  (en particules. $\text{s}^{-1}$ ) est relié avec le flux incident  $\Phi$  et par le nombre d'atome cibles  $N_{cible}$  par un coefficient  $\sigma$  :

$$N = \sigma \cdot \Phi \cdot N_{cible} \quad (1.10)$$

$N_{cible}$  est relié au volume  $V$  (en  $\text{cm}^{-3}$ ) par la relation :

$$N_{cible} = \eta_{cible} \cdot V = \frac{\rho_{cible} \cdot N_A}{M_{cible}} \cdot V \quad (1.11)$$

avec  $\eta_{cible}$  la densité d'atomes cibles (en atomes. $\text{cm}^{-3}$ ). Cette densité est reliée à la masse volumique du milieu cible  $\rho_{cible}$  et à sa masse atomique  $M_{cible}$ , ainsi qu'au nombre d'Avogadro  $N_A$ .

La grandeur  $\sigma$  est la section efficace. Elle est homogène à une surface et est exprimée en barn ( $1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$ ). La section efficace est définie pour une interaction donnée, sur une cible donnée, pour des projectiles d'énergie donnée. La variation de la section efficace avec l'énergie du projectile est la fonction d'excitation de l'interaction considérée [9].

Dans certains cas, pour mesurer la section efficace d'une réaction, il est plus judicieux d'étudier la réaction inverse (i.e. la réaction  $B(b, a)A$  au lieu de la réaction  $A(a, b)B$ ). En utilisant la méthode de la balance détaillée, on peut déterminer la section efficace de la réaction inverse à partir de la réaction directe. Selon J.B. Blatt et V.F. Weisskopf dans "*Theoretical Nuclear Physics*" [30], la méthode de la balance détaillée fait partie des principes dits de conservation ou de réciprocité pour les réactions nucléaires. La section efficace de la réaction  $\sigma_{A(a,b)B}$  est reliée à la section efficace de la réaction inverse  $\sigma_{B(b,a)A}$  à une énergie donnée [31].

Le principe de la balance détaillée est défini de la façon suivante :

$$\frac{\sigma_{B(b,a)A}}{\sigma_{A(a,b)B}} = \frac{(2I_A + 1) \cdot (2I_a + 1) \cdot p_a^2}{(2I_B + 1) \cdot (2I_b + 1) \cdot p_b^2} \quad (1.12)$$

où  $p_a$  et  $p_b$  sont les quantités de mouvement des particules  $a$  et  $b$  et  $I_A, I_a, I_b, I_B$ , sont les valeurs de spin respectivement des noyaux  $A, a, b$  et  $B$ . La section efficace  $\sigma_{A(a,b)B}$  est la somme des sections efficaces partielles (où  $n$  est l'état excité, 0 étant l'état fondamental) :

$$\sigma_{A(a,b)B} = \sum_{n=0}^i \sigma_{A(a,b_n)B^*} \quad (1.13)$$

L'utilisation de la méthode de la balance détaillée n'est valable que pour les réactions où le noyau résidu est dans son état fondamental. En effet, à partir du seuil de la réaction  $(A(a, b)B)$ , donc du seuil de la réaction  $(A(a, b_0)B)$ , jusqu'au seuil de la réaction  $(A(a, b_1)B)$ , seule la réaction  $(A(a, b_0)B)$  a lieu. La section efficace  $\sigma_{A(a,b)B}$  équivaut à celle de  $\sigma_{A(a,b_0)B}$ . L'équation de la méthode de la balance détaillée (1.12) donnera (en version simplifiée) :

$$\sigma_{A(a,b_0)B} \propto \sigma_{B(b,a)A} \quad (1.14)$$

A partir du seuil de la réaction  $(A(a, b_1)B)$ , les deux réactions  $(A(a, b_0)B)$  et  $(A(a, b_1)B)$  existeront. Donc la section efficace totale vaudra :

$$\sigma_{A(a,b)B} = \sigma_{A(a,b_0)B} + \sigma_{A(a,b_1)B} \quad (1.15)$$

$$(\sigma_{A(a,b_0)B} + \sigma_{A(a,b_1)B}) \propto \sigma_{B(b,a)A} \quad (1.16)$$

Le calcul de la section efficace  $\sigma_{A(a,b)B}$  à partir de la section efficace de la réaction  $\sigma_{B(b,a)A}$  sera donc sur-estimé à partir de l'énergie seuil du premier état excité du noyau résidu. C'est pourquoi l'utilisation de la méthode de la balance détaillée pour étudier la section efficace n'est valide que pour les énergies où le noyau résidu se trouve dans son état fondamental.

## 1.2.2 Études expérimentales

*L'état de l'art qui va être présenté dans cette partie est une compilation des expériences listées dans les différentes éditions de "Energy Levels of Light Nuclei"<sup>6</sup> et de leurs références, et des données disponibles sur EXFOR<sup>7</sup>.*

6. W.F. Hornyak et T. Lauritsen [32, 33], Fay Ajzenberg-Selove et T. Lauritsen [34, 35], F. Ajzenberg-Selove [36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49], D.R. Tilley *et al.* [50, 51, 52].

7. (Experimental Nuclear Reaction Data) provenant du NDS de l'IAEA, du NNDC (National Nuclear Data Center) du BNL (Brookhaven National Laboratory) et NRDC (international network of Nuclear Reaction Data Centres) du NDS [53]

Les bases de données utilisées en physique nucléaire reposent sur les mesures expérimentales et sur les évaluations élaborées pour obtenir la fonction d'excitation sur toute une gamme en énergie cinétique. Différentes bases de données sont représentées dans cette partie (il s'agit des bases ENDF/B-VIII.B3, ENDF/B-VII.1, JEFF-3.2 et JENDL-4.0). Les différentes bases de données existantes seront étudiées plus en détail dans la partie 1.2.3 plus loin.

### 1.2.2.1 Les mesures expérimentales de section efficace sur l'oxygène (réaction directe)

L'oxygène, à l'état naturel, est présent sous la forme de trois isotopes stables : le  $^{16}\text{O}$  ( $99,757 \pm 0,016 \%$ ), le  $^{17}\text{O}$  ( $0,038 \pm 0,001 \%$ ) et le  $^{18}\text{O}$  ( $0,205 \pm 0,014 \%$ ). L'oxygène a également onze isotopes radioactifs [4].

Les réactions induites par neutron sur un noyau d' $^{16}\text{O}$  peuvent créer un noyau composé d' $^{17}\text{O}$ . Par la suite, ce noyau excité décroît en émettant différentes particules. Les réactions induites par neutrons se divisent entre réactions avec formation du noyau composé ( $^{17}\text{O}$ ) et réactions directes parmi lesquelles la réaction élastique  $^{16}\text{O}(n,n')^{16}\text{O}$  qui domine sur tout le spectre énergétique.

Les principales réactions  $n+^{16}\text{O}$ , jusqu'à une énergie neutronique de 20 MeV, sont représentées dans la figure 1.1 (en page 13). Cette figure met en exergue le fait que la réaction élastique  $^{16}\text{O}(n,n')^{16}\text{O}$  est la principale réaction qui se produit sur la gamme en énergie étudiée. Cette réaction est la seule réaction sans seuil sur l' $^{16}\text{O}$ .

Les seuils des autres réactions nucléaires  $n+^{16}\text{O}$  sont listées dans le tableau 1.1 (en page 15). En-dessous d'une énergie de 10 MeV, les réactions sont les diffusions inélastiques  $^{16}\text{O}(n,n')^{16}\text{O}^*$ , ainsi que les réactions  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  et  $^{16}\text{O}(n,n+\alpha)^{12}\text{C}$ . Comme il est possible de le voir sur la figure 1.1, la réaction de transmutation  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  est la première réaction à seuil dans l'ordre croissant des énergies des neutrons incidents. La section efficace de cette réaction représente l'ensemble des sections efficaces partielles : le  $^{13}\text{C}$  peut être dans un état excité, les réactions nucléaires sont  $^{16}\text{O}(n,\alpha_0)$ ,  $^{16}\text{O}(n,\alpha_1)$ ,  $^{16}\text{O}(n,\alpha_2)$  et  $^{16}\text{O}(n,\alpha_3)$  pour, respectivement, le niveau fondamental et les premier, second et troisième états excités.

Sur la figure 1.2 (en page 14) les sections efficaces des réactions  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}^*$  sont représentées. De 2,36 à 5,64 MeV seules les réactions  $^{16}\text{O}(n,\alpha_0)^{13}\text{C}$  (le  $^{13}\text{C}$  restant dans son état fondamental) existent. A partir de 5,64 MeV le noyau résidu peut être dans l'un de ses états excités. Les autres réactions  $n+^{16}\text{O}$  émettant une particule chargée ont des seuils de réaction plus importants (à partir de 10,25 MeV pour la réaction  $^{16}\text{O}(n,p)$ ).

Pour des neutrons d'énergie cinétique inférieure à 6,5 MeV, la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  prédomine. Pour des énergies plus grandes que 6,5 MeV, la diffusion inélastique  $^{16}\text{O}(n,n')^{16}\text{O}^*$  devient la plus importante.

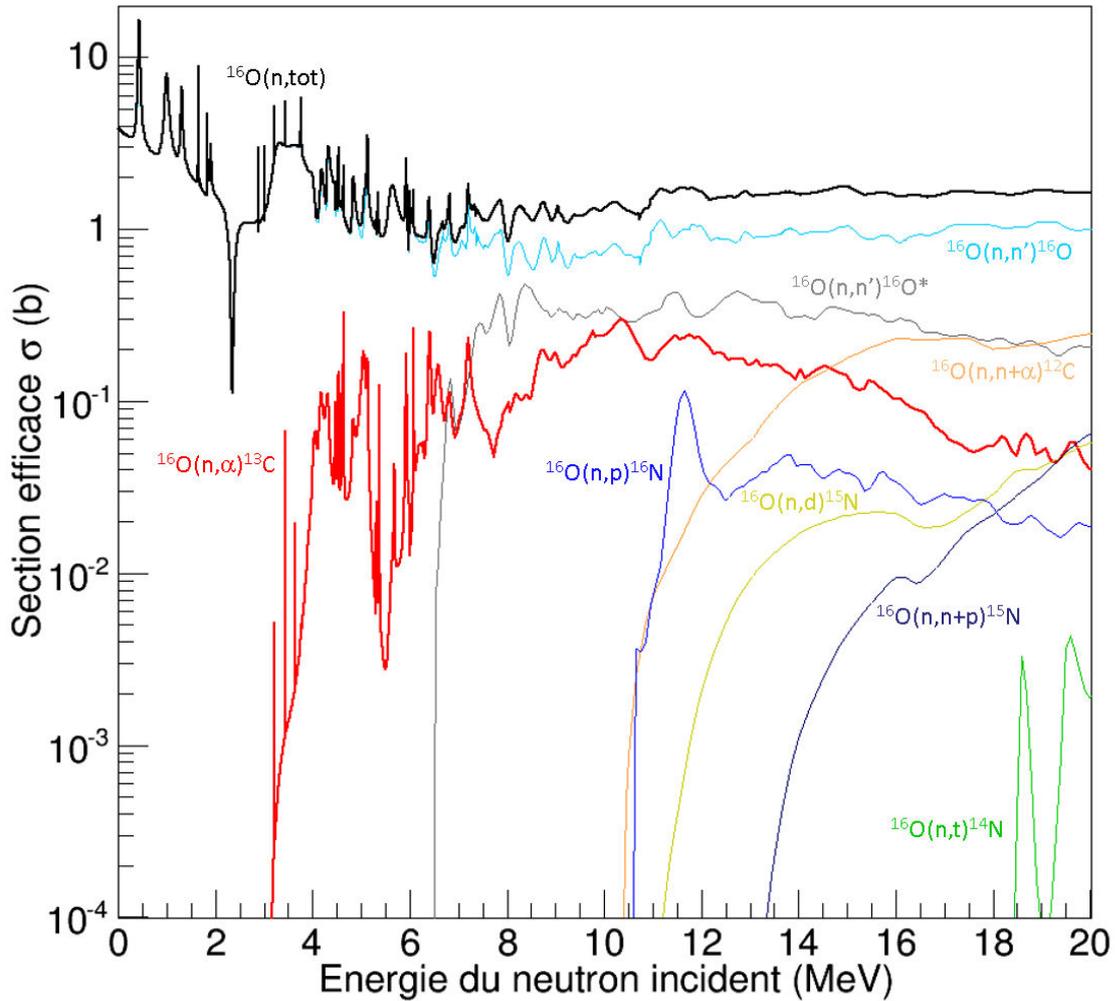


FIGURE 1.1 – Section efficace des principales réactions  $n+^{16}\text{O}$  (issues de la bibliothèque ENDF/B-VII.1) pour des neutrons d'énergie maximale de 20 MeV. La réaction étudiée dans ce travail est en gras et en rouge.

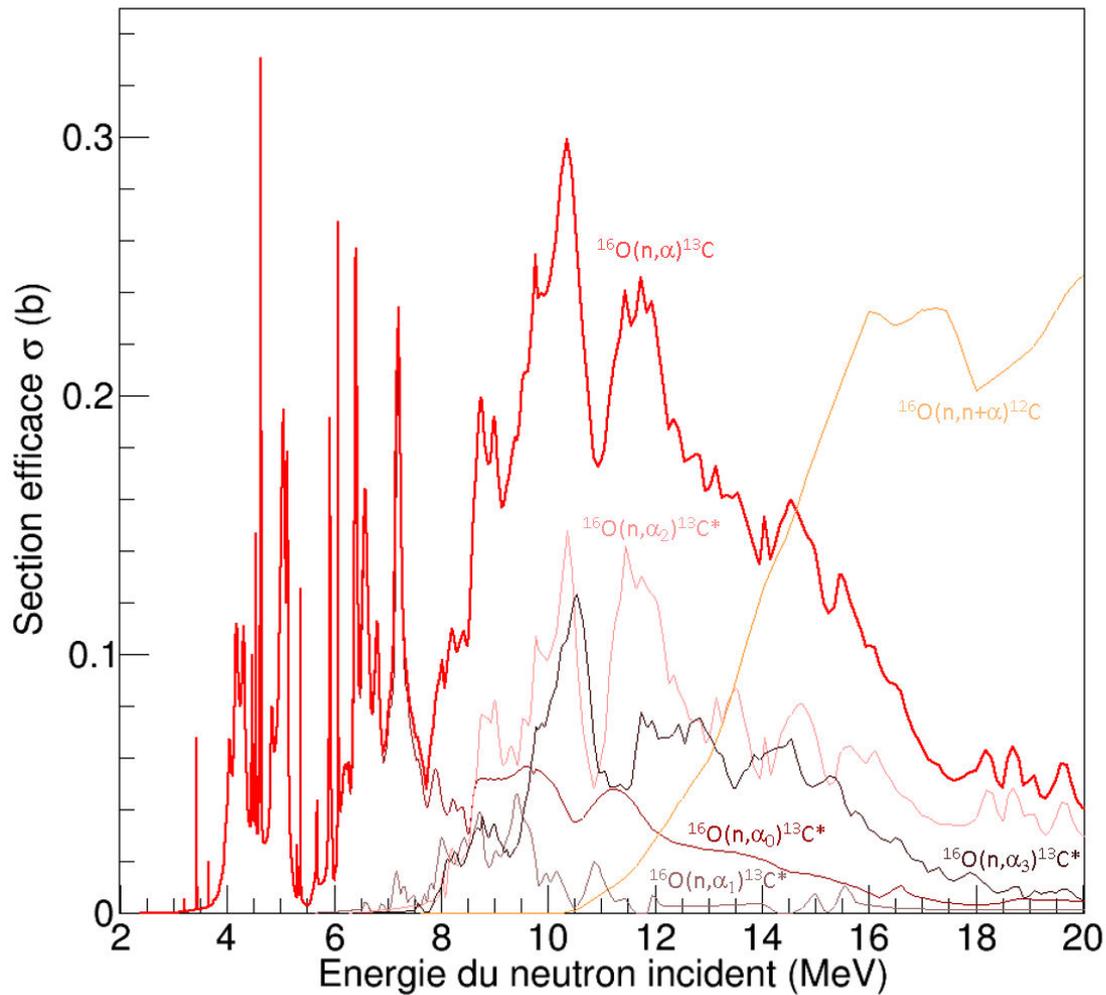


FIGURE 1.2 – Section efficace des réactions  $^{16}\text{O}(n, \alpha)^{13}\text{C}$  pour des neutrons d'énergie maximale de 20 MeV (issues de la bibliothèque ENDF/B-VII.1). La section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n, \alpha)$  correspond à la somme des sections efficaces des réactions où le noyau résidu se trouve dans son état fondamental et dans ses états excités. On remarque qu'à partir de 14 MeV le neutron incident est tellement énergétique que la réaction prépondérante est une réaction à trois corps.

Réaction	États ( MeV)	Bilan ( MeV)	Seuil ( MeV)
Diffusion inélastique $^{16}\text{O}(n,n')^{16}\text{O}^*$	6,05	-6,05	6,43
	6,13	-6,13	6,52
	6,92	-6,92	7,35
	7,11	-7,12	7,57
	8,87	-8,87	9,43
Réactions d'intérêt $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}^*$	0	-2,22	2,36
	3,09	-5,31	5,64
	3,68	-5,90	6,27
Réactions parasites	$^{16}\text{O}(n,n+\alpha)^{12}\text{C}$	-7,16	7,61
	$^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$	-9,64	10,25
	$^{16}\text{O}(n,n+p)^{15}\text{N}$	-12,13	12,89
	$^{16}\text{O}(n,d)^{15}\text{N}$	-9,90	10,53
	$^{16}\text{O}(n,t)^{14}\text{N}$	-14,48	15,39

TABLEAU 1.1 – Principales réactions  $n+^{16}\text{O}$  représentées sur la figure 1.1. Les états excités des noyaux résidus, pour les réactions dont le seuil est inférieur à 10 MeV, sont également listés (les énergies des états excités et les masses proviennent du site internet de la NEA [4]). Les bilans énergétiques et les seuils ont été calculés suivant les formules décrites en 1.2.1.1.

Les autres réactions émettant une particule chargée ont une section efficace moins importante que celle de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  jusqu'à des énergies de 14 MeV (énergie à partir de laquelle la réaction  $^{16}\text{O}(n,n+\alpha)^{12}\text{C}$  prédomine). A partir de 19 MeV les sections efficaces des réactions  $^{16}\text{O}(n,d)^{15}\text{N}$  et  $^{16}\text{O}(n,n+p)^{15}\text{N}$  deviennent prépondérantes devant la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ .

Les fonctions d'excitations dans la figure 1.1 montrent des résonances correspondantes aux états excités du noyau composé ou des noyaux résidus. Ces résonances sont principalement visibles sur les courbes relatives aux réactions élastiques ( $^{16}\text{O}(n,n')^{16}\text{O}$ ) et inélastiques ( $^{16}\text{O}(n,n')^{16}\text{O}^*$ ) et aux courbes sur la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha_0)^{13}\text{C}$ . Elles sont par conséquent visibles sur la courbe  $^{16}\text{O}(n,\text{tot})$  qui représente la somme de toute les sections efficaces des réactions  $n+^{16}\text{O}$  en noir. Les états excités des noyaux  $^{17}\text{O}$  et  $^{13}\text{C}$  sont représentés dans le graphe 1.3 (en 16).

Les études expérimentales réalisées sur la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  peuvent être classées en trois plages d'énergie pour plus de clarté : du seuil à 6 MeV, de 6 à 9 MeV et au-dessus de 9 MeV. Ce choix arbitraire est motivé par le fait que les évaluations (qui seront présentées plus loin dans ce chapitre) sont cohérentes entre elles, du seuil de la réaction à 6 MeV. Entre 6 à 9 MeV, les écarts entre les mesures expérimentales et entre les évaluations sont les plus importants.

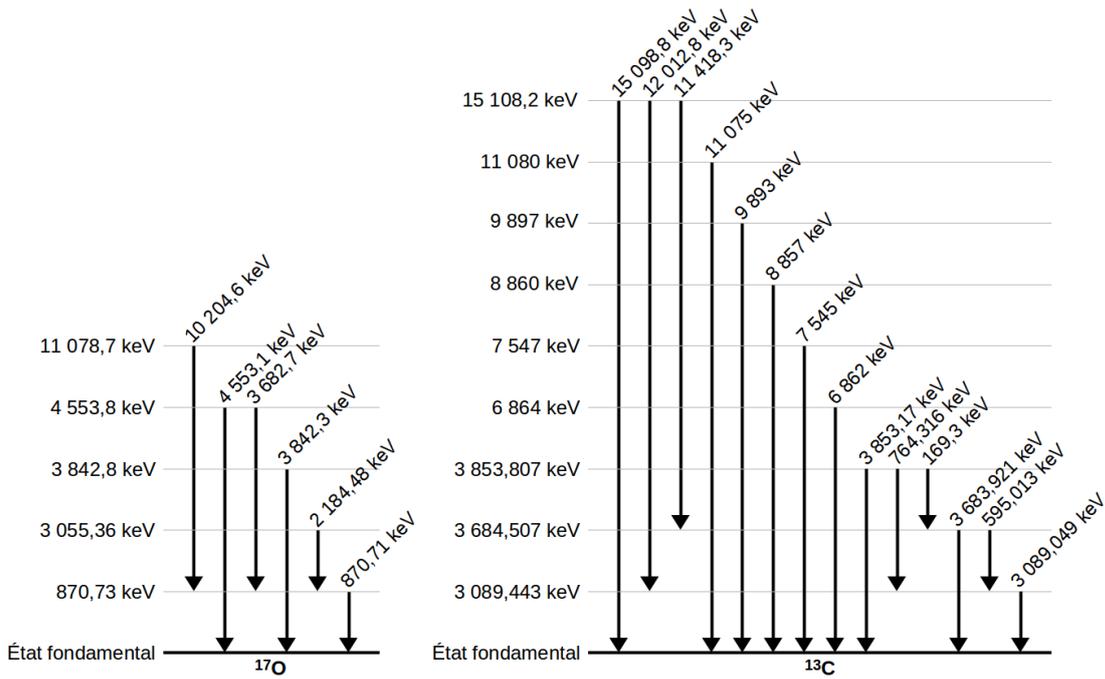


FIGURE 1.3 – Schéma de désintégration des principaux états excités du  $^{17}\text{O}$  (à gauche), du  $^{13}\text{C}$  (à droite) et des photons  $\gamma$  émis lors de la désexcitation.

A partir de 9 MeV les écarts semblent converger, mais quelques écarts sont visibles pour des neutrons de 14 MeV. Pour plus de clarté, les mesures expérimentales les plus récentes font l'objet d'un paragraphe à part.

### 1.2.2.1.1 Les études expérimentales en-dessous de 6 MeV

La figure 1.4 (en page 18) représente les mesures expérimentales de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  du seuil de la réaction jusqu'à 6 MeV. Les principales évaluations issues des bibliothèques ENDF (ENDF/B-VII.1 et ENDF/B-VIII.B3), JEFF (JEFF-3.2) et JENDL (JENDL-4.0) sont également représentées, mais les trois premières sont confondues. Jusqu'à 6 MeV, la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  correspond à celle de  $^{16}\text{O}(n,\alpha_0)^{13}\text{C}$ . Les études expérimentales réalisées sur cette gamme en énergie sont celles de J. Seitz and P. Huber [54], E.A. Davis *et al.* [55], A.S. Divatia *et al.* [56], G. Giorginis *et al.* [57] et V.A. Khryachkov *et al.* [1].

J. Seitz and P. Huber de l'Universität Basel ont mesuré en 1955 [54] la section efficace sur une gamme d'énergie comprise entre 3,65 et 4,22 MeV en utilisant une chambre d'ionisation remplie d'oxygène ( $\text{O}_2$ ). Deux résonances (à 3,9 et 4,05 MeV) ont été identifiées, correspondantes chacune à un état excité du  $^{17}\text{O}$  (respectivement 7,81 et 7,95 MeV). Ils ont mesuré la section efficace sur une gamme en énergie pour étudier la possibilité d'utilisation de l'eau comme modérateur pour les neutrons rapides. Ils ont déterminé ainsi vingt-six valeurs de la section efficace.

En 1963, E.A. Davis *et al.* [55] de la Rice University de Houston ont mesuré la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha_0)^{13}\text{C}$  avec des neutrons mono-énergétiques de 5 MeV à 8,8 MeV. Le dispositif utilisé est une chambre d'ionisation remplie de deux mélanges de gaz ( $\text{CO}_2 - \text{Ar}$  et  $\text{CO}_2 - \text{Kr}$ ) pour mettre en évidence les résonances du noyau composé  $^{17}\text{O}$  et déterminer ainsi la section efficace.

Ils ont étudié aussi les réactions laissant le noyau résidu dans l'un de ses états excités sur une gamme en énergie plus restreinte. La réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha_0)^{13}\text{C}$  a été mesurée avec une précision de 20% à 5 MeV et 30% à 8,7 MeV (la résolution en énergie, respectivement, est de 25 keV et 50 keV). Sur les réactions laissant le noyau résidu dans un état excité, les erreurs sont estimées à 35%.

Les expériences faites par A.S. Divatia *et al.* [56] en 1966 ont été réalisées à partir de la réaction inverse  $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$  et sont décrites dans la partie 1.2.2.2. Les dernières expériences sur la mesure de la section efficace  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  (de G. Giorginis *et al.* [57] en 2007 et de V.A. Khryachkov *et al.* [1] en 2012) sont également décrites dans une partie ultérieure (1.2.2.1.4).

Dans cette gamme en énergie, les résultats expérimentaux et les évaluations sont globalement en accord entre eux. Seule la dernière évaluation publiée (ENDF/B-VIII.B3) a des valeurs de sections efficaces supérieures à celles des évaluations précédentes, surtout entre 4 et 5,2 MeV. Les évaluations ENDF/B-VII.1, JEFF-3.2 et JENDL-4.0 sur la figure 1.4 sont en cohérence avec les données d'A.S. Divatia *et al.* et E.A. Davis *et al.*. Les sections efficaces estimées par ces expériences sont inférieures aux autres estimations.

A contrario, les données expérimentales de G. Giorginis *et al.* et V.A. Khryachkov *et al.* sont en cohérence avec la dernière évaluation publiée par ENDF, la bibliothèque ENDF/B-VIII.B3. Ces désaccords, entre les mesures expérimentales entre elles, entre les évaluations entre elles, et également entre les mesures expérimentales et les évaluations, montrent que les données nucléaires sont en constante évolution : le projet SCALP prend tout son sens.

### 1.2.2.1.2 Les études expérimentales de 6 à 9 MeV

En 1968, D. Dandy *et al.* [58], de l'AWRE à Aldermaston au Royaume-Uni, ont évalué la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  et de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha_0)^{13}\text{C}$  sur une gamme en énergie de 7 MeV à 12 MeV. Ce sont les premiers à évoquer la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha_0)^{13}\text{C}$  dans un contexte biologique concernant l'utilisation de neutrons rapides en radiothérapie. L'oxygène étant présent dans les tissus humains, l'étude de la production de particules  $\alpha$  provenant de cet élément est donc intéressante (d'un point de vue biologique). Ils ont utilisé une cellule hémisphérique contenant une plaque en silicium et rempli d'oxygène. Ils ont réussi à différencier les réactions  $^{16}\text{O}(n,\alpha)$  et  $^{16}\text{O}(n,\alpha_0)$ .

La figure 1.5 (en page 19) représente les mesures expérimentales des deux réactions  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  et  $^{16}\text{O}(n,\alpha_0)^{13}\text{C}$ , ainsi que les évaluations sur ces deux réactions, de 6 à 9 MeV.

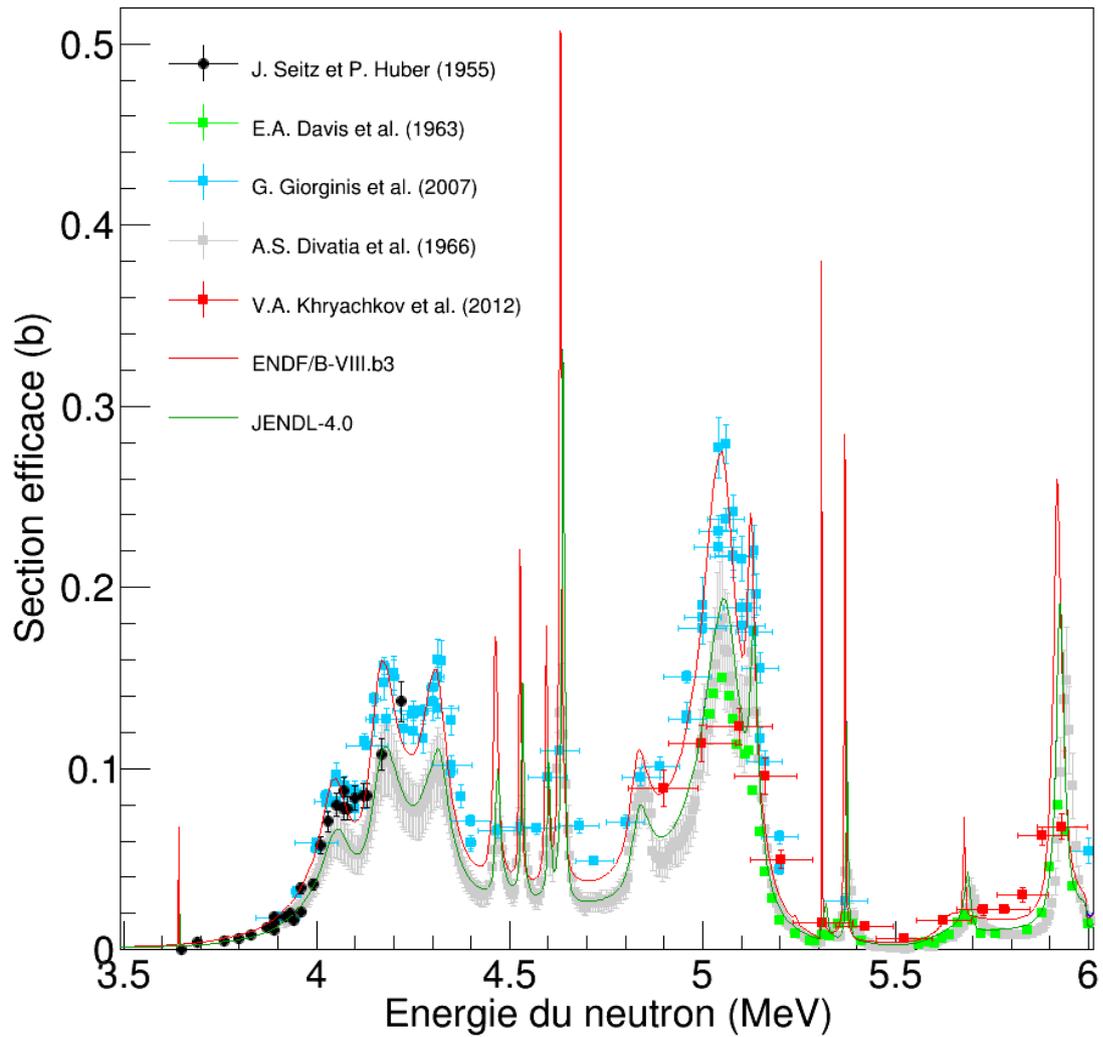


FIGURE 1.4 – Mesures expérimentales de la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  du seuil de la réaction à 6 MeV. Les évaluations ENDF/B-VII.1, JEFF-3.2 et JENDL-4.0 sont confondues sur cette gamme en énergie. L'évaluation ENDF/B-VIII.B3 est supérieure aux autres évaluations.

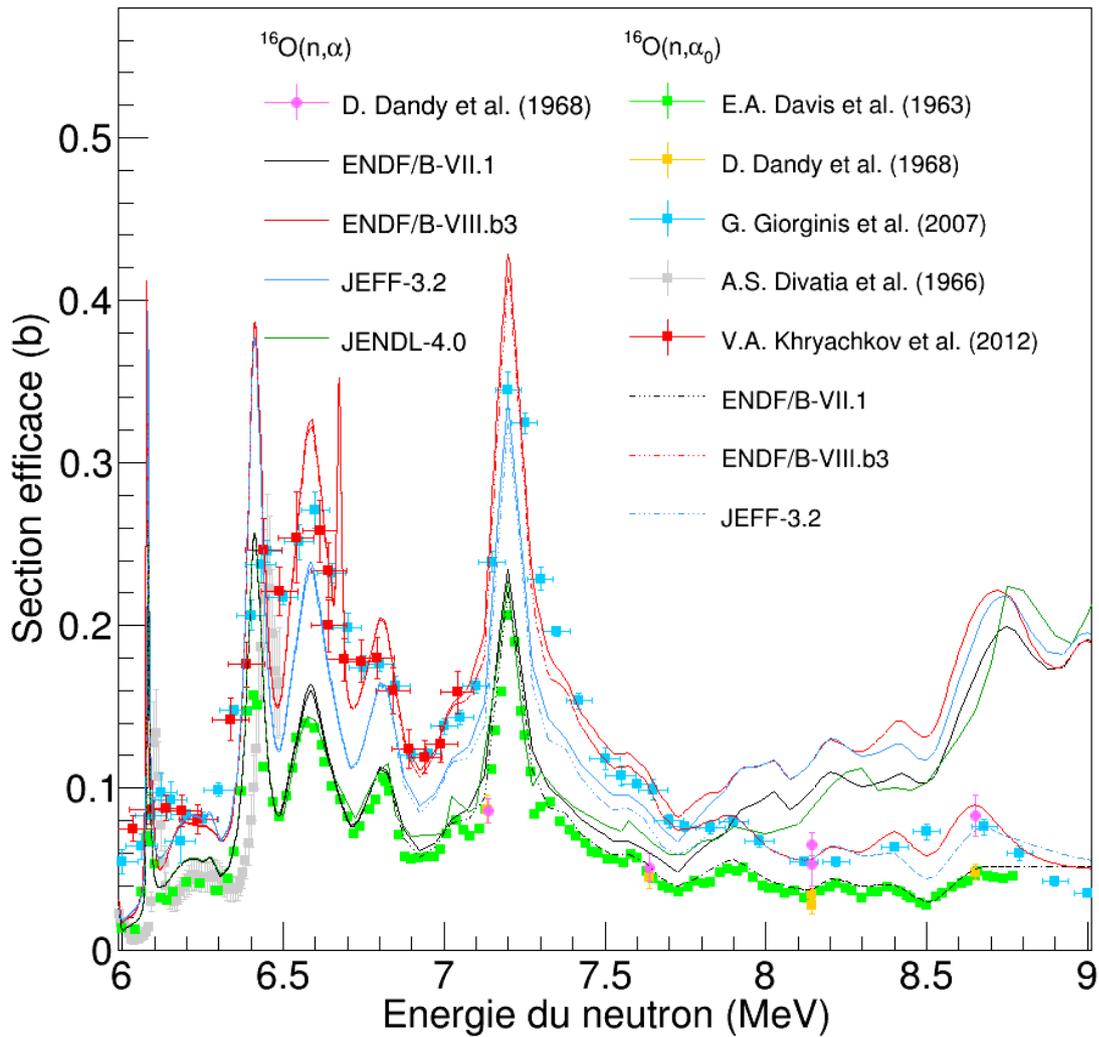


FIGURE 1.5 – Mesures expérimentales de la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  de 6 à 9 MeV. Les évaluations ENDF/B-VIII.B3, ENDF/B-VII.1, JEFF-3.2 et JENDL-4.0 sur la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  et sur la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha_0)^{13}\text{C}$  sont également représentées.

Les évaluations ENDF/B-VIII.B3, ENDF/B-VII.1, JEFF-3.2 et JENDL-4.0 sont en désaccord sur toute cette gamme en énergie. Entre 6 et 6.5 MeV ENDF/B-VIII.B3 et JEFF-3.2 sont cohérentes entre elles, de même que ENDF/B-VII.1 et JENDL-4.0. Les données expérimentales d'A.S. Divatia *et al.* et E.A. Davis *et al.* sont plus faibles que les autres estimations. Elles sont cohérentes avec les évaluations de ENDF/B-VII.1 et JENDL-4.0. Les données de G. Giorginis *et al.* et de V.A. Khryachkov *et al.* sont cohérentes avec l'évaluation ENDF/B-VIII.B3.

### 1.2.2.1.3 Les études expérimentales au-dessus de 9 MeV

La figure 1.6 (en page 22) montre les données expérimentales de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  et  $^{16}\text{O}(n,\alpha_0)^{13}\text{C}$  de 9 à 20 MeV. Dans la plupart des cas (W.N. McDicken et W. Jack [59], Y.-C. Hsu *et al.* [60], B. Leroux *et al.* [61], H.J. Brede *et al.* [62], M. Bormann *et al.* [63], S. Hlavac *et al.* [64]), les neutrons mono-cinétiques avaient une énergie de 14 MeV environ<sup>8</sup>.

W.N. McDicken et W. Jack [59] de l'Université de Glasgow ont étudié en 1966 la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha_0)^{13}\text{C}$  avec des neutrons mono-énergétiques de 14,1 MeV en utilisant un télescope composé de deux compteurs proportionnels. La cible, gazeuse, est composée de  $\text{CO}_2$ . Y.-C. Hsu *et al.* [60] en 1967 du National Taiwan University ont étudié la réaction avec des neutrons mono-énergétiques de 14,1 MeV avec une chambre à brouillard. La distribution angulaire des particules  $\alpha$  a été étudié pour les réactions menant le noyau résidu à son état fondamental et à ses deux premiers états excités.

B. Leroux *et al.* [61] du Laboratoire de Physique Nucléaire de Bordeaux ont mesuré en 1968 la réaction à une énergie de 14,9 MeV pour déterminer les distributions angulaires de réactions  $(n,\alpha_0)$ . H.J. Brede *et al.* (Universität Tübingen) [62] ont étudié en 1971 la distribution angulaire, avec des neutrons de 13,9 MeV, de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha_0)^{13}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}(n,\alpha_1)^{13}\text{C}$  et  $^{16}\text{O}(n,\alpha_2)^{13}\text{C}$ . M. Bormann *et al.* [63] ont étudié en 1973 la section efficace différentielle en angle des réactions  $^{16}\text{O}(n,\alpha_0)^{13}\text{C}$  et  $^{16}\text{O}(n,\alpha_1)^{13}\text{C}$  pour des neutrons d'énergie de 14,1 MeV.

D'autres expériences portant sur l'étude de la section efficace sur une gamme en énergie ont été menées. En 1963, M. Bormann *et al.* [65] de l'Universität Hamburg ont étudié la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  en utilisant un détecteur à scintillation. L'oxygène cible se trouvait sous la forme de poudre ( $\text{CaWO}_4$  et  $\text{ZnO}$ ). Ces molécules scintillantes émettent un rayonnement après interaction avec une particule  $\alpha$ . En 1968 I. Sick *et al.* ont étudié la section efficace différentielle de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  entre 14,4 et 18,8 MeV.

Puis en 1994 S. Hlavac *et al.* [64] (Slovak Academy of Sciences de Bratislava) ont estimé la section efficace à partir des photons  $\gamma$  émis lors de la désexcitation du noyau  $^{13}\text{C}$ . Leurs travaux se proposaient d'étudier les sections efficaces de production de particules chargées provenant de réactions nucléaires induites par des neutrons rapides dans la conception des réacteurs nucléaires<sup>9</sup>.

---

8. Les neutrons de 14 MeV sont créés à partir de la réaction D-T  $3\text{H}(d,n)4\text{He}$  avec des deutons accélérés.

9. A l'époque l'IAEA (International Atomic Energy Agency) avait lancé un vaste programme intitulé "Improvement of neutron induced helium production cross sections".

C'est dans ce cadre qu'ils développèrent un dispositif expérimental permettant de quantifier la production de photon suivant les réactions induites par des neutrons de 14,7 MeV. L'oxygène cible se trouvait sous forme de poudre d'oxyde de chrome ( $\text{CrO}_3$ ).

Les données expérimentales sur les estimations de la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  pour des neutrons d'environ 14 MeV sont très variées, contrairement à celles portant sur la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha_0)^{13}\text{C}$ , qui elles sont plus cohérentes entre elles. Cependant de manière générale, les données expérimentales sur la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  sont très différentes des estimations faites par les évaluations. Par contre, les évaluations ENDF/B-VII.1, JEFF-3.2 et ENDF/B-VIII.B3 sont similaires sur cette gamme en énergie.

Les études expérimentales sur la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ , classées dans ce manuscrit en trois plages d'énergies pour plus de clarté, ont démontré que les écarts entre les différentes expériences menées avant 2005 et les évaluations faites par les bibliothèques sont importants (environ 30% d'après A. Courcelle [27]) car ces études expérimentales avaient pour but de fournir des données nucléaires. La HPRL de 2005, et les travaux réalisés par les SG22 et SG26, ont recommandé de faire de nouvelles mesures expérimentales plus précises, afin d'obtenir des évaluations plus fiables.

#### 1.2.2.1.4 Les mesures expérimentales les plus récentes

En 2007, puis en 2012, de nouvelles expériences sur la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  ont été faites. Ce sont les premières après la demande officielle de la NEA. Elles ont été faites dans l'optique d'améliorer la précision sur les mesures des sections efficaces.

La première expérience date de 2007, par G. Giorganis *et al.* [57], à l'IRMM de Geel, en Belgique. En 2012, V.A. Khryachkov et G. Giorganis reprennent le même dispositif expérimental et l'utilisent pour refaire une série de mesure [1] (sur plusieurs isotopes) à l'IPPE d'Obninsk, en Russie. Leur dispositif expérimental (voir la figure 1.8) consiste en deux chambres d'ionisation : la principale détectant les particules  $\alpha$ , et la seconde contenant de l'uranium pour monitorer le flux neutronique. L'enceinte contenant ces deux chambres est remplie de gaz (un mélange de krypton et de dioxyde de carbone).

Comme le signalent M. Chadwick *et al.* [20], les expériences en 2007 de Giorganis *et al.* sont comparables à la dernière évaluation ENDF jusqu'à une énergie du neutron incident de 6 MeV. Mais au delà, les différences sont trop importantes. Dans leur analyse de la situation en 2012, V. Khryachkov, G. Giorganis et leur équipe estiment qu'il y a un ratio de 1,8 entre les valeurs expérimentales et l'évaluation ENDF/B-VII.1. La figure 1.7 (en page 23) représente les résultats expérimentaux de G. Giorganis *et al.* et de V.A. Khryachkov *et al.*. Ces données sont comparées avec les évaluations sur la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha_0)^{13}\text{C}$  (ENDF/B-VII.1, JEFF-3.2 et ENDF/B-VIII.B3). Les résultats expérimentaux sont cohérents avec la dernière évaluation (ENDF/B-VIII.B3), mais elles se trouvent au-dessus des deux autres évaluations.

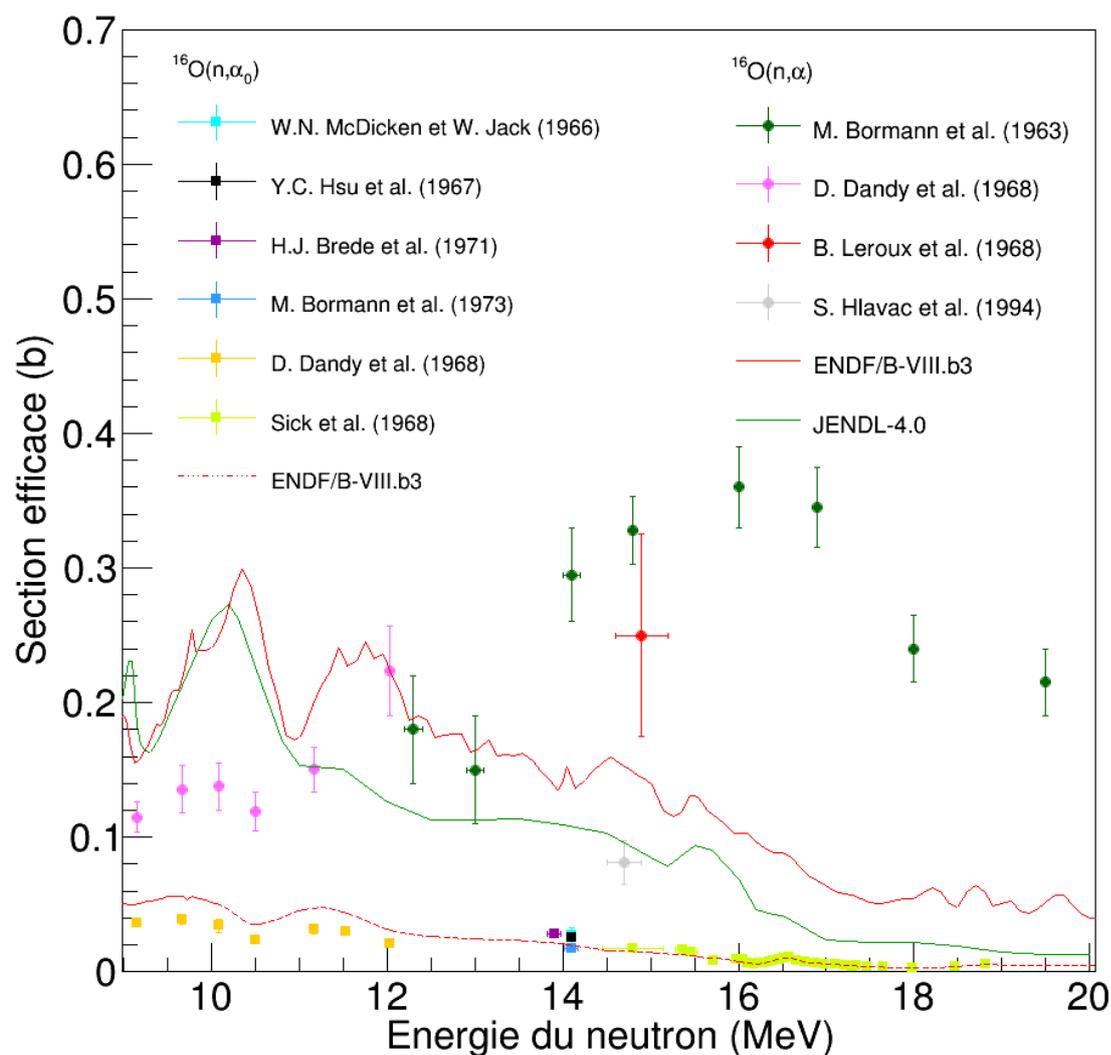


FIGURE 1.6 – Mesures expérimentales de la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n, \alpha)^{13}\text{C}$  de 9 à 20 MeV. Les évaluations ENDF/B-VII.1, JEFF-3.2 et ENDF/B-VIII.B3 sur la réaction  $^{16}\text{O}(n, \alpha)^{13}\text{C}$  et sur la réaction  $^{16}\text{O}(n, \alpha_0)^{13}\text{C}$  sont confondues sur cette gamme en énergie.

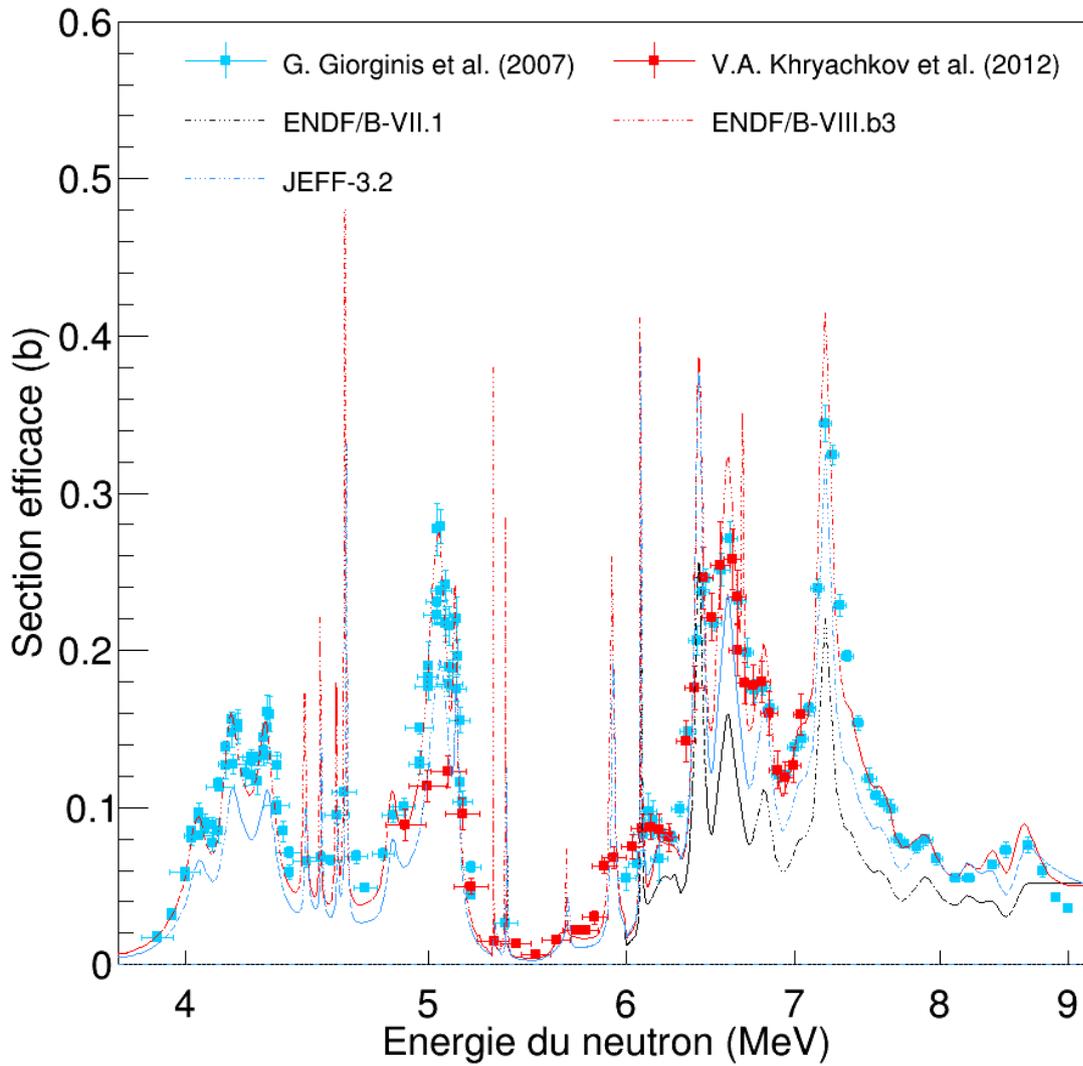


FIGURE 1.7 – Comparaison des résultats expérimentaux de section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n, \alpha_0)^{13}\text{C}$  (échelle logarithmique en abscisse). En bleu, les résultats de G. Giorginis en 2007 à l'IRMM, en rouge, ceux de V.A. Khryachkov en 2012 *et al.* à l'IPPE. Ces mesures sont comparées avec les évaluations de la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n, \alpha_0)^{13}\text{C}$ .

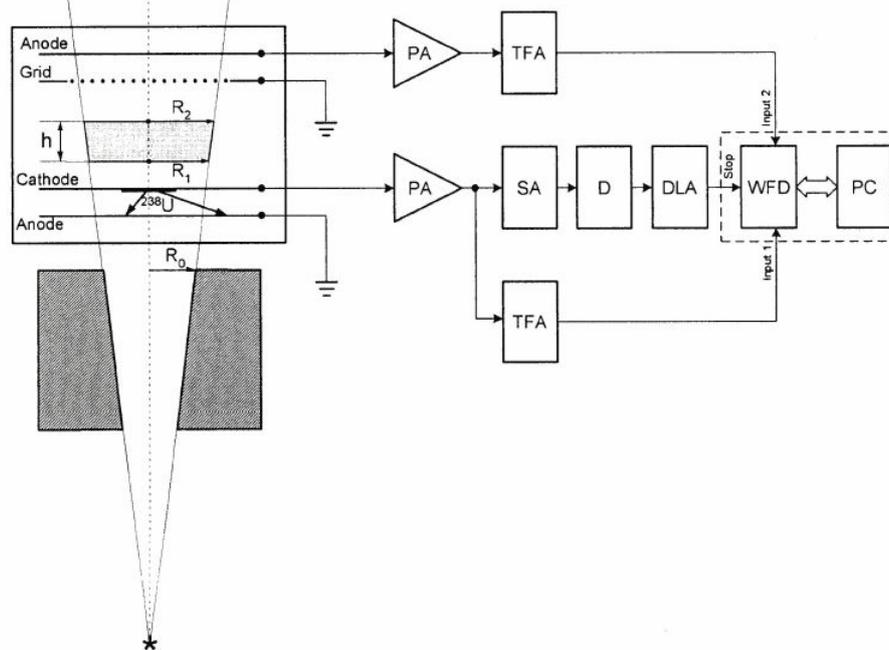


FIGURE 1.8 – Schéma du dispositif expérimental utilisé par Giorganis *et al.* à l'IRMM en 2007 et par Khryachkov *et al.* en 2012 à l'IPPE (issu de [1]).

### 1.2.2.1.5 Résumé des expériences sur l'oxygène

Le tableau 1.2 (en page 25) liste les mesures de section efficace pour la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  en fonction du type de détecteur utilisé. La chambre d'ionisation est un type de détecteur de particules qui, sous l'effet d'un champ électrique entre deux électrodes, mesure l'énergie déposée dans un volume après ionisation d'un gaz par le passage d'une particule incidente. L'utilisation d'une chambre d'ionisation permet l'étude d'une gamme en énergie neutronique assez élargie. Les noyaux oxygènes cibles doivent se trouver sous forme gazeuse (dioxyde de carbone pour la majorité des études). Sont également répertoriées les sources de neutrons utilisées pour chaque expérience.

Trois sortes de source de neutrons ont été utilisées dans ces expériences : la source D–D, basée sur la réaction  $^2\text{H}(^2\text{H},^1\text{n})^3\text{He}$ , permet de produire des neutrons d'énergie supérieure à 2,6 MeV, la source D–T (réaction  $^3\text{H}(^2\text{H},^1\text{n})^4\text{He}$ ) produit des neutrons d'énergie supérieure à 14 MeV et la source P–T qui produit des neutrons à partir de la réaction  $^3\text{H}(^1\text{H},^1\text{n})^3\text{He}$  [66, 67].

La figure 1.4 a représenté la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  en fonction de l'énergie du neutron incident, pour des neutrons d'énergie inférieure à 6 MeV. Sur cette gamme en énergie, les mesures expérimentales faites par Seitz et Huber, Davis *et al.* et Divatia *et al.* sont cohérentes entre elles et correspondent globalement aux évaluations faites sur cette gamme en énergie, les bibliothèques ENDF/B-VII.1, JEFF-3.2 et JENDL-4.0. Par contre les dernières mesures expérimentales (par Giorganis *et al.* et Khryachkov *et al.*) sont cohérentes avec les évaluations faites par la bibliothèque ENDF/B-VIII.B3, dernière version publiée à ce jour.

Détecteur	Référence	Gamme en énergie	Source de neutron	Cible
CI	Seitz et Huber [54]	[3,65 - 4,22 ]	D-D	O <sub>2</sub>
	Davis <i>et al.</i> [55]	[5,02 - 8,77 ]	D-D	CO <sub>2</sub>
	Giorginis <i>et al.</i> [57]	[3,9 - 9 ]	P-T, D-D	CO <sub>2</sub>
	Khryachkov <i>et al.</i> [1]	[4,98 - 7,041 ]	P-T, D-D	CO <sub>2</sub>
AUTRE	Bormann <i>et al.</i> [65]	[12,3 - 19,5 ]	D-T	CaWO <sub>4</sub> , ZnO
	McDicken et Jack [59]	14,1	D-T	CO <sub>2</sub>
	Hsu <i>et al.</i> [60]	14,1	D-T	O <sub>2</sub>
	Dandy <i>et al.</i> [58]	[7,13 - 12,00 ]	P-T	O <sub>2</sub>
	Leroux <i>et al.</i> [61]	14,9	D-T	O <sub>2</sub>
	Brede <i>et al.</i> [62]	13,9	D-T	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	Bormann <i>et al.</i> [63]	14,1	D-T	WO <sub>3</sub>
	Hlavac <i>et al.</i> [64]	14,7	D-T	CrO <sub>3</sub>

TABLEAU 1.2 – Liste des expériences de mesure de la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  triées par rapport au détecteur utilisé. La catégorie "CI" se réfère aux expériences utilisant une chambre d'ionisation tandis que la catégorie "AUTRE" regroupe les expériences où d'autres types de détecteurs sont utilisés (chambre à brouillard, compteurs proportionnels, ...).

Sur la gamme en énergie comprise entre 6 et 9 MeV (représentée par la figure 1.5), les mesures expérimentales sur la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha_0)^{13}\text{C}$  faites par Davis *et al.*, Dandy *et al.* et Divatia *et al.* correspondent avec l'évaluation ENDF/B-VII.1 alors que les données issues des expériences de Giorginis *et al.* et Khryachkov *et al.* sont plutôt cohérentes avec la bibliothèque ENDF/B-VIII.B3. Il y a de fortes différences entre les évaluations. Celles de la bibliothèque ENDF/B-VIII.B3 correspondent en moyenne au double des autres évaluations (jusqu'à 7,7 MeV).

Pour des neutrons d'énergie supérieure à 9 MeV (sur la figure 1.6) les mesures expérimentales sur la réactions  $^{16}\text{O}(n,\alpha_0)^{13}\text{C}$  semblent cohérentes avec les évaluations à partir de 14,5 MeV et jusqu'à 20 MeV. Des différences sont visibles en dessous de cette énergie. Les données issues des expériences sur la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  sont en total désaccord entre elles. Les bibliothèques ENDF/B-VII.1, JEFF-3.2 et ENDF/B-VIII.B3 sont confondues sur cette gamme en énergie, alors que les évaluations de la bibliothèque JENDL-4.0 sont systématiquement inférieures aux autres à partir de 10 MeV.

Les figures 1.4, 1.5 et 1.6 ont montré les écarts entre les estimations faites par différentes expériences. Ces désaccords entraînent des différences entre les évaluations sur la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ . L'influence de ces écarts sur les paramètres physiques de certaine catégories de réacteurs nucléaires a été rappelé par le projet CIELO dans ses recommandations[20].

1.2.2.2 Les mesures expérimentales de section efficace sur le carbone (réaction inverse)

En utilisant la méthode de la balance détaillée (voir le paragraphe 1.2.1.2), la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  peut être déterminée à partir de la réaction inverse  $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$ . La section efficace de la réaction inverse a été déterminée plusieurs fois à partir des années 1950 jusqu'à une énergie incidente de la particule  $\alpha$  d'environ 8 MeV. L'utilisation de la méthode de la balance détaillée a été peu utilisée par les expérimentateurs puisqu'elle n'est valide que pour les états fondamentaux.

Toutefois, pour des neutrons de faibles énergies, cette méthode a été utilisée pour déduire les sections efficaces pour les bibliothèques de données (voir le paragraphe 1.2.3). Celle-ci ont utilisés les estimations de la section efficace de la réaction  $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$  pour en déduire la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  par la méthode de la balance détaillée aux faibles énergies. La réaction  $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$  étant la réaction inverse de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ , c'est une réaction exo-énergétique et sans seuil ayant un bilan de masse de +2, 22 MeV.

Comme expliqué précédemment, la méthode de la balance détaillée n'a été utilisée que dans très peu d'expériences dans la mesure de la section efficace de la réaction  $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$ . Les principales expériences réalisées sur la réaction  $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$  sont celles d'A.S. Divatia *et al.* [56], K.K. Sekharan *et al.* [68], C.N. Davids [69], J.K. Bair et F.X. Haas [70], S.E. Kellogg *et al.* [71] et S. Harissopulos *et al.* [72].

En 1966, A.S. Divatia *et al.* [56], de l'Atomic Energy Establishment<sup>10</sup> de Trombay (Inde), ont déterminé la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  à partir de la réaction  $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$ , en utilisant le principe de la balance détaillée. L'année suivante, K.K. Sekharan *et al.* [68] (de la même équipe de recherche que A.S. Divatia) ont étudié la réaction  $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$  pour des particules  $\alpha$  incidentes de 1, 95 à 5, 57 MeV. En 1968 C.N. Davids [69], du California Institute of Technology, a estimé les réactions  $(\alpha,n)$  sur deux noyaux présents dans les étoiles (le  $^9\text{Be}$  et le  $^{13}\text{C}$ ). La gamme en énergie est assez restreinte et de faible énergie (de 400 à 700 keV), les sections efficaces déterminées sont également faibles (de l'ordre du nanobarn).

En 1973, J.K. Bair et F.X. Haas [70] ont déterminé la section efficace de la réaction  $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$  pour des particules  $\alpha$  ayant des énergies comprises entre 1 et 5, 40 MeV. Ils n'ont pas estimé la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ , mais leurs données sont utilisées par les bibliothèques pour les évaluations. En 1989 S.E. Kellogg *et al.* [71] ont étudié les réactions  $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$  et  $^{14}\text{C}(p,n)^{14}\text{N}$ , mais leurs données sont seulement des mesures à basse énergie (de 450 à 1045 keV).

Les dernières mesures sur cette réaction ont été menées en 2005, par S. Harissopulos *et al.* [72]. Ils ont signalé que les incertitudes sur la réaction  $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$  étaient de 30% (pour un intervalle en énergie en  $\alpha$  de 1, 0 à 5, 4 MeV). Les auteurs ont ré-estimé la section efficace de cette réaction sur une gamme en énergie plus étendue (de 0, 77 à 7, 96 MeV) avec une bien meilleure précision (4%).

Les principales expériences (Sekharan *et al.* [68], Bair et Haas [70], Kellogg [71] et Harissopulos *et al.* [72]) sont disponibles sur la figure 1.9. Les résultats sont relativement

---

10. Maintenant le Bhabha Atomic Research Centre

cohérents entre eux (il y a bien des différences, mais elles sont moins importantes que dans le cas de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ ). Ces études expérimentales ont été comparées avec la dernière évaluation sur cette réaction (à savoir l'évaluation de 2005 de JENDL) pour les réactions laissant le noyau résidu ( $^{16}\text{O}$ ) dans son état fondamental (le premier état excité du  $^{16}\text{O}$  est à 6,05 MeV, le seuil de la réaction  $^{13}\text{C}(\alpha,n_1)$  se trouve à 5,01 MeV). Les résultats expérimentaux, représentés sur la figure 1.9, sont résumés dans le tableau 1.3.

Référence	$^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$ Énergie ( MeV)	$^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ (balance détaillée) Énergie ( MeV)
Walton <i>et al.</i> [73]	< 3,5	[4,0 -5,2 ]
Divatia <i>et al.</i> [56]	[1,95 -5,5 ]	[3,95 -6,50 ]
Sekharan <i>et al.</i> [68]	[1,95 -5,5 ]	[3,95 -6,50 ]
Dauids [69]	[0,475 -0,7 ]	
Bair et Haas [70]	[0,9973 -5,4019 ]	
Kellogg <i>et al.</i> [71]	[0,450 -1,045 ]	
Harissopulos <i>et al.</i> [72]	[0,767 -7,962 ]	

TABLEAU 1.3 – Liste des expériences réalisées sur la section efficace de la réaction  $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$ .

### 1.2.2.3 Les mesures expérimentales sur le fluor

*Dans la suite de ce manuscrit, la réaction  $(n,\alpha)$  sur le fluor sera aussi abordée.*

Le fluor à l'état naturel n'a qu'un seul isotope stable : le  $^{19}\text{F}$ . Les réactions sur le  $^{19}\text{F}$  n'ont pas fait l'objet d'une demande particulière par la NEA (pour les mesures de ses sections efficaces utilisées dans la physique des réacteurs). Néanmoins, les réacteurs nucléaires à sels fondus (de nouvelle génération) devraient contenir du fluor dans le fluide caloporteur et dans le combustible [74]. L'étude de la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  aurait aussi de l'importance dans l'amélioration des données nucléaires en physique des réacteurs. De plus, dans le projet SCALP qui sera présenté dans le chapitre suivant 2 (et en particulier dans la partie 2.2), le  $^{19}\text{F}$  est utilisé dans le mélange gazeux par l'utilisation du  $\text{CF}_4$ . La réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  sera également étudiée dans le cadre du projet SCALP, sa section efficace sera par ailleurs utilisée pour prouver la possibilité de la mesure de la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  avec le dispositif expérimental. Par conséquent, un état de l'art des réactions  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  est présenté.

Le noyau résidu de cette réaction nucléaire est le  $^{16}\text{N}$  qui est radioactif. Il se désexcite en un noyau  $^{16}\text{O}$  par désintégration  $\beta^-$  [4]. Sa période radioactive est de 7,13 s. Le  $^{16}\text{N}$  étant radioactif (de période courte), la réaction inverse  $^{16}\text{N}(\alpha,n)^{19}\text{F}$  ne peut pas être étudiée. La méthode de la balance détaillée, à partir de cette réaction, ne peut techniquement pas être utilisée.

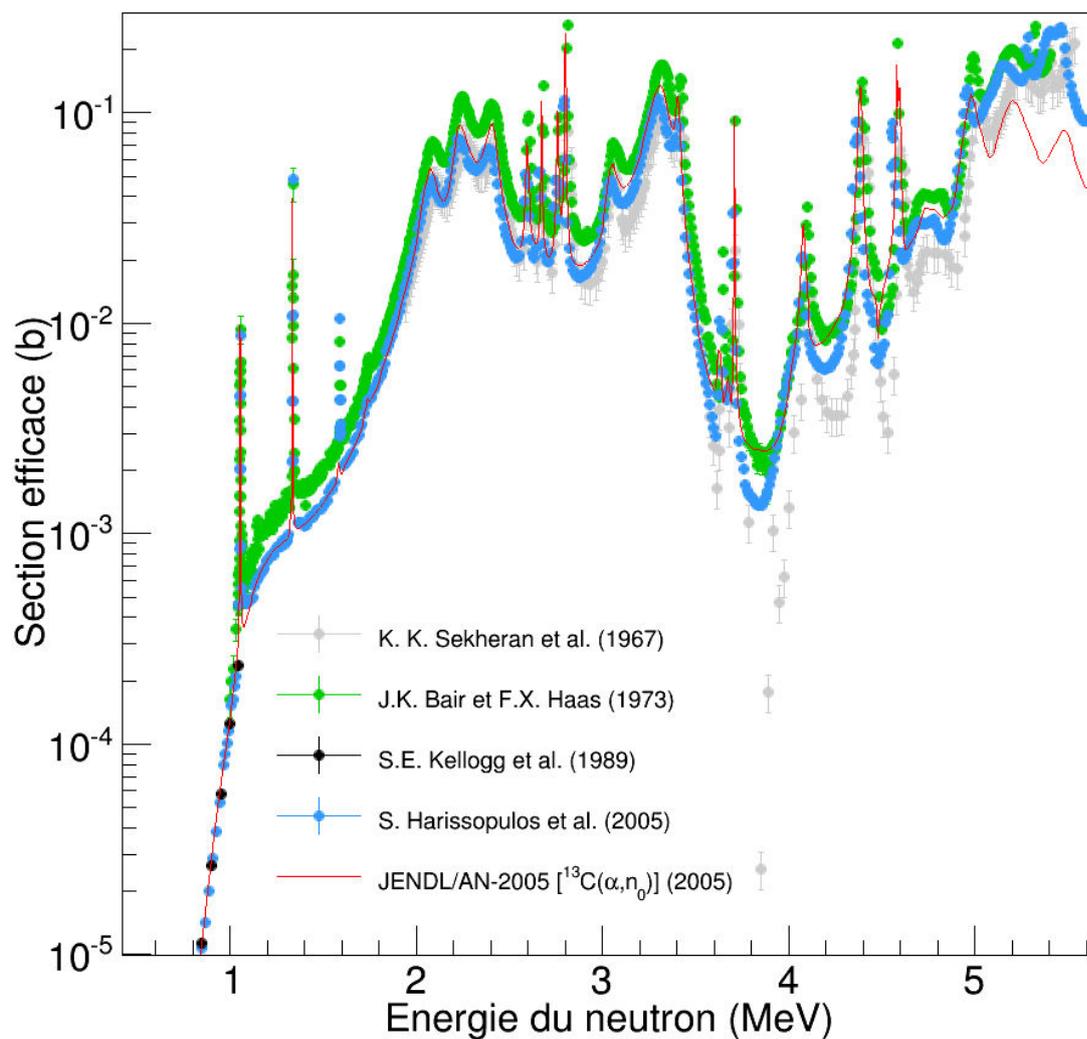


FIGURE 1.9 – Principales mesures expérimentales de la section efficace de la réaction  $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$  (échelle logarithmique en ordonnée). Les résultats expérimentaux sont comparés avec la dernière évaluation, à savoir la JENDL de 2005.

Le schéma de la désintégration du  $^{16}\text{N}$  est présenté en figure 1.10. Le noyau  $^{16}\text{N}$  se transforme en un noyau  $^{16}\text{O}$ , qui sera dans son état fondamental dans 28% des cas (avec des particules  $\beta$  émis d'énergie maximale de 10,4 MeV). Dans le reste des cas, il se transformera en un noyau  $^{16}\text{O}$  qui sera dans un de ses états excités et émettra des photons  $\gamma$  pour revenir dans son état fondamental. Ces photons emporteront l'énergie en surplus. Dans 67% des cas, l'émission photonique aura une énergie de 6,1 MeV et de 7,1 MeV pour 4,9% des cas.

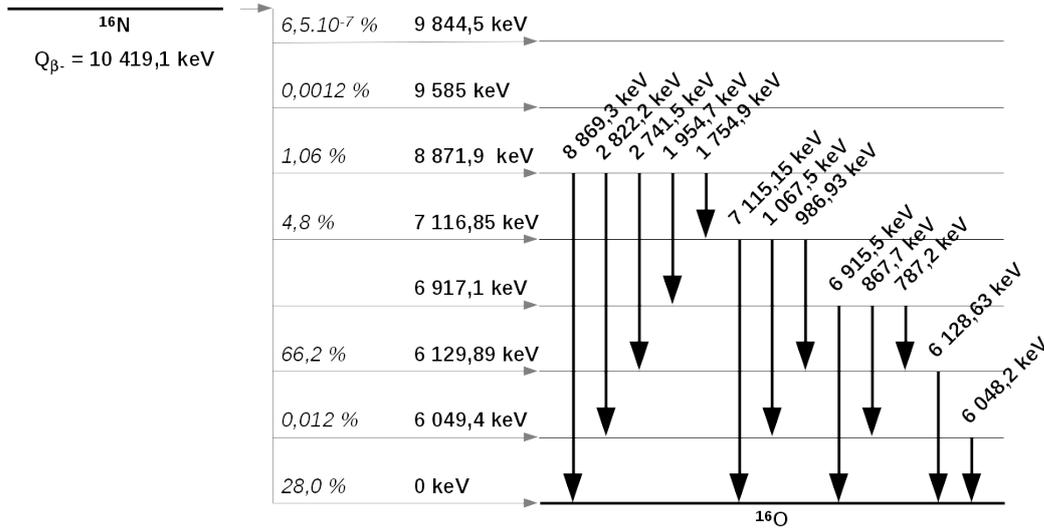


FIGURE 1.10 – Schéma de désintégration du  $^{16}\text{N}$ . Par soucis de clarté, les incertitudes et les intensités n'ont pas été répertoriés. La figure A.1 en annexe A donne un schéma plus exhaustif des états excités du  $^{16}\text{O}$ .

Dans le tableau 1.4 (en page 31) ont été rapportées les principales réactions sur le  $^{19}\text{F}$  (hors diffusion élastique) prenant place après bombardement neutronique. Ces réactions sont représentées sur la figure 1.11. La réaction la plus importante, en terme de section efficace, est la diffusion élastique  $^{19}\text{F}(n,n')^{19}\text{F}$ . La diffusion inélastique  $^{19}\text{F}(n,n')^{19}\text{F}^*$  est importante à faible énergie, mais à partir de 10 MeV, sa section efficace devient moins importante que la section efficace de la réaction  $^{19}\text{F}(n,n+\alpha)^{15}\text{N}$ . La réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  est la première réaction à seuil dont les particules émises sont chargées. A partir de 7 MeV environ, la section efficace de la réaction  $^{19}\text{F}(n,n+\alpha)^{15}\text{N}$  devient plus importante. Les autres réactions émettant des particules chargées sont, en prenant le bilan de réaction dans l'ordre croissant en terme d'énergie, les réactions  $^{19}\text{F}(n,p)^{19}\text{O}$ ,  $^{19}\text{F}(n,d)^{18}\text{O}$ ,  $^{19}\text{F}(n,t)^{17}\text{O}$ ,  $^{19}\text{F}(n,n+p)^{18}\text{O}$  et  $^{19}\text{F}(n,2n)^{18}\text{F}$ .

Sur la figure 1.11 (en page 30) sont également visibles des résonances (en particulier sur les réactions  $^{19}\text{F}(n,n')^{19}\text{F}$ ,  $^{19}\text{F}(n,n')^{19}\text{F}^*$ ,  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  et  $^{19}\text{F}(n,p)^{19}\text{O}$ ) du fait des nombreux états excités du noyau composé  $^{20}\text{F}$  (voir les tableaux A.1 et A.2 en annexe A). Le noyau résiduel peut également être dans un état excité : les trois premiers états excités sont respectivement à 120,42 keV, 298,22 keV et 397,27 keV.

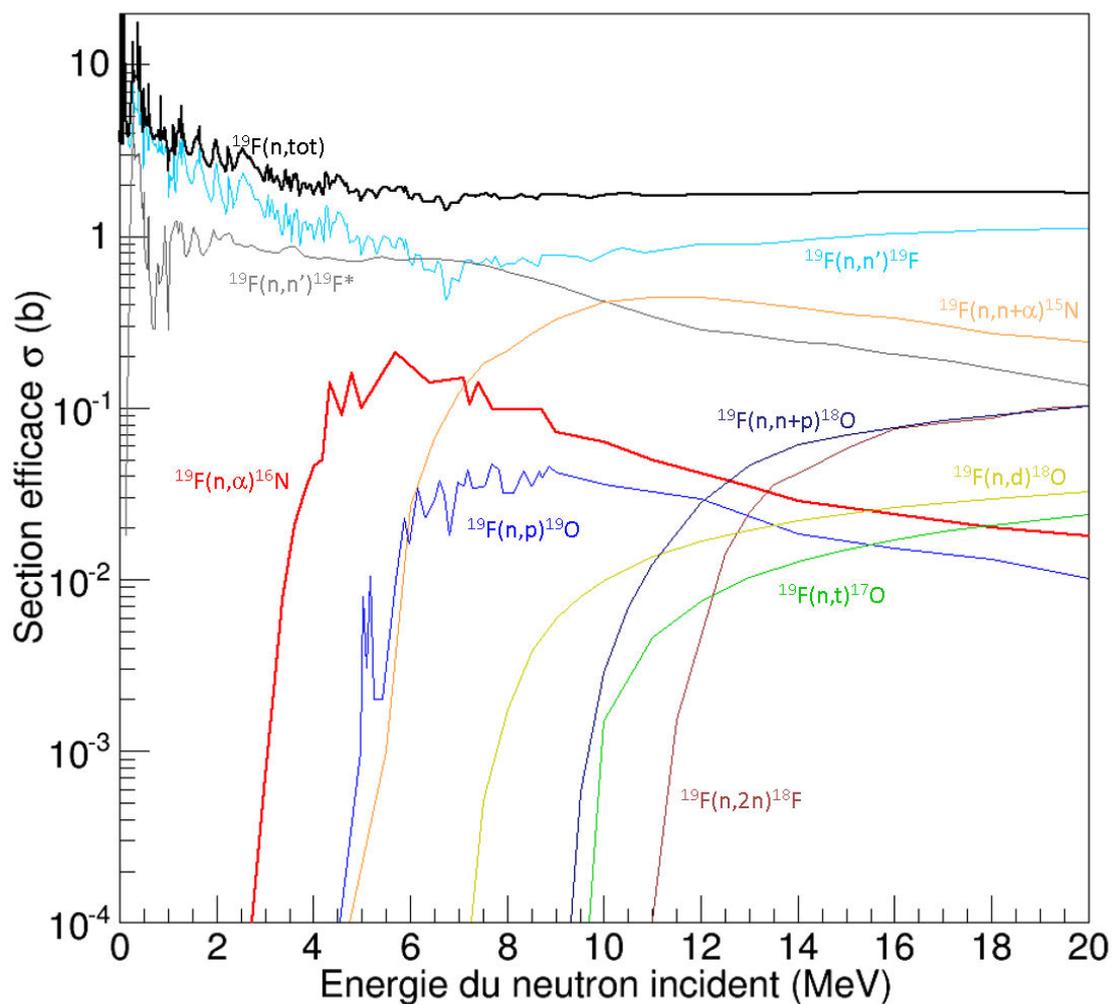


FIGURE 1.11 – Section efficace des principales réactions  $n+^{19}\text{F}$  (issues de la bibliothèque ENDF/B-VII.1) pour des neutrons d'énergie maximale de 20 MeV. La réaction  $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$  est en gras et en rouge.

Réaction	États ( MeV)	Bilan ( MeV)	Seuil ( MeV)
$^{19}\text{F}(n,n')^{19}\text{F}^*$	0,11	-0,11	0,12
$^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$		-1,52	1,61
$^{19}\text{F}(n,n+\alpha)^{15}\text{N}$		-4,01	4,23
$^{19}\text{F}(n,p)^{19}\text{O}$		-4,04	4,25
$^{19}\text{F}(n,d)^{18}\text{O}$		-5,77	6,08
$^{19}\text{F}(n,t)^{17}\text{O}$		-7,56	7,96
$^{19}\text{F}(n,n+p)^{18}\text{O}$		-7,99	8,42
$^{19}\text{F}(n,2n)^{18}\text{F}$		-10,43	10,99

TABLEAU 1.4 – Principales réactions  $n+^{19}\text{F}$ . Seul le premier état excité (109, 894 keV [4]), pour les réactions inélastiques  $^{19}\text{F}(n,n')^{19}\text{F}^*$ , est listé.

### 1.2.2.3.1 Les premières études expérimentales

Comme pour les réactions  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ , les premières mesures sur la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  eurent lieu après la mise en évidence de l'existence du neutron en 1932. Cette réaction a été étudiée la première fois par W.D. Harkins *et al.* de l'University of Chicago, en 1933 [75] et en 1935 [76]. Par ces travaux, l'isotope  $^{16}\text{N}$  a été découvert. Enrico Fermi *et al.* et son équipe ont découvert la radioactivité du  $^{16}\text{N}$  en 1934 [77]. La réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  a d'abord été étudiée pour déterminer les états excités du noyau composé  $^{20}\text{F}$  et du noyau résiduel  $^{16}\text{N}$ , par E. Wilhelmy en 1937 [78], par P. Scherrer, E. Bleuler et J. Rossel en 1947 [79, 80, 81], par J.V. Jelley and E.B. Paul en 1950 [82] ou B.J. Toppel en 1956 [83].

La majorité des mesures de section efficace ont porté, contrairement aux mesures sur la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ , sur des mesures de sections efficaces absolues (à cause des nombreux états excités du noyau composé  $^{20}\text{F}$ ). La majorité de ces études a porté sur la mesure de l'activité du noyau fils  $^{16}\text{N}$  avec un détecteur à scintillation (méthode par activation). Les expériences de mesures de section efficace de la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  peuvent être divisé en deux intervalles principaux en énergie : du seuil à 9 MeV et de 13,5 à 20 MeV. Pour le moment, aucune mesures expérimentales ont été entreprises entre 9 et 13,5 MeV.

### 1.2.2.3.2 Études de la section efficace du seuil à 9 MeV

Les principales mesures expérimentales réalisées sur la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$ , sur une gamme en énergie allant du seuil à 9 MeV, sont représentées sur la figure 1.12 (en page 32). Dans la majorité des cas, le fluor utilisé pour réaliser les expériences est présent sous forme de fluorure de calcium ( $\text{CaF}_2$ ) ou de fluorure de baryum ( $\text{BaF}_2$ ). Dans ces expériences (J.B. Marion et R.M. Brugger [84], N.A. Bostrom *et al.* [85], D.M. Smith *et al.* [86], R. Bass *et al.* [87], F. Foroughi et J. Rossel [88], C.M. Bartle et P.A. Quin [89]), la section efficace est estimée grâce à la détection des particules  $\beta$  émises par la désintégration du  $^{16}\text{N}$ .

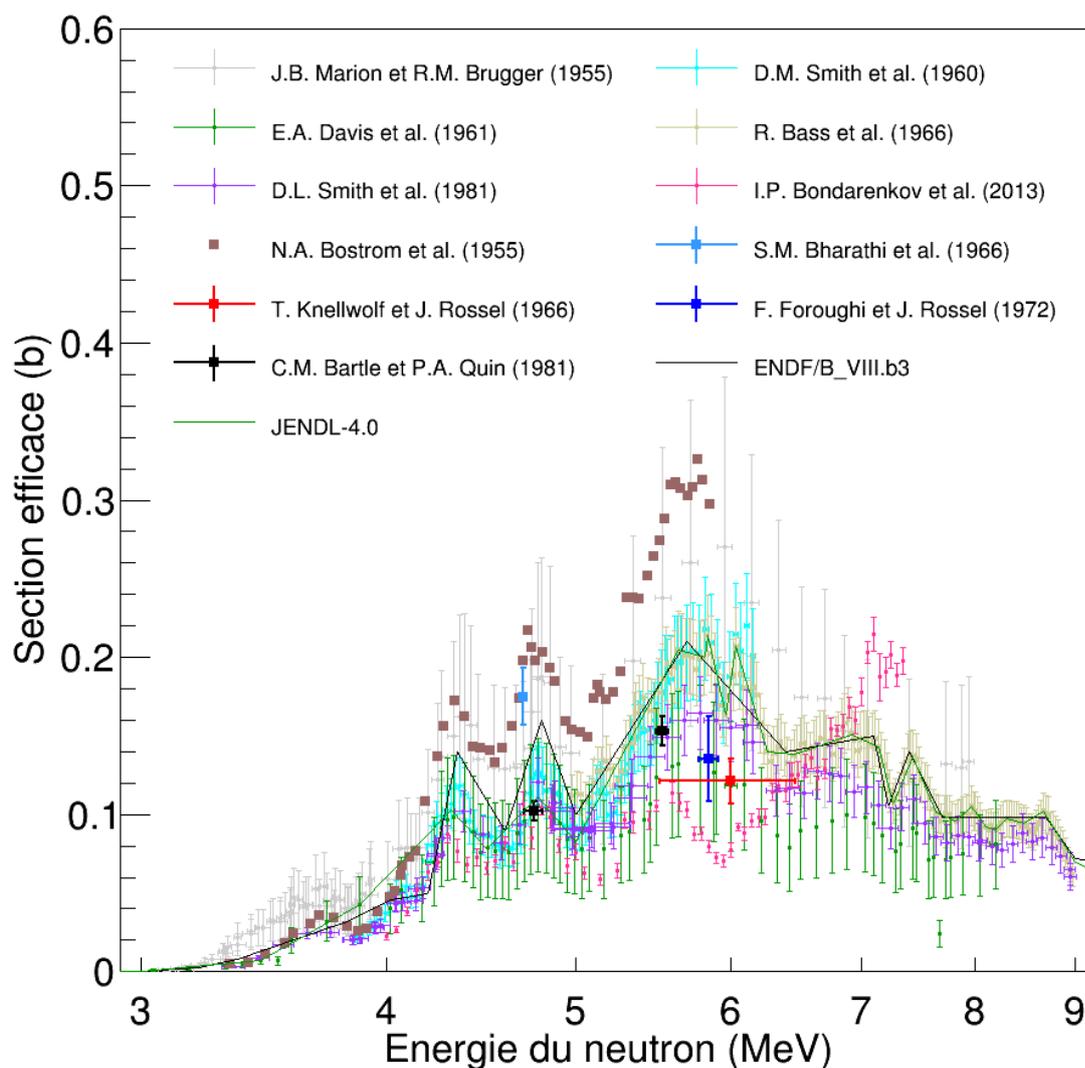


FIGURE 1.12 – Principales mesures expérimentales de la section efficace de la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  du seuil à 9 MeV (échelle logarithmique en abscisse). Les résultats expérimentaux sont comparés avec les évaluations ENDF/B-VII.1 et JENDL-4.0 (courbe noire et verte respectivement).

En 1955, J.B. Marion et R.M. Brugger [84] du Rice Institute de Houston sont les premiers expérimentateurs à évaluer la fonction d'excitation de la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$ . Ils ont étudié la radioactivité induite par des neutrons mono-énergétiques sur le fluor en bombardant un cristal de  $\text{CaF}_2$  avec des neutrons sur un intervalle en énergie de 3,1 à 8 MeV. La même année, N.A. Bostrom *et al.* [85] ont estimé la section efficace de la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  avec la méthode d'activation en utilisant un cristal de  $\text{CaF}_2$ . Ils ont déterminé ainsi la section efficace sur une gamme relativement étendue (de 3,33 à 5,86). Pas d'estimations ont été faites par les expérimentateurs sur les incertitudes des résultats.

En 1960 D.M. Smith *et al.* [86] ont étudié la scintillation d'un cristal  $\text{BaF}_2$  en réalisant 112 mesures pour des neutrons compris entre 3,87 et 6,16 MeV. R. Bass *et al.* [87] ont estimé la section efficace de la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  sur une gamme en énergie assez étendue (162 mesures entre 4,98 et 8,975 MeV) avec une erreur de 12% sur la section efficace sur toute cette gamme en énergie. C.M. Bartle et P.A. Quin [89], de l'University of Wisconsin, ont mesuré en 1981 la section efficace des réactions (n,p) et (n, $\alpha$ ) sur le  $^{40}\text{Ca}$  en utilisant un  $\text{CaF}_2$ . La section efficace des réactions sur le  $^{19}\text{F}$  pour deux énergies de neutrons (4,76 et 5,54 MeV) a été estimée respectivement à  $102 \pm 6$  mb et  $153 \pm 9$  mb. En 1972 F. Foroughi et J. Rossel, de la même équipe que T. Knellwolf, [88] ont estimé la section efficace de la réaction à  $135 \pm 27$  mb pour des neutrons de 5,85 MeV.

Le fluor peut également être présent sous la forme de téflon  $(\text{CF}_2)_n$ . En 1966, S.M. Bharathi *et al.* [90] ont déterminé la section efficace de la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  à 4,7 MeV par l'étude de la distribution en angle des particules  $\alpha$  émises. La section efficace a été estimée à  $175 \pm 18$  mb. En 1966, également, T. Knellwolf et J. Rossel [91] de l'Université de Neuchâtel ont étudié la section efficace de la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  avec deux compteurs proportionnels. Le fluor se trouve sous forme de  $\text{CaF}_2$ , mais également sous forme de téflon. La réaction (n, $\alpha$ ) sur le  $^{19}\text{F}$  est étudiée :  $121 \pm 14$  mb. D.L. Smith *et al.* en 1981 [92] ont étudié la section efficace du seuil à 9 MeV avec une chambre à fission.

Seules deux expériences ont été réalisées en utilisant une chambre d'ionisation avec du gaz fluoré. Il s'agit des expériences de E.A. Davis *et al.* [93] et I.P. Bondarenko *et al.* [94, 95]. E.A. Davis *et al.* [93] ont estimé en 1961 la section efficace sur une gamme en énergie de 2,89 à 8,20 MeV, en utilisant une chambre d'ionisation, remplie de gaz  $\text{BF}_3$ . En 2013 I.P. Bondarenko *et al.* [94, 95] sont les premiers à étudier le fluor pour la physique des réacteurs. En effet les sections efficaces estimées sur cet isotope sont d'une grande importance pour les réacteurs à sels fondus (sur la cinétique des réactions nucléaires). Provenant de la même équipe de Khryachkov *et al.* [1], ils ont utilisé le même dispositif expérimental. Leurs résultats, comparés avec les résultats expérimentaux disponibles, diffèrent.

Ces études expérimentales sont représentées sur la figure 1.12. Les estimations réalisées par D.M. Smith *et al.* [86] et R. Bass *et al.* [87] sont en cohérence avec les évaluations ENDF/B-VII.1 et JENDL-4.0. Les données issues de N.A. Bostrom *et al.* [85] sont, à partir de 4 MeV, au-dessus des évaluations faites sur la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$ . A contrario, les estimations faites par J.B. Marion et R.M. Brugger en 1955 [84] et par E.A. Davis *et al.* [93] ont des désaccords avec les évaluations, même si à certaines énergies les données sont cohérentes, aux incertitudes près.

Les résultats de I.P. Bondarenko et al. [94, 95] sont également très différents des autres données (expérimentales et évaluées) disponibles, surtout de 5,5 à 7,35 MeV.

### 1.2.2.3.3 Études de la section efficace pour des neutrons de 13 MeV et plus

Quelques expériences de mesures de section efficace sur la réaction  $^{19}\text{F}(\alpha, n)^{16}\text{N}$  ont été exécutées pour des neutrons d'énergie supérieure à 13 MeV. Il s'agit des expériences de J. Picard et C.F. Williamson [96], R. Prasad *et al.* [97], G. Staudt *et al.* [98, 99], P.N. Ngoc [100] et A. Durusoy et I.A. Reyhancan [101].

En 1965, J. Picard et C.F. Williamson [96], du CEA de Saclay, ont étudié les réactions (n,p), (n, $\alpha$ ) et (n,2n) sur le  $^{19}\text{F}$  et le  $^{23}\text{Na}$  entre 13 et 21 MeV en utilisant un détecteur à scintillation et un cristal de  $\text{CaF}_2$ . En 1966, R. Prasad *et al.* [97] ont étudié les réactions (n,p) et (n, $\alpha$ ) sur certains noyaux avec des neutrons de 14,8 MeV. La section efficace de la réaction (n, $\alpha$ ) sur le  $^{19}\text{F}$  a été estimée à  $24 \pm 5$  mb. En 1974, G. Staudt *et al.* de l'Universität Tübingen [98, 99] ont étudié la section efficace des réactions  $^{19}\text{F}(n, \alpha_{0,1,2,3})^{16}\text{N}$  en utilisant deux compteurs proportionnels. La section efficace est estimée à  $27,5 \pm 5,3$  mb et  $17,5 \pm 3,4$  mb, pour des neutrons d'énergie  $13,9 \pm$  MeV et  $15,6 \pm$  MeV respectivement.

P.N. Ngoc [100], sur son sujet de thèse, a travaillé sur les réactions (n,p), (n, $\alpha$ ) et (n,2n). Avec des neutrons de  $14,6 \text{ MeV} \pm 0,2 \text{ MeV}$  la section efficace est estimée à  $18,9 \pm 1,9$  mb. En 2006, A. Durusoy et I.A. Reyhancan [101], par la méthode d'activation, ont estimé la section efficace de la réaction  $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$  pour des neutrons de 14 MeV. Leur motivation est d'améliorer les données pour les neutrons de cette énergie (ces données sont importantes pour les réacteurs nucléaires à fusion).

La figure 1.13 (en page 35) représentent les estimations faites à partir de 14 MeV sur la section efficace de la réaction  $^{19}\text{F}(\alpha, n)^{16}\text{N}$ . Les résultats des expériences sont très différents entre eux. Les évaluations représentées (ENDF/B-VII.1 et JENDL-4.0) sont également en désaccord.

### 1.2.2.3.4 Résumé des expériences sur le fluor

Le tableau 1.5 (en page 36) liste les expériences réalisées sur la mesure de la section efficace de la réaction  $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$  en fonction du type de détecteur utilisé. En plus des trois sortes de source de neutrons présentées dans le tableau 1.2 (à savoir les sources D–D, D–T et P–T), la source P–Li produit des neutrons à partir de la réaction  $^7\text{Li}(^1\text{H}, ^1\text{n})^7\text{Be}$ . Très peu d'expériences ont utilisé une chambre d'ionisation, mais elles ont permis l'étude de la section efficace sur une gamme en énergie neutronique assez élargie à faible énergie. Les noyaux cibles de fluor (dans ces cas) doivent se trouver sous forme gazeuse.

La section efficace de la réaction  $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$  a été représentée sur les gammes en énergie comprises entre le seuil et 9 MeV et entre 13,5 et 20 MeV (respectivement sur les figures 1.12 et 1.13).

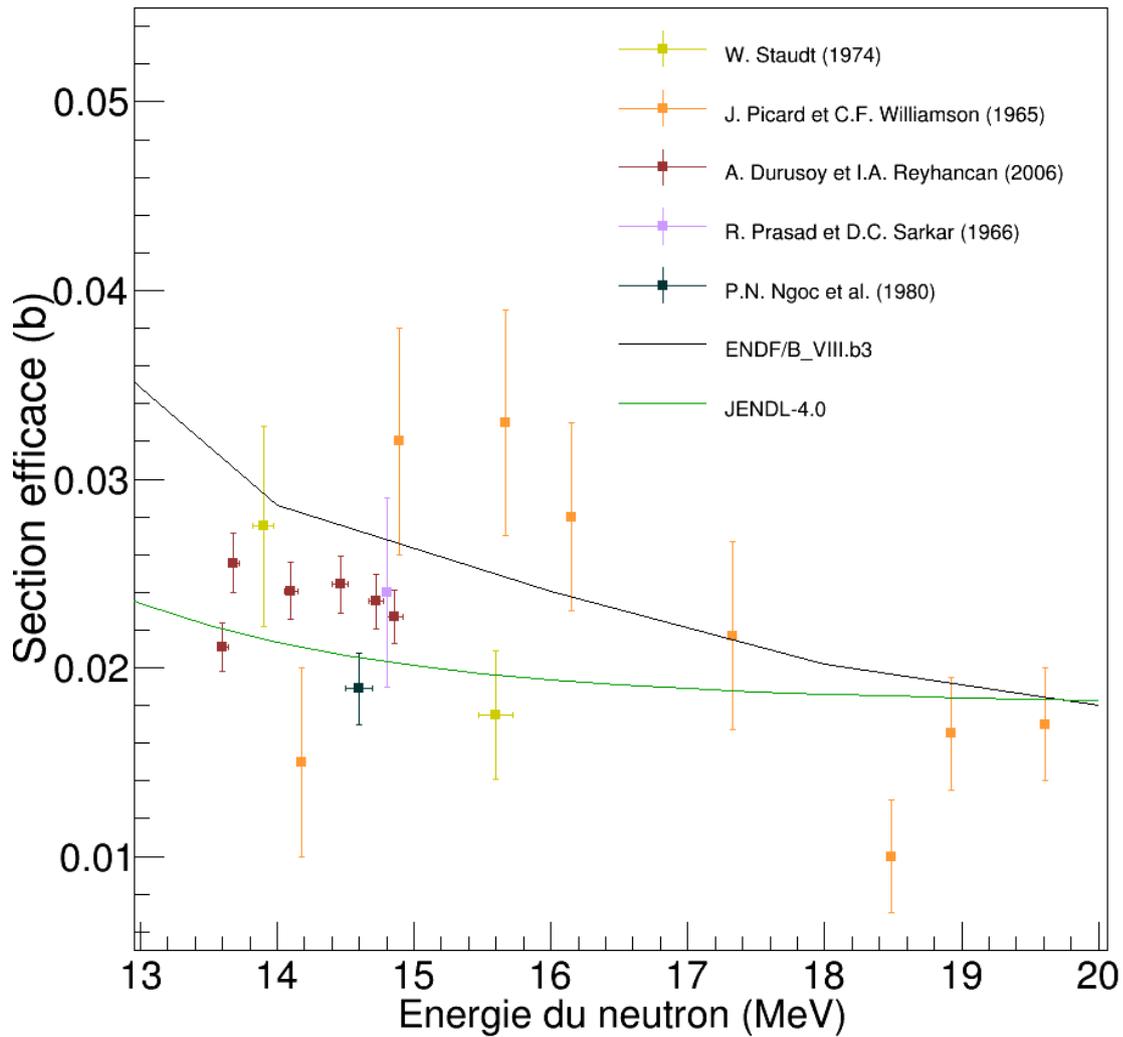


FIGURE 1.13 – Principales mesures expérimentales de la section efficace de la réaction  $^{19}\text{F}(\alpha,n)^{16}\text{N}$  de 13 à 20 MeV. Les résultats expérimentaux sont comparés avec les évaluations ENDF/B-VII.1 et JENDL-4.0 (courbe noire et verte respectivement).

1.2. LA PRODUCTION DES PARTICULES ALPHA DANS LES RÉACTIONS  
INDUITES PAR NEUTRON

Détecteur	Référence	Gamme en énergie	Source de neutron	Cible
CI	E.A. Davis [93]	[2, 89 -8, 2 ]	P-T, P-Li, D-D	BF <sub>3</sub>
	I.P. Bondarenko [94, 95]	[4 -7, 35 ]	D-D	CF <sub>4</sub>
AUTRE	J.B. Marion [84]	[3, 09 -7, 94 ]	P-T et D-D	CaF <sub>2</sub>
	N.A. Bostrom [85]	[3, 33 -5, 86 ]		CaF <sub>2</sub>
	D.M. Smith [86]	[3, 868 -6, 156 ]	D-D	BaF <sub>2</sub>
	J. Picard [96]	[14, 18 -21 ]	D-T	CaF <sub>2</sub>
	R. Bass [87]	[4, 98 -8, 975 ]	D-D	CaF <sub>2</sub>
	S.M. Bharathi [90]	4, 7	P-T	Téflon
	T. Knellwolf [91]	6	D-D	CaF <sub>2</sub> , téflon
	R. Prasad [97]	14, 8	D-T	Poudre
	F. Foroughi [88]	5, 85	D-D	CaF <sub>2</sub>
	W. Staudt [98, 99]	13, 9 et 15, 6	D-T	Téflon
	P.N. Ngoc [100]	14, 6	D-T	Poudre
	C.M. Bartle [89]	4, 76 et 5, 54	D-D	CaF <sub>2</sub>
	D.L. Smith [92]	[3, 344 -8, 949 ]	P-Li, D-D	Téflon
A. Durusoy [101]	[13, 6 -14, 86 ]	D-T	Téflon	

TABLEAU 1.5 – Liste des expériences de mesure de la section efficace de la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  triées par rapport au détecteur utilisé. La catégorie "CI" se réfère aux expériences utilisant une chambre d'ionisation tandis que la catégorie "AUTRE" regroupe les expériences où d'autres types de détecteurs sont utilisés (chambre à brouillard, compteurs proportionnels, ...).

Les évaluations faites par les bibliothèques ENDF/B-VII.1 et JENDL-4.0 sont cohérentes entre elles jusqu'à des neutrons d'énergie de 9 MeV. Ces évaluations sont ensuite en désaccord.

Pour toutes les études antérieures à 2006, la motivation des mesures concernait l'amélioration des données en physique nucléaire. A l'instar des études faites sur la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ , les études entreprises ultérieurement sur la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  [101, 94, 95] ont été motivées pour les données nucléaires en physique des réacteurs. Néanmoins, ces dernières mesures expérimentales sont en désaccord avec les évaluations présentées, qui se basent en partie sur les autres données expérimentales.

### 1.2.3 Évaluations des données nucléaires

Les bases de données sont élaborées à partir des données expérimentales et par des physiciens spécialisés, les évaluateurs, qui reconstruisent la section efficace. Les expériences présentées précédemment ont démontré que le travail des expérimentateurs était concentré sur certaines valeur en énergie cinétique, et non sur une gamme en énergie étendue.

Les bases de données sont primordiales pour les différentes études. Dans la physique des réacteurs, elles sont à la base de l'étude de la neutronique et de la radioprotection. Elles sont également utilisées pour les codes de calcul de type Monte Carlo et déterministes [102].

En physique nucléaire et en physique des réacteurs, les sections efficaces sont importantes. Elles doivent être accessibles à toute personne le nécessitant et être déterminées sur une gamme en énergie étendue [103]. Selon A. Trkov *et al.* du NNDC<sup>11</sup>, une évaluation est le processus d'analyse de paramètres physiques mesurées expérimentalement (tels que les sections efficaces), en les combinant avec les prédictions de calculs de modèles nucléaires, et de tenter d'en extraire les valeurs réelles de ces paramètres [104].

Actuellement, les principales bibliothèques de données nucléaires, concernant les réactions induites par neutrons utilisées en physique des réacteurs (et dans une moindre mesure en physique nucléaire), sont les suivantes [105, 103] :

- **ENDF** (États-Unis), pour *Evaluated Nuclear Data File*. Il s'agit d'une des principales bibliothèques les plus utilisées dans le monde. Les premières versions (ENDF/A et ENDF/B) datent du milieu du XX<sup>ème</sup> siècle (1974 pour la version ENDF/B-IV). Ont suivi ensuite le ENDF/B-V (1979), la ENDF/B-VI (qui a été mise à jour régulièrement, la huitième version datant de 2002), puis la ENDF/B-VII (ENDF/B-VII.0 en 2006, ENDF/B-VII.1 en 2011) et la ENDF/B-VIII en 2016 (pour les versions bêta ENDF/B-VIII.B3 et ENDF/B-VIII.B4 en 2017).
- **JEFF** (Union Européenne) pour *Joint Evaluated Fission and Fusion file*, provenant du NEA. La première version (JEF), projet commençant en 1982, fut publiée en 1985. Furent ensuite publiées d'autres versions (JEF-2.2 en 1992, JEFF-3.0 en 2002, JEFF-3.1, JEFF-3.1.1, JEFF-3.1.2) jusqu'à la dernière version (JEFF-3.2) en mars 2014. Toutes ces versions suivent la version similaire de la bibliothèque ENDF.
- **JENDL** (Japon), pour *Japanese Evaluated Nuclear Data Library*, provenant du NDC (Nuclear Data Center) du JAEA (Japan Atomic Energy Agency).
- **TENDL** (Pays-Bas) : pour *Talys-based Evaluated Nuclear Data Library*, du NRG à Petten au Pays-Bas.
- **CENDL** (Chine), pour *Chinese Evaluated Nuclear Data Library*. Provenant du CNDC<sup>12</sup>, la dernière version (CENDL-3.1) date de décembre 2009, les premières ayant été publiées à la fin du XX<sup>ème</sup> siècle (1995 pour la version CENDL-2.1).
- **ROSFOND** (Russie) : La bibliothèque ROSFOND-2010 correspond à la version ENDF/B-VII.0.

Les principales versions de ces bibliothèques sont adaptées, concernant les réactions induites par neutron, pour des énergies allant jusqu'à 30 MeV environ. D'autres versions sont spécifiques aux hautes énergies (jusqu'à 150 MeV).

### 1.2.3.1 Les évaluations de la réaction (n,α) sur l'oxygène

Une des principales bibliothèques utilisées est l'américaine ENDF. La première évaluation de ENDF sur la réaction d'intérêt apparaît en 1973 dans la cinquième version.

---

11. National Nuclear Data Center, organisation appartenant au BNL (Brookhaven National Laboratory) aux Etats-Unis.

12. China Nuclear Data Center

L'évaluation de la réaction correspond à la somme des évaluations des sections efficaces partielles  $(n,\alpha_0)+(n,\alpha_1)+(n,\alpha_2)+(n,\alpha_3)$  qui proviennent des données expérimentales de, entre autre, de E.A. Davis *et al.* [55], de D. Dandy *et al.* [58], de Sick *et al.* [106], de Bair and Haas [70], de McDicken et Jack [59], de Maxson et Murphy [107], et de Leroux *et al.* [61].

En 2001, le LANL (Los Alamos National Laboratory) réévalue la section efficace de la réaction dans la troisième modification de la sixième version de ENDF. L'énergie maximale est de 30 MeV (20 MeV dans les versions précédentes). L'évaluation de la section totale est la somme des sections efficaces partielles. Jusqu'à 6,2 MeV, l'évaluation est faite à partir de données expérimentales de la réaction inverse, dont Bair et Haas [70]. Après 6,2 MeV, elles proviennent des données expérimentales listées précédemment, mais certaines estimations ont été réajustées (comme les estimations de E.A. Davis *et al.* [55] et D. Dandy *et al.* [58]) pour qu'elles soient cohérentes avec les analyses de Bair et Haas sur la section  $(n,\alpha_0)$ .

En 2005, la septième version de ENDF (ENDF/B-VII.0) est sortie. Par rapport à la précédente version, les données expérimentales des réactions  $(n,\alpha_0)$  pour les énergies de neutron inférieures à 8.9 MeV ont été réduites de 32%. Lors des expériences d'Harissopulos *et al.* [72] en 2005, il s'est avéré que leurs données sont 32% plus basses que celles de Bair et Haas [70]. Les évaluateurs ont pris pour référence les données d'Harissopulos *et al.* et ont donc baissé de 32% leur évaluation. En 2011, est sortie l'évaluation ENDF/B-VII.1 identique à la version précédente concernant la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ .

Cependant en 2016 est publiée une nouvelle évaluation de ENDF. Les versions bêta publiées (ENDF/B-VIII.B3 en 2016 et ENDF/B-VIII.B4 en 2017), elles ont été réajustées. Concernant la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ , ces deux évaluations sont similaires. A partir de nouvelles analyses (matrice R) sur le  $^{17}\text{O}$  pour des énergies inférieures à 7 MeV ont démontré que la précédente baisse de 32% était trop excessive. Une nouvelle normalisation a donc été réalisée.

La première évaluation de la réaction par JENDL a été réalisée en 2001 (pour la version JENDL-3.2), à partir des données expérimentales de E.A. Davis *et al.* [55], de Sick *et al.* [106], d' A.S Divatia *et al.* [56], et de J.K. Bair et F.X. Haas [70]. En 2002, est publiée la version JENDL-3.3, identique à la version précédente concernant la réaction. En 2009, est publiée la version JENDL-4.0. Elle est identique aux versions précédentes, sauf pour les énergies inférieures à 6.5 MeV où elle correspond à la bibliothèque ENDF/B-VII.0. En 2004, apparaît la version pour les hautes énergies (JENDL/HE-2004). La réaction n'est pas évaluée, mais la production d'alpha en revanche l'est (c'est l'ensemble des réactions où une particule  $\alpha$  est émise). Cette version prend comme base la version JENDL-3.3.

Sur la figure 1.14 (en page 39), sont représentées les évaluations ENDF/V-VII.1 et ENDF/V-VIII.B3, JEFF-3.2 et JENDL-4.0 (respectivement en rouge, noir, bleu et en vert). Du seuil jusqu'à une énergie de 6 MeV, les évaluations ENDF/V-VII.1, JEFF-3.2 et JENDL-4.0 sont cohérentes entre elles pour l'estimation de la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ . A partir de 6 MeV les estimations faites par ces trois bibliothèques divergent. Les écarts, dues entre autres aux différences entre les données expérimentales, sont surtout très importants entre 6 et 9 MeV environ.

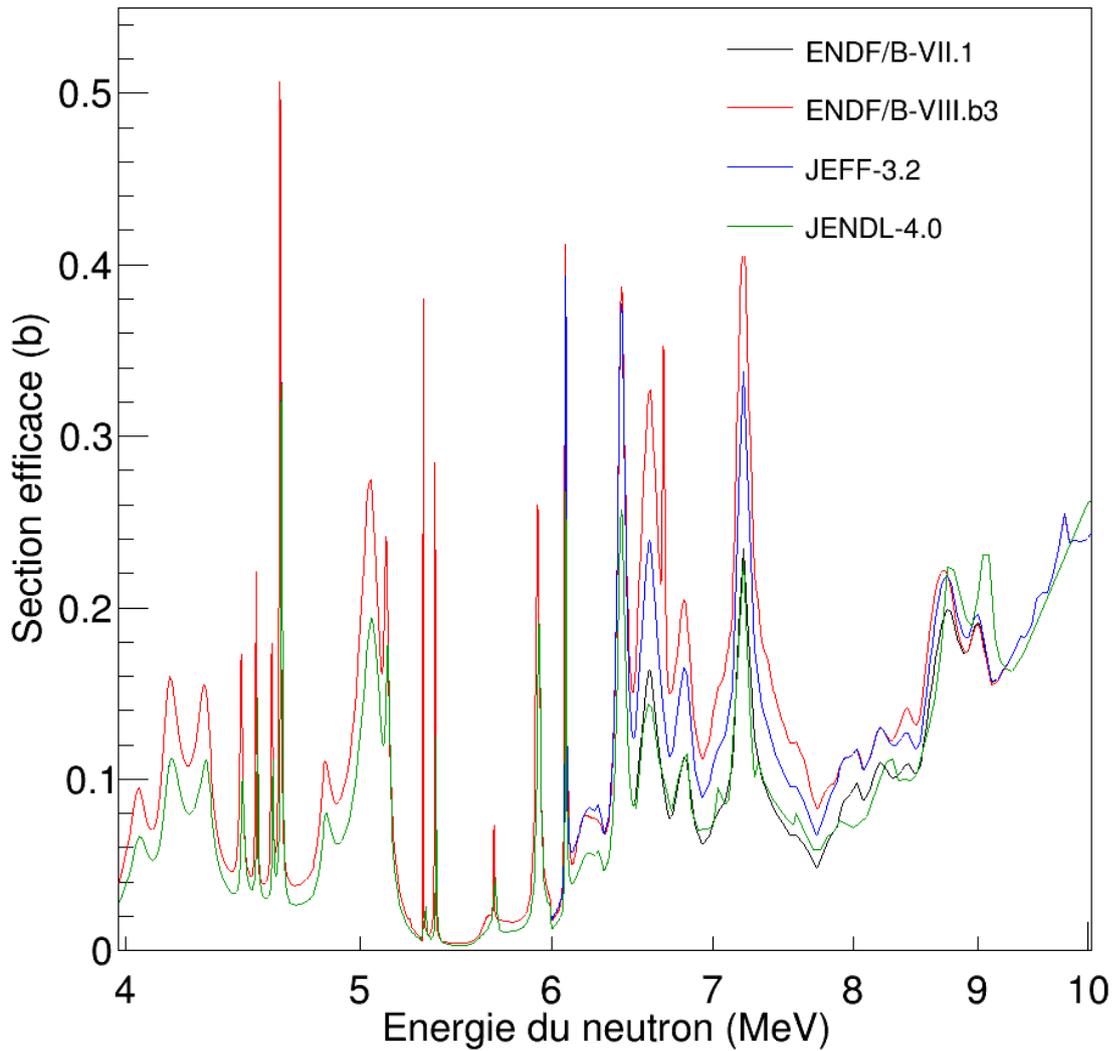


FIGURE 1.14 – Principales dernières évaluations de la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  sur une gamme en énergie de 4 à 10 MeV (échelle logarithmique en abscisse). Les versions bêta ENDF/B-VIII.B3 et ENDF/B-VIII.B4 sont confondues.

Sur toute la gamme en énergie représentée sur la figure 1.14, l'évaluation ENDF/V-VIII.B3 est systématiquement au-dessus des autres évaluations.

### 1.2.3.2 Les évaluations de la réaction $(n,\alpha)$ sur le fluor

A l'instar des évaluations faites sur la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ , les dernières bibliothèques utilisées (ENDF/V-VIII.B3 et JENDL-4.0) pour la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  se basent respectivement sur une version antérieure d'ENDF et de JENDL. Les estimations faites par les bibliothèques ne sont donc pas à jour. De plus il y a beaucoup d'états excités sur les noyaux  $^{20}\text{F}$  et  $^{16}\text{N}$ . Les résonances dues à ces deux noyaux sont visibles sur les courbes, mais ces résonances ne sont pas discriminées. Les données expérimentales utilisées par les bibliothèques sont les données de Bass *et al.* [87], de Smith *et al.* [92] et de E.A. Davis *et al.* [93]. Les dernières évaluations sont toutes identiques entre elles sauf l'évaluation JENDL-4.0 qui montre quelques différences, notamment du seuil à 6 MeV et de 9 à 20 MeV. Ces deux évaluations sont représentées sur la figure 1.15 (en page 41). Il y a de grandes différences sur les évaluations pour les résonances entre 4 et 6 MeV. De 6 à 8 MeV les estimations sont cohérentes entre elles. A plus haute énergie des différences sont visibles entre 9 et 18 MeV. Concernant la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$ , les évaluations JEFF-3.2, ENDF/V-VII.0, ENDF/V-VII.1, ENDF/V-VIII.B3 et ENDF/V-VIII.B4 sont confondues. Seule l'évaluation JENDL-4.0 est différente des autres.

### 1.2.4 Conclusion sur les évaluations

Les données expérimentales sur la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  ne sont pas cohérentes entre elles. Ces différences impliquent des désaccords sur les évaluations de bases de données nucléaires, surtout entre 6 et 9 MeV. Les dernières évaluations publiées (les version bêta ENDF/V-VIII.B3 et ENDF/V-VIII.B4) ont des valeurs supérieures aux autres évaluations (ENDF/B-VII.1, JEFF-3.2 et JENDL-4.0).

En 2013, le projet CIELO [19] a rappelé, entre autre, que les dernières évaluations faites (à l'époque les évaluations ENDF/B-VII.0 et ENDF/B-VII.1) sont cohérentes avec les données expérimentales en-dessous de 6 MeV (soit les données expérimentales de Giorginis *et al.* à l'IRMM [57], celles de Khryachkov *et al.* à l'IPPE [1], et celles de Bair et Haas [70] sur la réaction inverse à l'ORNL mais avec une baisse de 20%), mais en (profond) désaccord avec les données en-dessus. Néanmoins, les données de Giorginis *et al.* de 2007 sont en désaccord avec les estimations faites par Hale à partir de la matrice R pour les énergies proches du seuil [20].

Les mesures expérimentales faites sur la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  semblent, au premier abord, être cohérentes entre elles. L'évaluation JEFF-3.2 est confondue avec toutes celles d'ENDF (ENDF/V-VII.0, ENDF/V-VII.1, ENDF/V-VIII.B3 et ENDF/V-VIII.B4). Seule, l'évaluation JENDL-4.0 est différente des autres. Néanmoins, les dernières expériences faites par Bondarenko *et al.* en 2013 ne sont pas cohérentes avec ces évaluations. Les différences entre les données expérimentales et les évaluations des sections efficaces des réactions  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  et  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  montrent qu'il faut réduire ces écarts et qu'il est nécessaire de faire de nouvelles mesures.

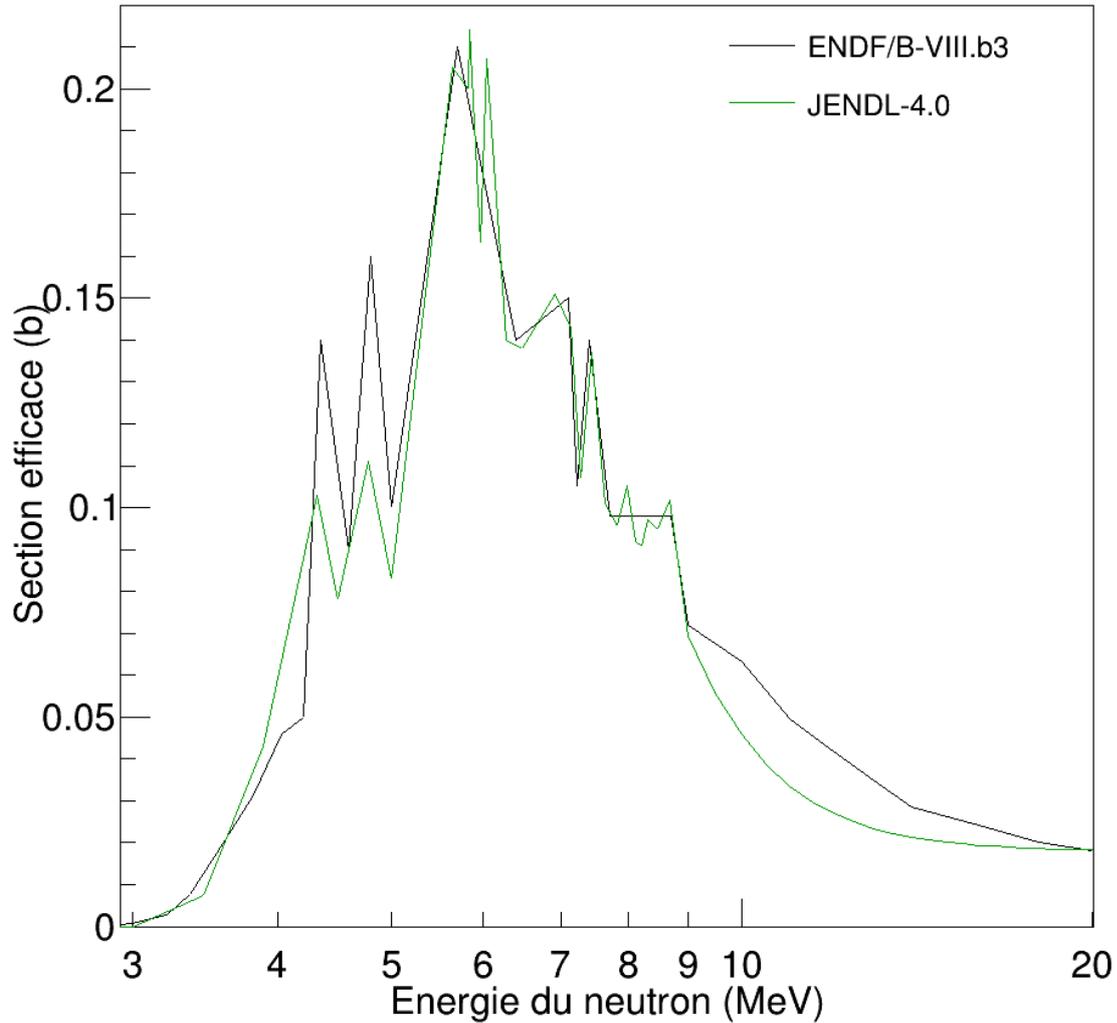


FIGURE 1.15 – Principales évaluations de la section efficace de la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  sur une gamme en énergie de 3 à 20 MeV (échelle logarithmique en abscisse). Les évaluations JEFF-3.2, ENDF/V-VII.0, ENDF/V-VII.1 et ENDF/V-VIII.B4 sont confondues avec l'évaluation ENDF/V-VIII.B3.

## 1.3 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons exposé l'importance de la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  pour la physique nucléaire et pour la physique des réacteurs. L'oxygène étant présent au sein même des combustibles nucléaires, la production à l'intérieur des gaines amènent des contraintes à long terme. A cause de la non-justesse des résultats et des trop grands désaccords existants, cette production de gaz ne peut être quantifiée correctement. Les écarts existants sur la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  ont également une influence sur la précision de l'estimation du  $k_{\text{eff}}$ .

La précision de cette section efficace a donc une importance en physique nucléaire spécifique à la physique des réacteurs (pour les réacteurs nucléaires ayant de l'oxygène dans leurs éléments combustibles). La prise en compte de ce problème par de grands organismes de renom dans le domaine du nucléaire en recherche scientifique démontre que la recherche de précision, pour la détermination et la mesure de la section efficace de cette réaction, est d'une importance certaine, aussi bien pour l'amélioration des données nucléaires, que pour la sûreté de certains types de réacteurs nucléaires.

Il faut multiplier les données indépendantes en utilisant différentes sortes de détecteurs, différentes installations ou différentes équipes afin d'augmenter les données disponibles pour les évaluations, en plus d'améliorer la précision. L'estimation (également avec précision) de la section efficace de la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  est aussi d'une importance certaine en données nucléaires. Cette probabilité d'interaction pourrait être utilisée pour la physique des réacteurs liées aux réacteurs à sels fondus<sup>13</sup>.

Dans le chapitre suivant sera présenté la réponse du LPC, laboratoire de recherche scientifique, pour l'amélioration des données nucléaires concernant la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  et de la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$ . Ce projet a pour nom SCALP.

---

13. La section efficace de la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  est, dans le cadre du projet dans lequel se situe cette thèse, intéressante comme étude de faisabilité pour la mesure de la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ .

# Chapitre 2

## Le projet SCALP

Le projet SCALP est un projet initié par le LPC, Laboratoire de Physique Corpusculaire de Caen [108] en Normandie, plus précisément par le groupe GRACE (groupe *Aval du Cycle Electronucléaire*) [109], depuis 2014. Le projet SCALP a pour but d'étudier les réactions induites par neutrons émettant une particule  $\alpha$  (concernant les réactions nucléaires d'intérêt pour les réacteurs nucléaires).

SCALP signifie "Scintillating ionization Chamber for **A**Lpha particle **P**roduction in neutron induced reactions". Il s'agit d'une chambre d'ionisation scintillante dimensionnée dans le but de quantifier la production de particules  $\alpha$  suivant une interaction avec des neutrons. SCALP s'inspire du dispositif expérimental de Giorganis *et al.* [57] de 2007 et Khryachkov *et al.* [1] de 2012. Le projet SCALP se propose donc de mesurer la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  sur une gamme en énergie allant du seuil de la réaction (i.e. 2,36 MeV) jusqu'à 20 MeV.

La chambre d'ionisation scintillante est remplie d'un mélange gazeux de tétrafluorure de carbone ( $\text{CF}_4$ ) et de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ). La composition exacte de ce mélange a fait l'objet de test en laboratoire et est le travail préliminaire au projet SCALP. La chambre doit ensuite être configurée pour l'acquisition et la discrimination des signaux émis par la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ . Dans un premier temps, vu que les principales recherches doivent se focaliser sur la zone en énergie où l'influence sur les paramètres cinétiques d'un réacteur nucléaire est la plus importante, le dispositif expérimental sera étudié pour être adapté sur une gamme en énergie plus réduite (jusqu'à 10 MeV).

### 2.1 Principe général du projet SCALP

SCALP est une chambre d'ionisation scintillante (le principe sera expliqué dans la partie suivante 2.3). La chambre est remplie d'un mélange de gaz (à pression atmosphérique) qui permet, à partir des interactions des neutrons sur ces noyaux, d'utiliser deux principes physiques fondamentaux : l'**ionisation** et la **scintillation** du gaz. Ce gaz est un mélange de  $\text{CF}_4$  (gaz scintillant) et de  $\text{CO}_2$  (gaz contenant les atomes cibles).

Le but du projet SCALP est de déterminer la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ . Les différentes réactions nucléaires prenant place doivent par conséquent être différenciées. A partir des deux principes fondamentaux rappelés précédemment, la discrimination des réactions est possible :

- l'**ionisation** du gaz, par l'utilisation de la chambre d'ionisation, permet de déterminer l'énergie déposée dans la chambre lors d'une réaction.
- par le principe de **scintillation**, les photons émis lors d'une réaction  $(n,\alpha)$  sont collectés par des photomultiplicateurs. Le moment où ces neutrons sont émis (à partir de l'appareillage de la ligne de faisceau) est enregistré et le temps de vol peut être déterminée. Ainsi, l'énergie des neutrons incidents peut être déduite.

Si l'énergie déposée dans la chambre par les particules  $\alpha$  produites dans la réaction et le temps de vol sont mesurés avec une bonne précision, il sera alors possible de discriminer les différentes voies de réaction possibles dans le mélange gazeux. En discriminant les réactions nucléaires d'intérêts (les bilans des réactions  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  et  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  ne sont séparés que de 0,7 MeV), la section efficace attendue de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  pourra être mesurée.

### 2.1.1 Ionisation du gaz

Les neutrons sont de charge électrique neutre. Ces particules ne provoquent pas d'ionisation directe, et elles interagissent seulement par réaction nucléaire. Ce sont les particules émises (protons, deutons, tritons, alpha) et les noyaux résiduels qui interagissent avec la matière environnante : dans le cas des réactions  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  et  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$ , ce sont les particules alphas et les noyaux  $^{13}\text{C}$  et  $^{16}\text{N}$  qui vont induire au cours de leur ralentissement une ionisation et/ou une excitation des molécules du gaz environnant.

Les particules chargées interagissent avec la matière par interaction coulombienne principalement avec les électrons du cortège électronique. L'énergie échangée peut être telle qu'il peut y avoir excitation des atomes (électron passant à un niveau énergétique supérieur) ou ionisation (production d'une paire électron-ion positif).

L'énergie transférée de la particule chargée à l'électron étant très faible (1/500 de l'énergie par nucléon [3]), cette particule doit interagir plusieurs fois pour perdre toute son énergie cinétique sur son passage dans le gaz. Les noyaux chargés émis après la réaction (les particules chargées et les noyaux résiduels) emportent tout ou une partie de l'énergie cinétique du neutron ayant interagi. L'énergie déposée lors de l'interaction dans la chambre est récupérée par la chambre d'ionisation.

### 2.1.2 Scintillation du gaz

La scintillation est le processus dans lequel des photons sont émis, quand des particules énergétiques se trouvent dans un milieu scintillant. Suite à une interaction avec une particule incidente, le noyau cible est excité : un électron de son cortège électronique passe à un niveau énergétique supérieur. La désexcitation de ce noyau va émettre un photon. Par conséquent, de la lumière (sous forme de photons lumineux) est émise le long de la trajectoire de la particule incidente. Les photomultiplicateurs, centrés sur le volume de gaz de détection à l'intérieur de la chambre, vont ensuite récupérer le maximum de photons lumineux qui seront émis après émission de particules chargées.

Le tétrafluorométhane  $\text{CF}_4$  est une molécule scintillante [110, 111, 112, 2, 113, 114]. Selon R. Gernhäuser *et al.* [2], le spectre lumineux des photons émis après la scintillation des

molécules de  $\text{CF}_4$  est représenté en figure 2.1. Ces photons sont émis principalement dans l’ultraviolet. Un pic est visible dans le spectre à une longueur d’onde d’environ 160 nm et à partir d’une longueur d’onde de 220 nm jusqu’au proche visible (jusqu’à environ 500 nm d’après U. Müller *et al.* [111] qui étudièrent également l’émission ultraviolet du  $\text{CF}_4$ ).

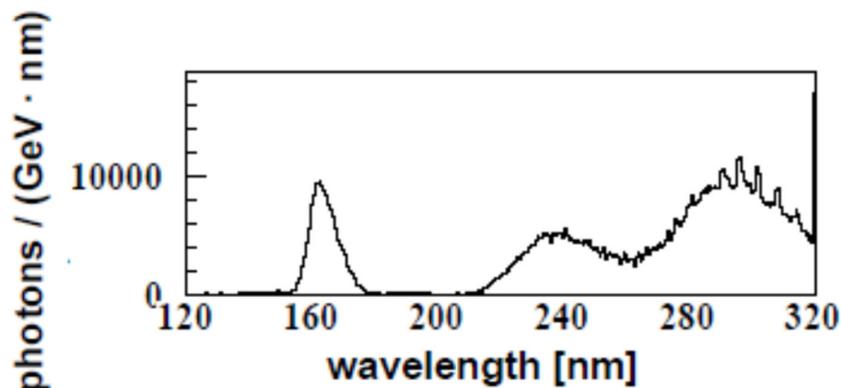


FIGURE 2.1 – Spectre lumineux des photons émis par la scintillation du  $\text{CF}_4$  (issu de Gernhäuser [2]).

Les photons émis suite à une réaction induite par les particules  $\alpha$  (scintillation) furent étudiés par Pansky *et al.* en 1995 [112]. Ils en déterminèrent le rendement de scintillation lumineux des molécules de  $\text{CF}_4$  à  $315 \pm 95$  photons/MeV sur un angle solide de  $4\pi$  pour des photons de longueur d’ondes [150 - 220 nm]. Le rendement lumineux total (intégré sur l’ensemble du spectre en longueur d’onde) sur un angle solide de  $4\pi$  est de 1200 photons/MeV. La scintillation du  $\text{CF}_4$  est due aux émissions des ions excités  $\text{CF}_4^+$  et aux molécules excités  $\text{CF}_3^+$  [110, 112, 113, 114].

Le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) a l’effet inverse : c’est une molécule désactivateur [114, 115, 116, 117]. La molécule de  $\text{CO}_2$ , dans un mélange de gaz avec du  $\text{CF}_4$ , va absorber l’énergie émise lors de la désexcitation des molécules de  $\text{CF}_4$ . Par conséquent, plus la présence du dioxyde de carbone dans un mélange ( $\text{CF}_4/\text{CO}_2$ ) sera importante, plus la scintillation de ce mélange sera faible. Cet effet fut remarqué par T. Blake *et al.* [114].

### 2.1.3 Discrimination des réactions

Le but du dispositif SCALP est de pouvoir discriminer toutes les réactions nucléaires où une ou plusieurs particules chargées sont émises. La détection avec précision des signaux dues à l’ionisation du gaz grâce à la chambre d’ionisation est primordiale : cela permet de mesurer l’énergie déposée dans la chambre de manière précise. La scintillation du gaz permet de déterminer le moment où une interaction a lieu. Le départ des neutrons est donné par l’installation nucléaire. Sur une base de vol connue, sachant le temps de vol entre la source de neutron et le moment où une interaction a lieu dans la chambre, l’énergie des neutrons peut en être déduite.

Lors des futures expériences, l’objectif sera de créer un graphe représentant l’énergie déposée dans la chambre en fonction du temps de vol des neutrons (ou de l’énergie des

neutrons). Ce genre de graphe (réalisée après simulations GEANT4) est visible en figure 2.2 (en page 47) où l'énergie déposée dans le volume utile est représenté en fonction du temps de vol des neutrons incidents. L'énergie déposée en fonction de l'énergie cinétique des neutrons incidents (déterminée à partir de leur temps de vol) est représentée en figure 2.3 (en page 48). Sur ces deux figures ont également été représentées les courbes relatives à chaque réaction nucléaire prenant place : les réactions (n,p), (n,d), (n,t) et (n, $\alpha$ ) sur le  $^{19}\text{F}$ , le  $^{16}\text{O}$  et le  $^{12}\text{C}$ . Les réactions sur les autres isotopes ( $^{17}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$  et  $^{13}\text{C}$ ) ne sont pas prises en compte car, comparées aux réactions d'intérêt, elles sont négligeables.

## 2.2 Études expérimentales sur le mélange gazeux

Une étude sur la quantité de lumière détectée par les photomultiplicateurs en fonction de la composition du gaz doit être réalisée. Le mélange de gaz prévu est composé d'un mélange de deux gaz (à une pression absolue de 1000 mbar) :

- le tétrafluorométhane ( $\text{CF}_4$ ) est un gaz scintillant et est donc utilisé pour ses qualités de scintillation.
- le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) permet d'avoir des atomes cibles en oxygène.

Comme expliqué précédemment, le fluor à l'état naturel n'a qu'un seul isotope stable ( $^{19}\text{F}$ ) et l'oxygène trois isotopes stables ( $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$  et  $^{18}\text{O}$ ). L'étude d'un troisième gaz (l'hélium  $^3\text{He}$ ) dans la suite de ce chapitre est justifié par le fait que ce gaz aurait pu être utilisé pour la normalisation en section efficace. En effet la fonction d'excitation de la réaction  $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$  est connue avec précision, et cette réaction peut être utilisé comme référence. L'hélium a deux isotopes stables :  $^3\text{He}$  (à 0,000 134%) et  $^4\text{He}$  (à 99,999 866%) [4]. La figure 2.4 (en page 49) représente les principales études expérimentales sur les réactions  $^3\text{He}(n,p)$  et  $^3\text{He}(n,d)$  par B. Haesner *et al.* [118] en 1983 puis M. Drogg et N. Otsuka [119] en 2015. Sur cette figure sont également représentées les évaluations (ENDF/B-VIII.B3 et JENDL-4.0) sur les réactions  $^3\text{He}(n,el)$  en vert,  $^3\text{He}(n,p)$  en rouge et  $^3\text{He}(n,d)$  en bleu. Le bilan sur la réaction  $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$  est 0,76 MeV (réaction exo-énergétique, elle n'a pas de seuil énergétique et donc aura toujours lieu) et le bilan  $^3\text{He}(n,d)^2\text{H}$  est de  $-3,27$  MeV (et un seuil en énergie de 4,36 MeV). Le coût de production du gaz, ainsi que la section efficace de la réaction  $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$  qui est élevée à faible énergie (représentée sur la figure 2.4), ont fait en sorte que le choix de ce gaz fut abandonné pour le projet SCALP.

### 2.2.1 Études préliminaires

Initialement le mélange de gaz prévu est composé de trois gaz : le gaz contenant les atomes cibles ( $\text{CO}_2$ ), le gaz utilisé pour la normalisation en section efficace ( $^3\text{He}$ ) et le gaz utilisé pour la scintillation ( $\text{CF}_4$ ). L'utilisation du  $\text{CF}_4$  a été choisie car le laboratoire LPC a déjà étudié ses propriétés de scintillation dans d'autres projets [120]. Les études expérimentales ont été réalisées en laboratoire à l'aide d'un dispositif expérimental permettant d'introduire (à l'aide d'un système de pompage et de vannes) dans une chambre de détection scellée un mélange de gaz.

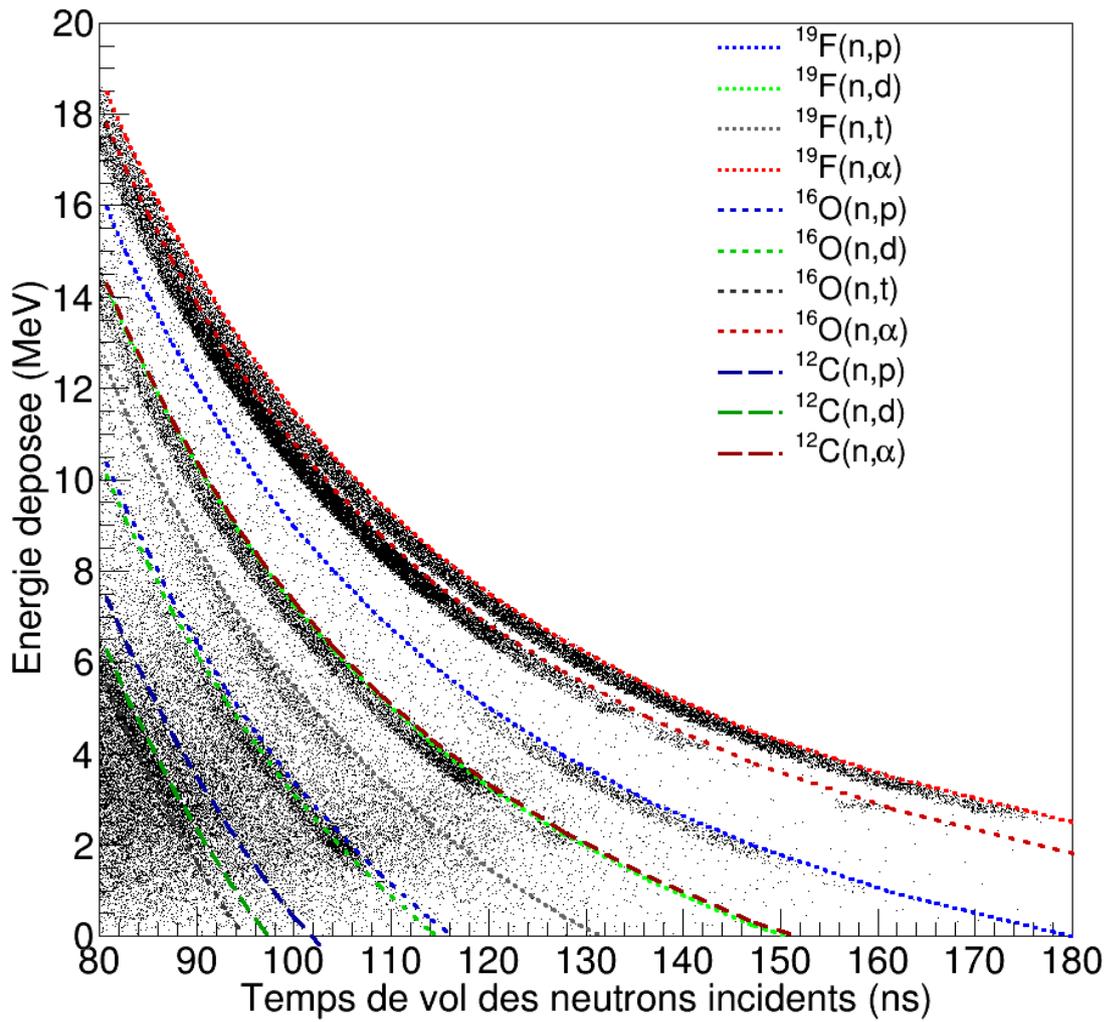


FIGURE 2.2 – Graphe représentant l'énergie déposée dans le volume utile en fonction du temps de vol des neutrons incidents. Les hyperboles représentent les différentes réactions nucléaires émettant une particule chargée (proton, deuton, triton, alpha) dans un mélange de gaz  $\text{CF}_4/\text{CO}_2$ .

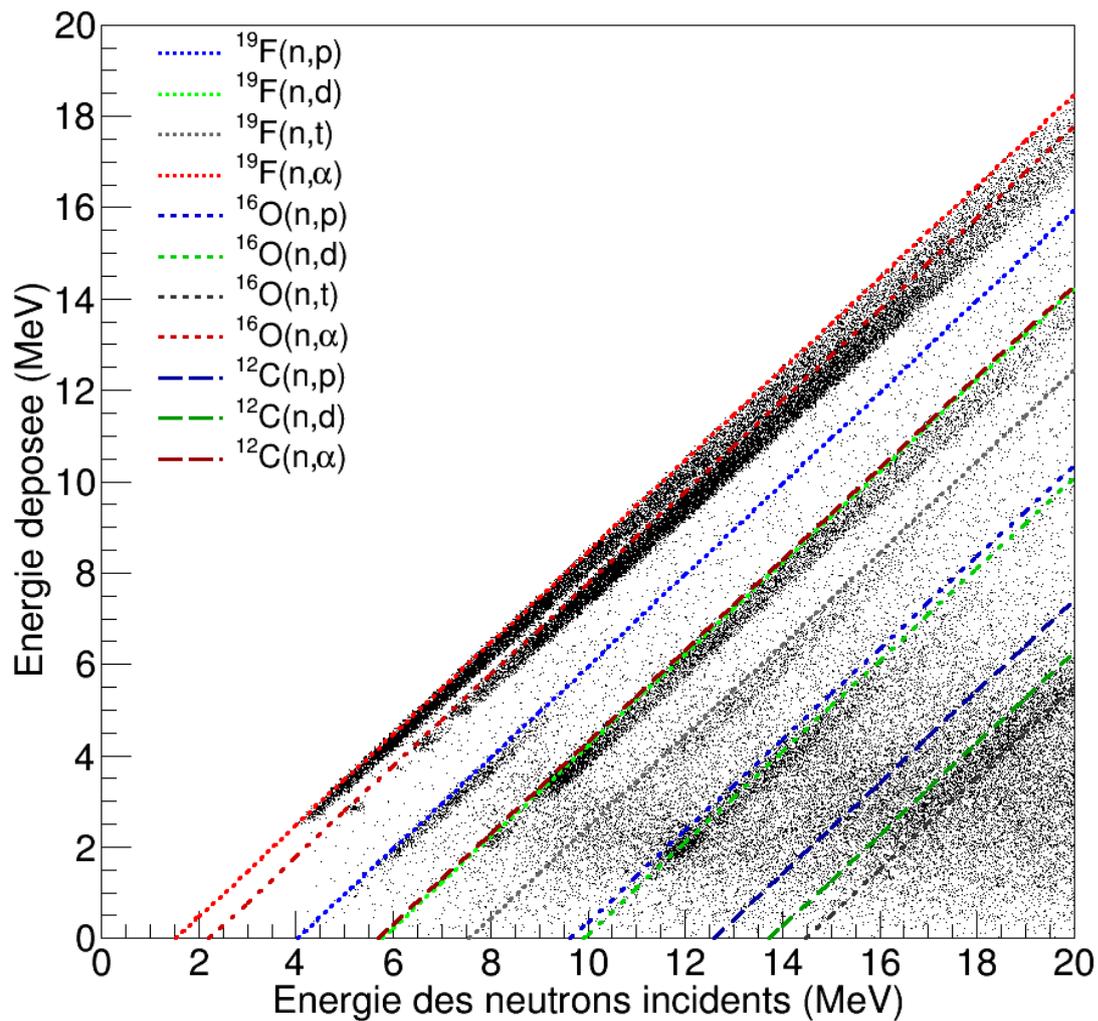


FIGURE 2.3 – Graphe représentant l'énergie déposée dans le volume utile en fonction de l'énergie des neutrons incidents (déterminée à partir du temps de vol). Les courbes représentent les différentes réactions nucléaires émettant une particule chargée (proton, deuton, triton, alpha) dans un mélange de gaz  $\text{CF}_4/\text{CO}_2$ .

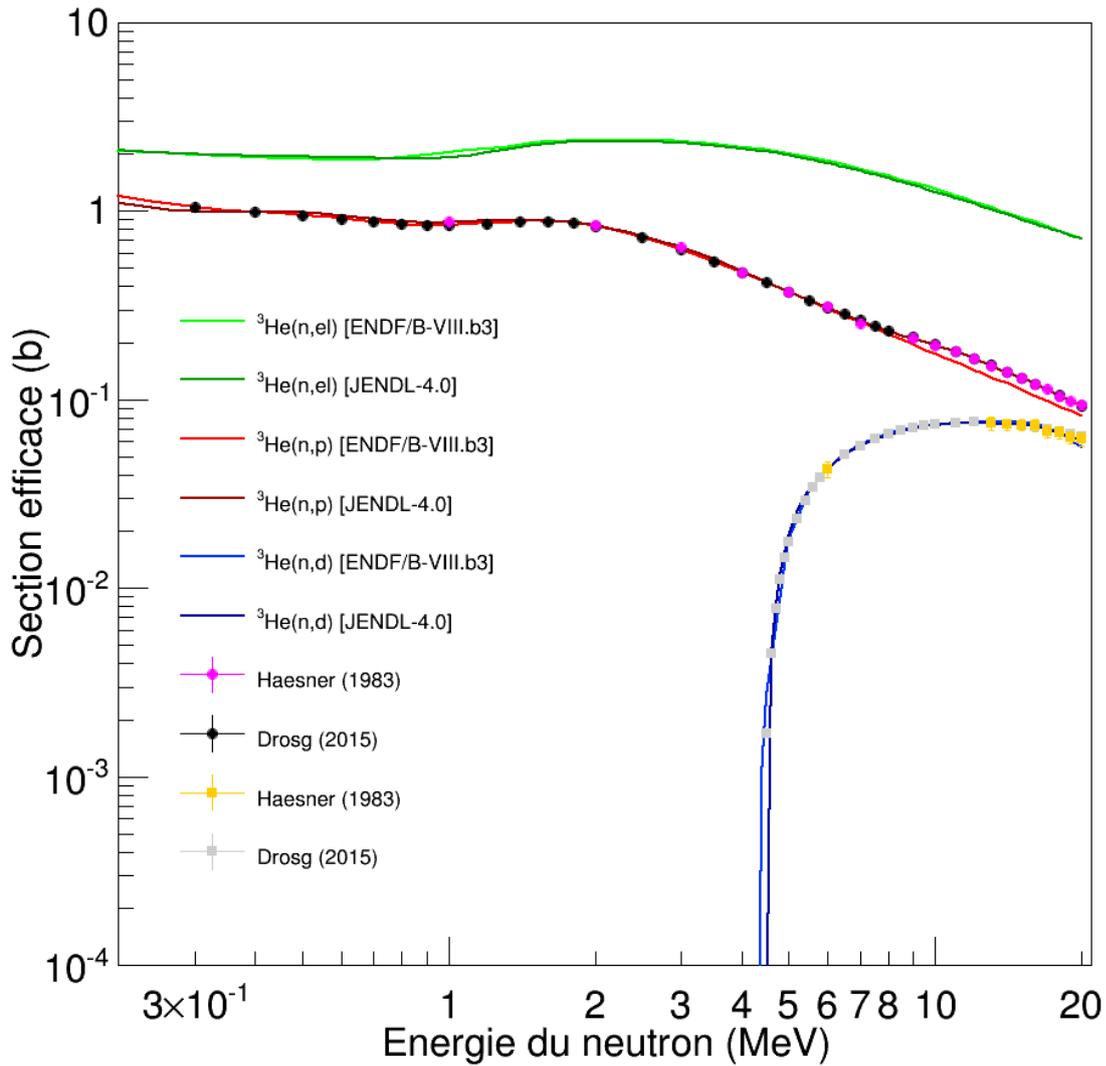


FIGURE 2.4 – Principales études expérimentales et évaluations de ENDF/B-VIII.B3 et JENDL-4.0 sur les réactions  ${}^3\text{He}(n,el)$  en vert,  ${}^3\text{He}(n,p)$  en rouge et  ${}^3\text{He}(n,d)$  en bleu (échelle logarithmique en abscisse et en ordonnée).

Une source  $\alpha$  se trouve dans la chambre de détection et va ainsi permettre au gaz  $\text{CF}_4$  de s'exciter et d'émettre des photons lors de la désexcitation. Ce dispositif permet ainsi d'étudier les caractéristiques de scintillation d'un mélange gazeux.

### 2.2.1.1 Modèle de Stern-Volmer

Pour étudier les mélanges gazeux, et en particulier le nombre de photons émis par un mélange gazeux scintillant, le modèle de Stern et Volmer [121, 122] est utilisé. Nommé à partir des expériences de O. Stern et M. Volmer en 1919, ce modèle permet d'étudier l'effet désactivateur d'un gaz sur un gaz scintillant. Il est défini de la façon suivante (valable pour une fraction de gaz désactivateur  $c \ll 1$  [122]) :

$$\langle npe \rangle = \frac{\langle npe_0 \rangle}{1 + K \cdot c} \quad (2.1)$$

avec

- $\langle npe \rangle$  le nombre moyen de photo-électron pour un mélange de gaz
- $\langle npe_0 \rangle$  le nombre moyen de photo-électron dans le gaz pur
- $K$  la constante de Stern-Volmer
- $c$  la fraction du gaz désactivateur dans le mélange de gaz

### 2.2.1.2 Dispositif expérimental utilisé

Un schéma du dispositif expérimental est représenté en figure 2.5.

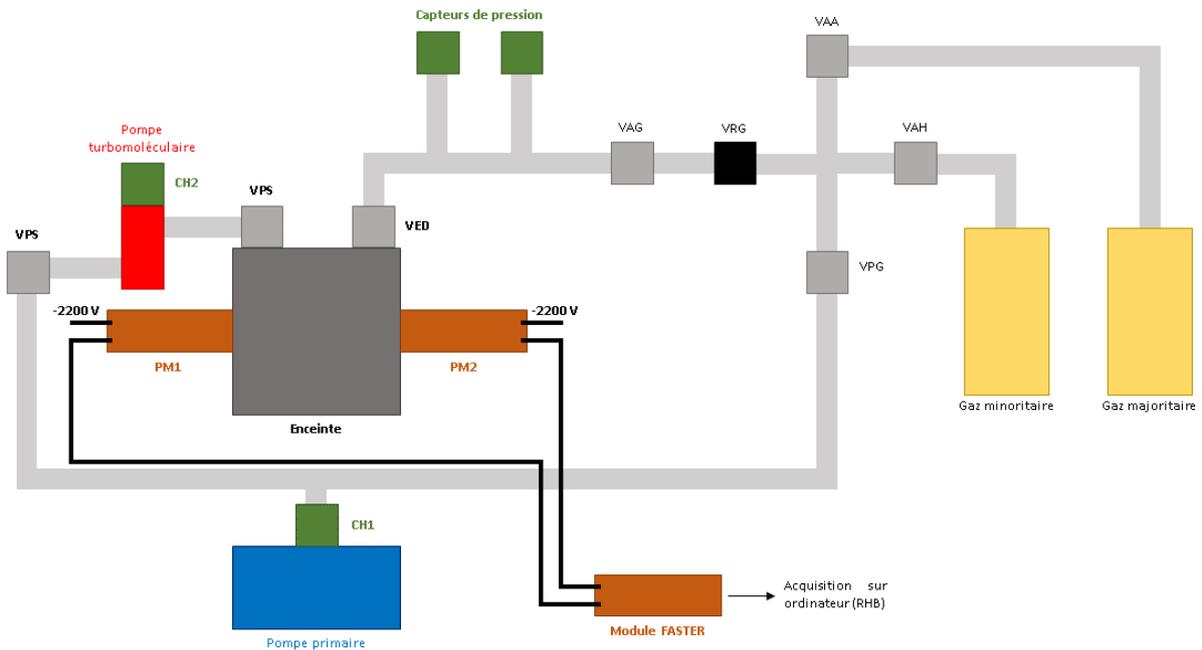


FIGURE 2.5 – Schéma du dispositif expérimental permettant de mélanger et d'étudier un mélange de deux gaz.

Dans ce schéma les deux gaz (minoritaire et majoritaire) sont représentés en jaune. Par un système de vanne et de pompe, le mélange de gaz est inséré dans l'enceinte scellée

(en gris foncé). Un vide primaire et secondaire sont fait préalablement avant l'introduction du mélange de gaz dans le système permettant l'introduction du gaz. Le gaz minoritaire ( $\text{CO}_2$ ) est inséré ensuite (avec une pression absolue comprise entre 0 et 100 mbar). Le gaz majoritaire ( $\text{CF}_4$ ) est ensuite introduit jusqu'à avoir une pression absolue totale dans la chambre de 1000 mbar.

La source  $\alpha$  d' $^{241}\text{Am}$  est à l'intérieur de l'enceinte, et elle a une activité de 40 kBq sur un angle solide de  $4\pi$  stéradians (soit une activité de 20 kBq sur  $2\pi$  dans la chambre car la source se trouve sur un support métallique et que les particules  $\alpha$  qui sont émises vers ce support ne sont pas détectées dans le gaz). Ces dernières ont une énergie cinétique de 5,5 MeV. Les particules  $\alpha$  vont faire scintiller le mélange gazeux. Les photons émis à chaque interaction seront émis sur  $4\pi$  et une partie de ces photons sera détectée par deux photomultiplicateurs se faisant face, de part et d'autre du centre de la chambre.

Ces photomultiplicateurs collectent les signaux émis<sup>1</sup> qui sont ensuite analysés par traitement du signal par ordinateur à l'aide du dispositif FASTER<sup>2</sup> fabriqué par le LPC [123]. Ce dispositif remplace en fait tout le système d'acquisition habituellement utilisé en physique nucléaire. Ce système d'acquisition est relié directement à un ordinateur permettant de récupérer les données de manière interactive (via RHB, Root Histogram Builder [124], également développé par le LPC à partir de ROOT du CERN).

### 2.2.1.3 Études expérimentales

Une étude avec une source non-collimatée a été faite au préalable pour tester le dispositif expérimental. Du fait de la haute activité de cette source, des manipulations de l'ordre de quelques minutes peuvent être réalisées. Dans un premier temps le mélange de gaz est le  $\text{CF}_4/\text{He}$ . Puis des mesures sont réalisées avec une source  $\alpha$  collimatée, en utilisant différents mélanges gazeux ( $\text{CF}_4/\text{He}$  et  $\text{CF}_4/\text{CO}_2$ ). Des expériences d'au moins 24 heures sont nécessaires pour avoir la statistique nécessaire.

Le nombre de photo-électron est déduit des signaux reçus en convertissant la charge reçue des signaux physiques (émis par la désexcitation des molécules de  $\text{CF}_4$ ) à l'aide de la charge du pic des photo-électrons uniques. Pour cela les événements en coïncidence détectés par les deux photomultiplicateurs sont analysés. Le fait de prendre les événements en coïncidence (événements détectés par les deux photo-multiplicateurs en même temps ou sur une fenêtre de temps très proche) permet ainsi de ne détecter que les événements dus aux photons émis par la désexcitation des molécules scintillantes et s'affranchir ainsi des autres signaux (bruit de fond, signaux dus aux post-impulsions, ...).

Le nombre de photo-électron émis par photo-cathode est déterminé en fonction de la fraction du gaz minoritaire par la façon suivante :

$$\langle npe \rangle = \frac{c_{phyQDC}}{c_{peuQDC}} \quad (2.2)$$

avec  $\langle npe \rangle$  le nombre moyen de photo-électron émis par chaque photo-cathode (à une énergie cinétique donnée),  $c_{phyQDC}$  et  $c_{peuQDC}$  les charges respectivement des signaux physiques et des signaux dus aux photo-électrons uniques. Les photo-électrons uniques sont

---

1. Le nombre de photo-électrons émis par photons détectés par la photo-cathode est récupéré.  
 2. pour Fast Acquisition System for nuclEar Research

due aux électrons de la surface de la photo-cathode qui sont arrachés à cause de l'agitation thermique [122].

Les événements détectés proviennent des photons émis sur  $4\pi$  suite à l'interaction des particules  $\alpha$  avec les molécules du CF<sub>4</sub>. Les spectres, normalisés en temps, des événements en coïncidence entre les deux photomultiplicateurs sont détectés. Pour les études réalisées avec la source non-collimatée, l'activité de la source permet de faire des manipulations courtes (de l'ordre d'une minute). Les incertitudes (relatives) sur le nombre moyen de photo-électrons par photons reçus sur la photo-cathode sont dues aux fluctuations de la charge du photo-électron unique entre chaque mesure réalisée, et sont estimées à  $\pm 2\%$  [125].

La collimation de la source a été décidée permettant ainsi de n'étudier que les événements identiques en ne conservant que les trajectoires des particules  $\alpha$  symétriques aux deux photo-multiplicateurs. L'activité de la source étant de 40 kBq sur un angle solide de  $4\pi$  sr. Or, avec la collimation de celle-ci, le nombre de désintégration d'atomes <sup>241</sup>Am par unité de temps dans la chambre de détection est estimée à environ 88 Bq. Pour avoir une statistique suffisante, des manipulations longues (au minimum 24 heures) sont réalisées. Les signaux détectés sont représentés sur la figure 2.6 (en page 53).

#### 2.2.1.4 Résultats et analyses des études

La figure 2.7 (en page 54) et le tableau B.1 (en annexe B) représentent les résultats obtenus lors de ces expériences de mélange de gaz. Sur le tableau, les résultats bruts sont listés pour les deux photomultiplicateurs, avec des résultats plus importants pour le photomultiplicateur n° 2. Les incertitudes relatives sur le nombre moyen de photo-électrons émis par photo-cathode sont estimées à  $\pm 2\%$  (à  $1\sigma$ ). Sur la figure 2.7, sont représentés les résultats de chaque mélange (marqueurs verts pour un mélange CF<sub>4</sub>/He et rouges pour un mélange CF<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>), et les ajustements par la méthode de Stern-Volmer respectivement pour chaque mélange gazeux.

Les données expérimentales et l'ajustement du modèle de Stern-Volmer permet de confirmer que l'hélium et le dioxyde de carbone ont tous les deux un rôle désactivateur dans un mélange de gaz. Ces deux molécules vont absorber les photons émis par la désexcitation du tétrafluorure de carbone. Pour un mélange de gaz CF<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> (mélange qui contient les atomes oxygène cibles), la diminution du nombre de photo-électrons moyen est plus importante que pour les mélanges CF<sub>4</sub>/He quand la fraction du gaz minoritaire augmente, le gaz CO<sub>2</sub> ayant un effet désactivateur plus important que le gaz He. Au vu de ces résultats, le choix d'un mélange composé uniquement de CF<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> (au lieu d'un mélange de trois gaz CF<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/He) s'est imposé.

Les ajustements sont faits en utilisant une fonction de la forme de l'équation 2.1. Les résultats de ces ajustements se trouvent dans le tableau B.2 en annexe B. Les valeurs du  $\chi^2$  n'ont été déterminées que pour les courbes relatives aux simulations, pas aux données expérimentales.

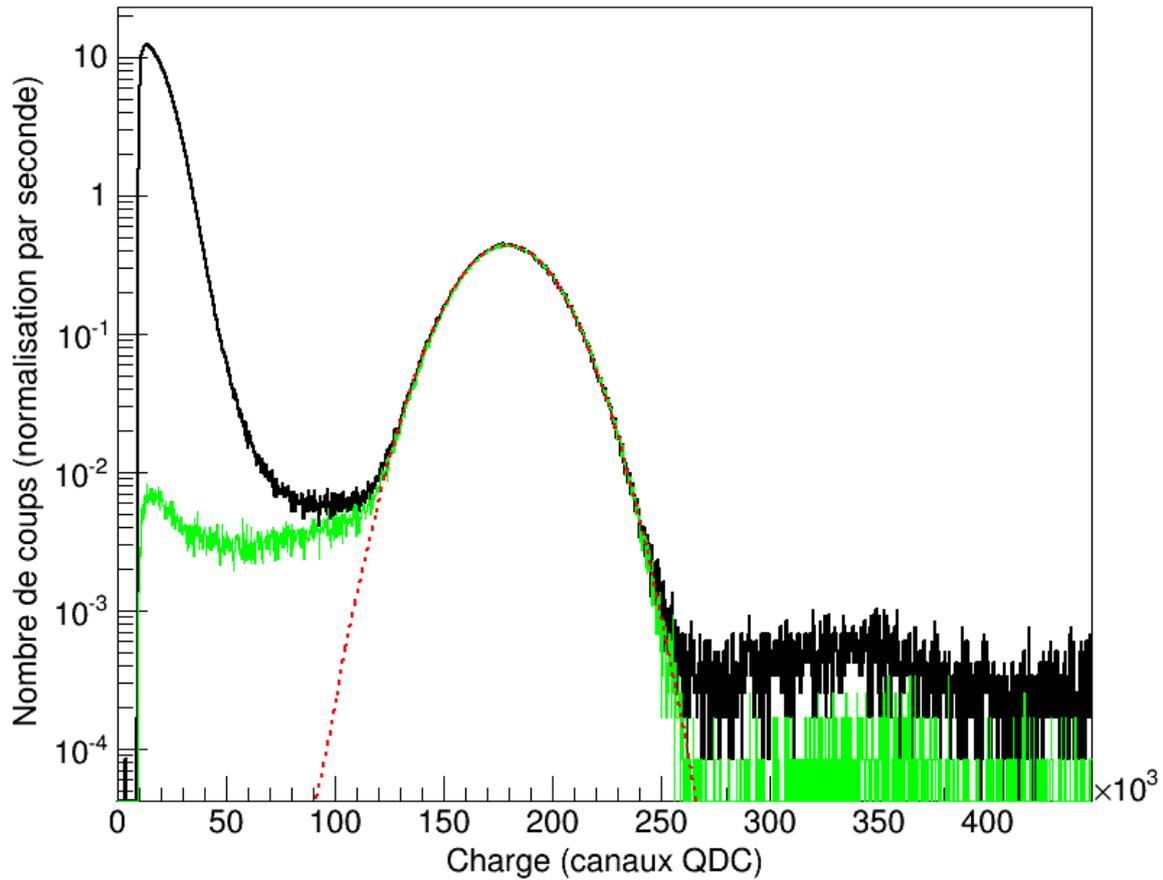


FIGURE 2.6 – Charge des signaux collectés par un des deux photo-multiplicateurs (charge normalisée sur le temps d’acquisition). Le pic de gauche correspond à la charge provenant des photo-électrons uniques, le pic de droite à la charge due aux photons provenant de la désexcitation des molécules scintillantes. En noir le spectre brut, et en vert le même spectre représentant les événements en coïncidence entre les deux photomultiplicateurs. En rouge l’ajustement du pic physique avec une fonction gaussienne.

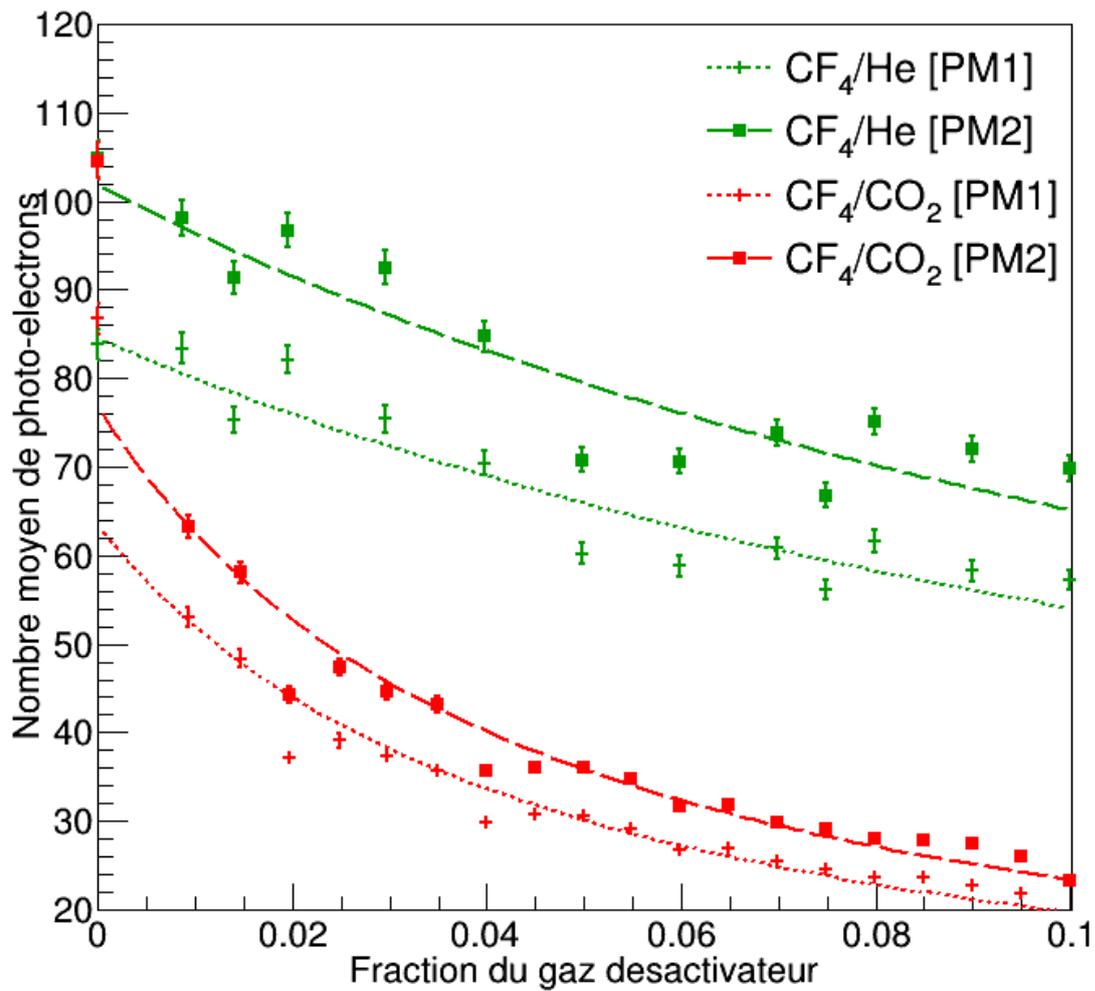


FIGURE 2.7 – Nombre moyen de photo-électrons émis par chaque photo-cathode pour différents compositions de mélange  $\text{CF}_4/\text{He}$  et  $\text{CF}_4/\text{CO}_2$  (respectivement les points de couleur verte et rouge). Les valeurs relatives au  $\text{PMn}^\circ 1$  sont représentées par un marqueur en croix, pour le  $\text{PMn}^\circ 2$  par un marqueur carré. Les ajustements de Stern-Volmer pour chaque mélange et pour chaque photo-multipliateur sont représentés par les courbes en pointillées.

Même si le modèle de Stern-Volmer est un modèle reconnu dans les études de mélange de gaz, les résultats ne semblent pas concluants concernant nos données expérimentales. Les valeurs expérimentales et les estimations du modèle de Stern-Volmer diminuent plus la fraction du gaz désactivateur augmente, sans correspondre aux incertitudes près. Ces écarts pourraient s'expliquer par la collimation de la source, qui a réduit fortement son activité : le temps d'analyse a par conséquent été fortement augmenté (24 heures), ce qui aurait pu induire une dérive des photo-multiplicateurs (à cause des écarts de température entre le jour et la nuit par exemple).

### 2.2.1.5 Conclusion des études expérimentales et choix du mélange à utiliser

La figure 2.7 permet de voir qu'à partir de quelques pourcents de  $\text{CO}_2$  dans du  $\text{CF}_4$  le nombre de photo-électrons diminue drastiquement. Un compromis doit être trouvé entre le nombre d'atomes d'oxygène cibles et le nombre de photo-électrons émis par photo-cathode :

- plus il y a d'atomes cibles, plus le nombre de réactions  $^{16}\text{O}(n,\alpha)$  sera important, et plus la mesure de la section efficace de cette réaction sera précise.
- mais plus il y a d'atomes cibles, plus le nombre de photo-électrons diminue, et donc moins de réactions nucléaires pourront être identifiées.

Pour la suite de cette étude, un mélange contenant du  $\text{CF}_4$  et du 3% de  $\text{CO}_2$  est choisi. Ce mélange permet d'avoir un nombre non-négligeable d'atomes cibles tout en permettant de limiter l'effet désactivateur du  $\text{CO}_2$ . Avec ce mélange, le nombre moyen de photo-électrons émis par photo-cathode est divisé par deux.

## 2.2.2 Simulations du dispositif expérimental

Les résultats expérimentaux sont utilisés comme paramètres d'entrée dans le programme de simulation utilisé dans ce projet. Le dispositif expérimental présenté dans la partie 2.2.1.2 est simulé avec le programme de simulation SICSIMULATION. Ce programme est décrit dans le chapitre 3. Il s'agit d'un programme en C++ développé par le laboratoire LPC utilisant en partie GEANT4, un code de type Monte-Carlo permettant de simuler l'interaction de particules.

Pour cela, le nombre moyen de photo-électrons émis par photo-cathode obtenu expérimentalement pour chaque composition du mélange gazeux est introduit dans les fichiers utilisés dans le programme de simulation SICSIMULATION. Pour chaque composition du mélange gazeux a été rajoutée la masse volumique et la composition en pourcentage massique du mélange, le rendement de scintillation obtenu par mélange, ainsi que les constantes temporelles de scintillation, plus particulièrement le temps de décroissance du signal reçu expérimentalement par les photo-multiplicateurs. Ce temps a été déterminé expérimentalement (en prenant les événements pris en coïncidence sur une fenêtre de temps restreinte avec deux photo-multiplicateurs) en reconstituant photon par photon la distribution temporelle de scintillation du mélange gazeux étudié [125].

Proportion de gaz désactivateur (%)	Rendement de scintillation		Temps de décroissance ( ns)
	$^3\text{He}$ (photons/MeV)	$\text{CO}_2$ (photons/MeV)	
0	1 200	1 200	8,522
1	1 140	880	8,222
2	1 080	700	7,892
3	1 030	570	7,589
4	990	490	7,309
5	950	430	7,030
6	910	380	6,322
7	870	340	5,615
8	840	310	5,395
9	800	280	5,645
10	780	260	5,894

TABLEAU 2.1 – Rendement de scintillation et temps de décroissance du signal utilisés par le programme SICSIMULATION pour différentes proportions de gaz désactivateur.

Le tableau 2.1 liste les rendements de scintillation et le temps de décroissance du signal pour différentes proportions du gaz désactivateur dans les mélanges gazeux étudiés. Les rendements de scintillation diminuent plus la proportion du gaz désactivateur augmente, et sont plus élevés pour des mélanges  $\text{CF}_4/^3\text{He}$  que pour les mélanges  $\text{CF}_4/\text{CO}_2$ , comme cela était remarqué sur la figure 2.7. Le temps de décroissance du signal déterminé expérimentalement par la reconstitution photon par photon de la distribution temporelle de la scintillation pour chaque mélange gazeux [125] est également récupéré par le programme. Ces temps diminuent plus la proportion du gaz désactivateur augmente (les molécules de  $\text{CF}_4$  sont moins longtemps dans leur états excités en présence d'un gaz désactivateur comme l'hélium ou le dioxyde de carbone). Toutes les caractéristiques des différents mélanges gazeux étudiés sont synthétisées en annexe B dans les tableaux B.3 et B.4.

La figure 2.8 (en page 57) représente la comparaison entre le nombre de photo-électrons émis par photo-cathode déterminé expérimentalement et le nombre de photo-électron estimé par simulation pour des mélanges gazeux  $\text{CF}_4/\text{He}$  (respectivement en vert et en noir) et  $\text{CF}_4/\text{CO}_2$  (respectivement en rouge et en bleu). Les ajustements sont fait en utilisant une fonction de la forme de l'équation 2.1. Les résultats de ces ajustement se trouvent dans le tableau B.2 en annexe B. Également en annexe B, le tableau B.5 représente le nombre de photo-électrons estimé, pour chaque mélange de gaz et pour différentes fractions, à partir du modèle de Stern-Volmer. Ce nombre est estimé à partir des données expérimentales et à partir des données issues des simulations. Les données issues des simulations sont systématiquement sur-estimées. Pour un mélange composé de 3% de  $\text{CO}_2$  et de 97% de  $\text{CF}_4$ , cette sur-estimation est de 11,7%. Au premier abord, les résultats obtenus à partir des simulations GEANT4 peuvent sembler cohérents avec les résultats expérimentaux. Cependant, les différences entre les données expérimentales et les estimations faites à partir du modèle de Stern-Volmer sont notables. Les données issues des simulations semblent cohérentes avec les estimations faites à partir du modèle de Stern-Volmer.

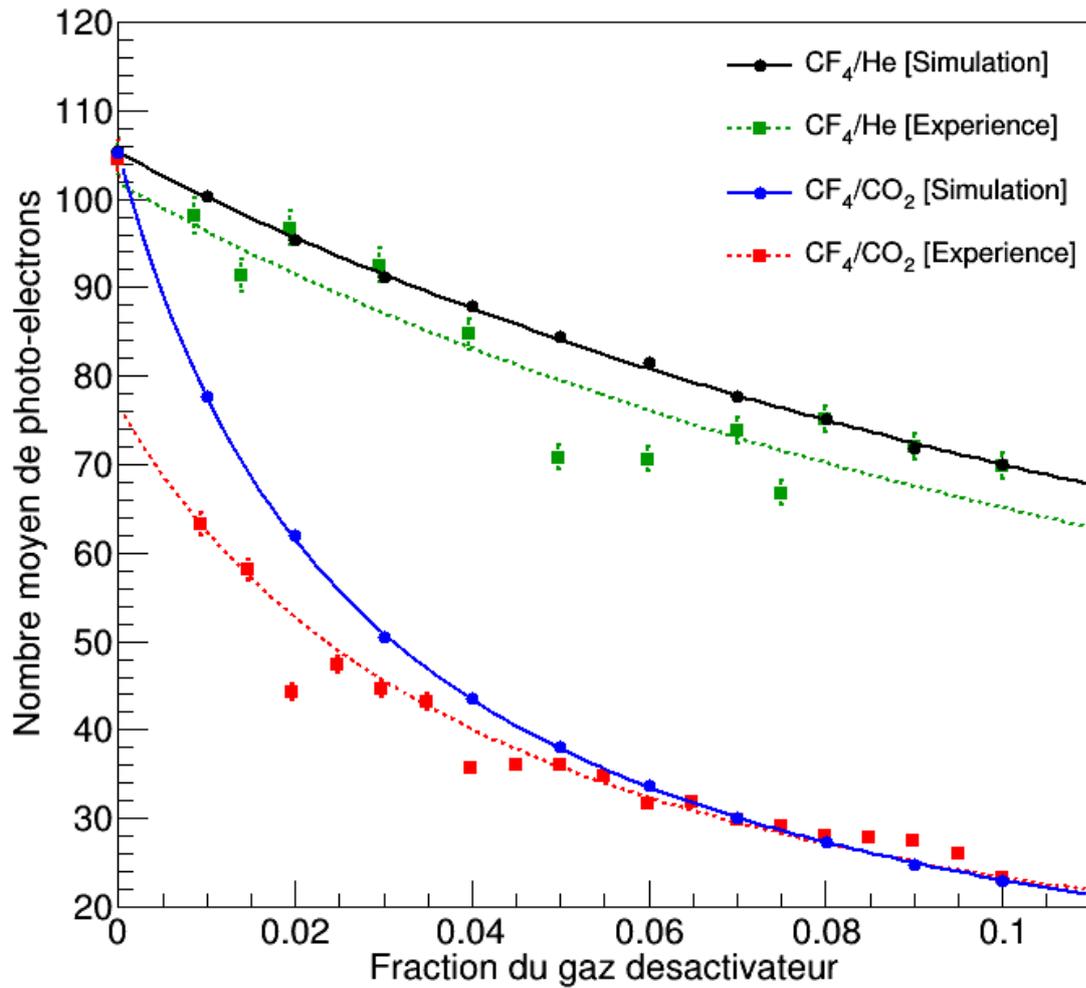


FIGURE 2.8 – Comparaison entre les résultats obtenus par simulation (en noir pour le mélange CF<sub>4</sub>/He et en bleu pour le mélange CF<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>) et les résultats expérimentaux présentés dans la figure 2.7. Les résultats obtenus par simulation ont également été ajustés par la formule de Stern-Volmer.

### 2.2.3 Le CRT : Coïncidence Resolving Time

La résolution en temps du dispositif, en fonction des mélanges gazeux, est aussi un paramètre important. Pour cela le CRT (Coïncidence Resolving Time) est étudié (voir la figure 2.9 en page 59). Le CRT correspond à l'écart-type de l'intervalle de temps qu'il y a entre les impulsions émis par chaque photo-multiplicateur pour un même événement. Cet intervalle de temps définit la temps de coïncidence qu'il existe entre les deux photo-multiplicateurs pour ce même événement.

Sur la figure 2.9 ont été représentées les données expérimentales comparées aux résultats issus des simulations. Les données présentées ont été ajustées suivant une fonction polynomiale de degré 2 (les résultats des ajustements sont présentés dans le tableau B.6). Les données issues des simulations sont cohérentes avec celles issues des expériences réalisées.

Le CRT augmente de manière quasi-linéaire quand la fraction du dioxyde de carbone augmente dans le mélange gazeux. En prenant un mélange de gaz composé de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ , le CRT estimé par simulation est de 454 ps (450 ps estimé expérimentalement). Par rapport à l'utilisation du  $\text{CF}_4$  pur (où le CRT estimé est de 446 ps), le fait d'ajouter 3% de  $\text{CO}_2$  dégrade le CRT.

### 2.2.4 Conclusion

A partir des études expérimentales faites au préalable, un mélange gazeux à une pression de 1000 mbar contenant 97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$  est choisi. Ce mélange permettrait d'avoir dans la futur chambre d'ionisation un nombre non-négligeable d'atomes oxygènes cibles tant en limitant l'effet désactivateur du  $\text{CO}_2$ .

Néanmoins, les données expérimentales ne correspondent pas parfaitement avec les estimations faites par Stern-Volmer, même si l'allure des courbes correspond. Des écarts sont visibles entre les données expérimentales et les données issues des simulations (pour-tant basées à partir de ces données). Pour un mélange composé de 97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ , les résultats issus des simulations sont surestimés : l'écart est de moins de 12%.

La résolution en temps est donnée par le CRT. Le CRT augmente de manière quasi-linéaire quand la fraction du dioxyde de carbone augmente dans le mélange gazeux. L'ajout de 3% de  $\text{CO}_2$  dans le mélange gazeux dégrade la résolution en temps.

## 2.3 Description du dispositif expérimental

SCALP est une chambre d'ionisation scintillante. La chambre d'ionisation est composée de deux électrodes (une connectée sur une haute tension, la seconde à la masse). Les deux électrodes sont l'anode et la cathode. La cathode est l'électrode vers laquelle se dirigent les ions positifs (cations). L'anode est l'électrode vers laquelle se dirigent les ions négatifs (anions) et les électrons.

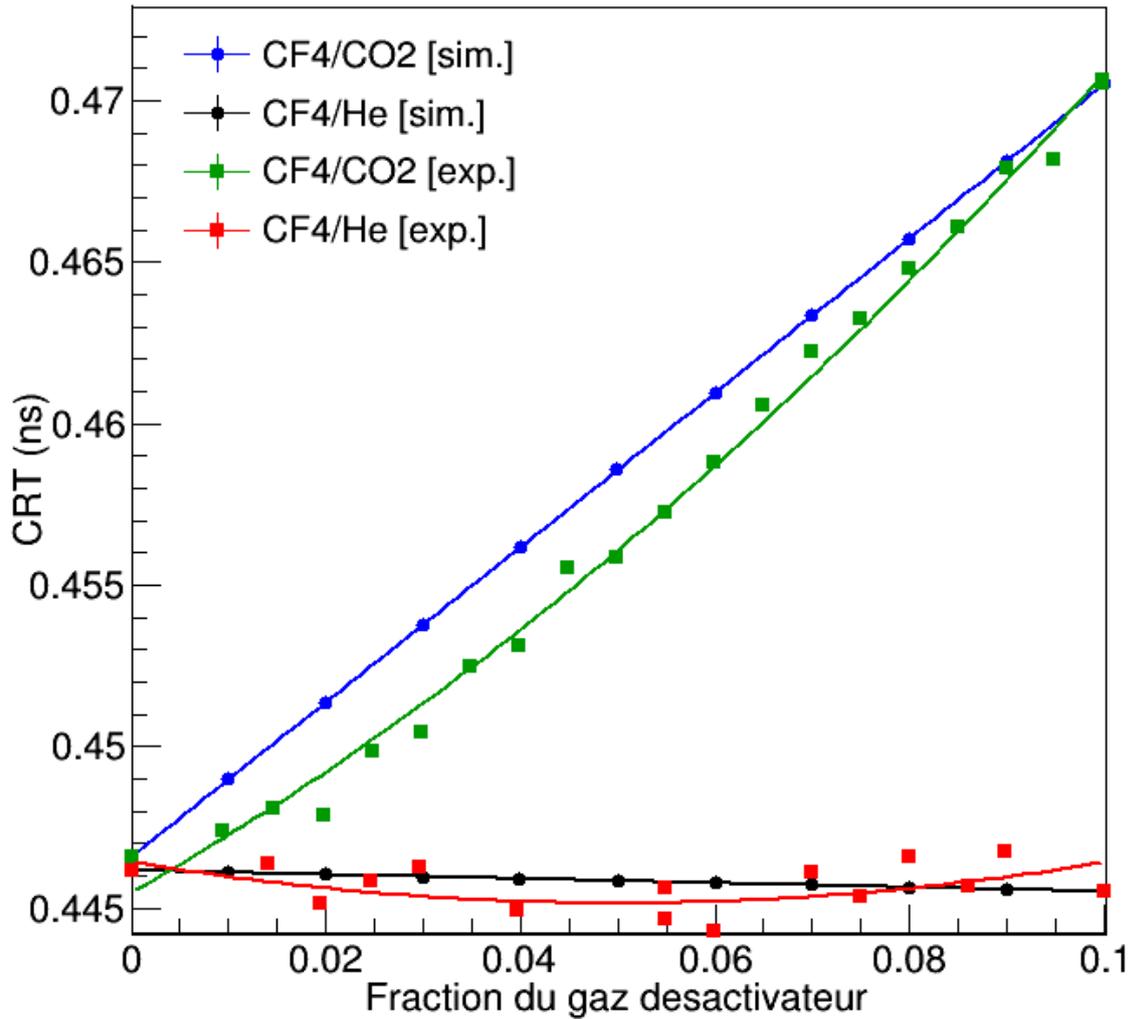


FIGURE 2.9 – CRT en ( ns) estimé pour différents mélanges gazeux. Les résultats ont été ajustés suivant une fonction polynomiale de degré deux. "sim." se réfère aux données issues des simulations et "exp." aux données expérimentales.

Une grille de Frisch se trouve entre la cathode et l'anode. Les deux électrodes sont reliées entre elles par le dégradeur de champ, qui est un ensemble de fils conducteurs reliés entre eux par des résistances, de façon à avoir un champ électrique uniforme. Cela permet d'avoir un champ électrique uniforme entre les deux électrodes.

Le volume de gaz délimité par les deux électrodes et le dégradeur de champ, et se trouvant sur la trajectoire du faisceau de neutrons incident, est le volume actif de gaz. Le volume utile, volume actif de gaz dans lequel tous les neutrons incidents interagissant avec les molécules de gaz déposent entièrement leur énergie, est la fraction du volume actif pour lequel il y a une collection complète des charges produites via le dégradeur et les électrodes de mesure.

La chambre d'ionisation se trouve dans une enceinte à vide qui est fermée et étanche. Le gaz à l'intérieur de cette chambre extérieure se trouve à la pression atmosphérique. Cette enceinte est percée de quatre trous permettant le passage de quatre photomultiplicateurs qui sont centrés sur le volume actif, permettant ainsi la détection maximale de la lumière provenant des interactions entre les neutrons incidents et les molécules de gaz.

### 2.3.1 La chambre d'ionisation avec grille de Frisch et le dégradeur de champ

La majorité des détecteurs gazeux est basée sur la détection de l'ionisation des molécules gazeuses suite au passage d'une particule chargée [3]. Une particule chargée produit dans le gaz, le long de sa trace, des paires ions-électrons. En présence d'un champ électrique assez élevé pour empêcher la recombinaison, les charges positives et négatives migrent vers les électrodes respectives y induisant une charge  $\pm Q$ . La charge produite est proportionnelle à l'énergie déposée par la particule [126].

#### 2.3.1.1 Principe d'une chambre d'ionisation avec grille de Frisch

Une chambre d'ionisation est un détecteur gazeux basé sur la collection des charges. Ces charges sont créées par une particule chargée qui ionise les molécules de gaz du milieu ambiant. Il y a création de paires électrons-ions : un électron libre et ion positif.

Un champ électrique est créé par la différence des hautes tensions appliquées entre les deux électrodes (la cathode et l'anode, de charge opposée) pour éviter que les ions et les électrons se recombinent. Les ions positifs sont attirés par la cathode, et les électrons vers l'anode. Cette dérivation vers les électrodes induit des courants qui sont amplifiés. La charge accumulée (par l'interaction des électrons et des ions avec les électrodes) est proportionnelle au nombre de paire électrons-ions créé dans la chambre. Les signaux électriques sont produits par l'amplification. Le signal de sortie est donc proportionnel à l'énergie déposée par la particule incidente.

La présence d'un dégradeur de champ permet d'entourer le volume de gaz présent entre la cathode et l'anode par des fils conducteurs de différentes tensions. Avec des résistances entre deux fils, le champ électrique entre la cathode et l'anode est ainsi constant.

Cela améliore la collection des charges. La grille de Frisch est placée entre la cathode et l'anode, et est reliée à la masse (ou à une tension faible). La présence de la grille de Frisch permet d'améliorer les résolutions de temps, car les temps de montée des signaux après les électrodes sont plus courts pour des charges passant par une grille de Frisch.

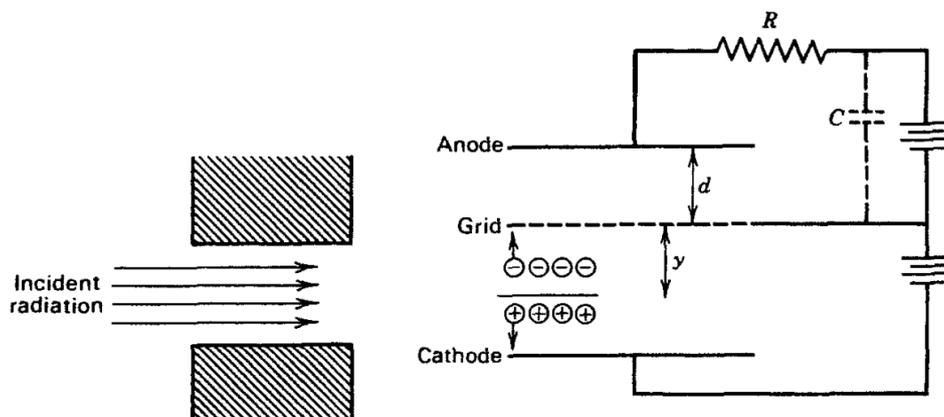


FIGURE 2.10 – Schéma du principe d'une chambre d'ionisation avec une grille de Frisch (schéma issu de Knoll [3]).

### 2.3.1.2 La chambre d'ionisation de SCALP

Pour permettre d'avoir une chambre extérieure de dimension limitée, les électrodes (anode et cathode) de la chambre d'ionisation interne se trouvent sur la trace des neutrons incidents, perpendiculaires au faisceau. Une des électrodes se trouvant à une haute tension, l'enceinte extérieure devait par conséquent être dimensionnée pour éviter les phénomènes de claquages entre l'électrode liée à la haute tension et l'enceinte. Le choix de la composition des matériaux des électrodes doit permettre d'éviter l'absorption des neutrons incidents (comme l'enceinte extérieure).

Un schéma de la chambre d'ionisation de SCALP est représenté en figure 2.11 (en page 62). Les neutrons incidents interagissent avec les molécules de gaz se trouvant dans la chambre. Le signal des réactions se faisant à l'intérieur du volume de gaz dans la chambre d'ionisation est récupéré par les deux électrodes (la cathode et l'anode, respectivement en bleu et en orange sur la figure 2.11). La grille de Frisch utilisée dans ce projet est représentée sur la figure 2.11 par les petits points noirs visibles devant l'anode. Le dégradeur de champ est représenté sur la figure 2.11 par les traits horizontaux. Elle délimite le volume actif entre les deux électrodes et est de forme hexagonale.

### 2.3.2 Photomultiplicateurs

Un photomultiplicateur convertit un rayonnement incident (photon) en un signal électrique. A partir de l'effet photo-électrique, un photon incident éjecte un électron du cortège électronique des atomes composant la photo-cathode. Cet électron est accéléré vers la première dynode constitué d'un matériau adapté à l'ionisation secondaire.

Cet électron (appelé photo-électron) est ensuite accéléré et focalisé pour pouvoir être multiplié (création d'électrons secondaires à partir de ce photo-électron par les chocs successifs de dynode en dynode) pour avoir un signal exploitable.

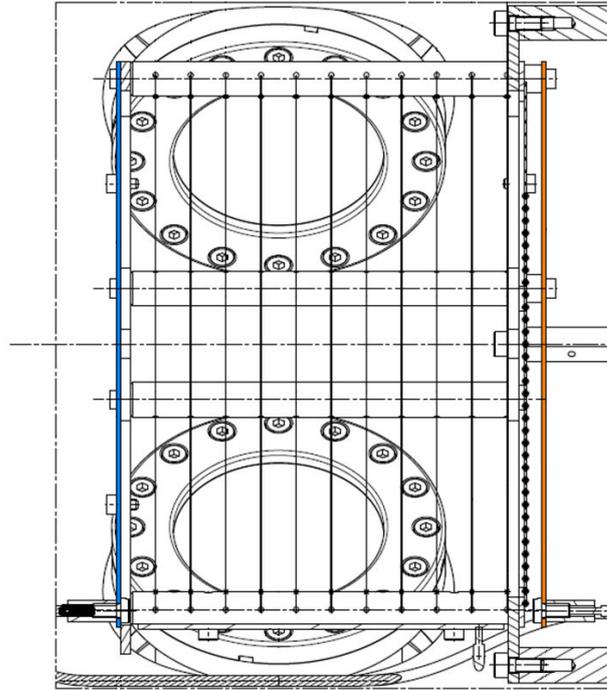


FIGURE 2.11 – Schéma de la chambre d'ionisation de SCALP vue de profil. La cathode est l'électrode en bleue, l'anode en orange. Les fils de cuivre du dégradeur de champ sont sur ce schéma parallèle à l'anode et à la cathode. La grille de Frisch est visible devant l'anode (par les petits points noirs). Les deux hublots visibles sont les fenêtres des photomultiplicateurs.

### 2.3.2.1 Principe général

Cet instrument consiste en un tube (sous vide) contenant les éléments suivants [127] :

- une **fenêtre d'entrée**.
- une **photo-cathode** : électrode (charge négative) permettant la conversion des photons lumineux incidents en électrons.
- les **électrodes de focalisation** : électrodes permettant de concentrer les photo-électrons de la photo-cathode vers la première dynode.
- les **dynodes** : électrodes permettant de multiplier en cascade le nombre d'électrons.
- l'**anode** : électrode recueillant les électrons provenant de la dernière dynode. C'est sur cette électrode qu'est prélevé le signal.

Tous ces constituants sont visibles sur la figure 2.12 (en page 63) qui représente le schéma du fonctionnement d'un photomultiplicateur. La photo-cathode est généralement composée d'un métal semi-conducteur. Entre la photo-cathode (charge négative) et l'anode (charge positive), le champ électrique est linéairement constant.

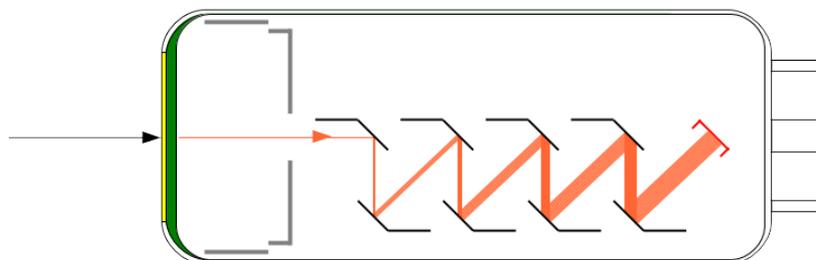


FIGURE 2.12 – Schéma du fonctionnement d'un photomultiplicateur représentant les principaux composants : la fenêtre d'entrée (en jaune), la photo-cathode (en vert), les électrodes de focalisation (en gris), les dynodes (en noir) et l'anode (en rouge). Le flux de photon incident est représenté par la flèche noire et le flux d'électrons (photo-électrons) créés par les flèches oranges.

### 2.3.2.2 Les photomultiplicateurs utilisés pour le projet SCALP

Les photomultiplicateurs utilisés pour ce projet sont des R2059 de HAMAMATSU. Les principales caractéristiques les plus importantes de ces photomultiplicateurs proviennent du constructeur [128], à savoir :

- la coque extérieure cylindrique a un diamètre de 53 mm et une longueur de 170 mm.
- la photo-cathode est en matériau bialcalin (SbRbCs).
- la fenêtre d'entrée (entre le milieu gazeux cible et la photo-cathode) est en quartz.
- la réponse spectrale est de 160 à 650 nm.

L'efficacité quantique des photomultiplicateurs R2059 d'Hamamatsu est représentée en figure 2.13. Cette efficacité représente le rapport entre le nombre moyen d'électrons émis par la cathode sur le nombre moyen de photons reçus [127] pour un rayonnement monochromatique. Cette efficacité est maximale pour des photons de longueur d'onde 420 nm.

### 2.3.3 Électronique

Les photomultiplicateurs et les électrodes sont reliés au dispositif FASTER [123] développé par le LPC (qui remplace tout le système d'acquisition habituellement utilisé en physique nucléaire). Ce système est relié directement à un ordinateur permettant de récupérer les données en interactif via RHB [124] (ROOT Histogram Builder, également développé par le laboratoire). Les signaux en sortie des photomultiplicateurs sont dirigés vers le dispositif FASTER [129] qui les numérise et les filtre dans une fenêtre de temps définie.

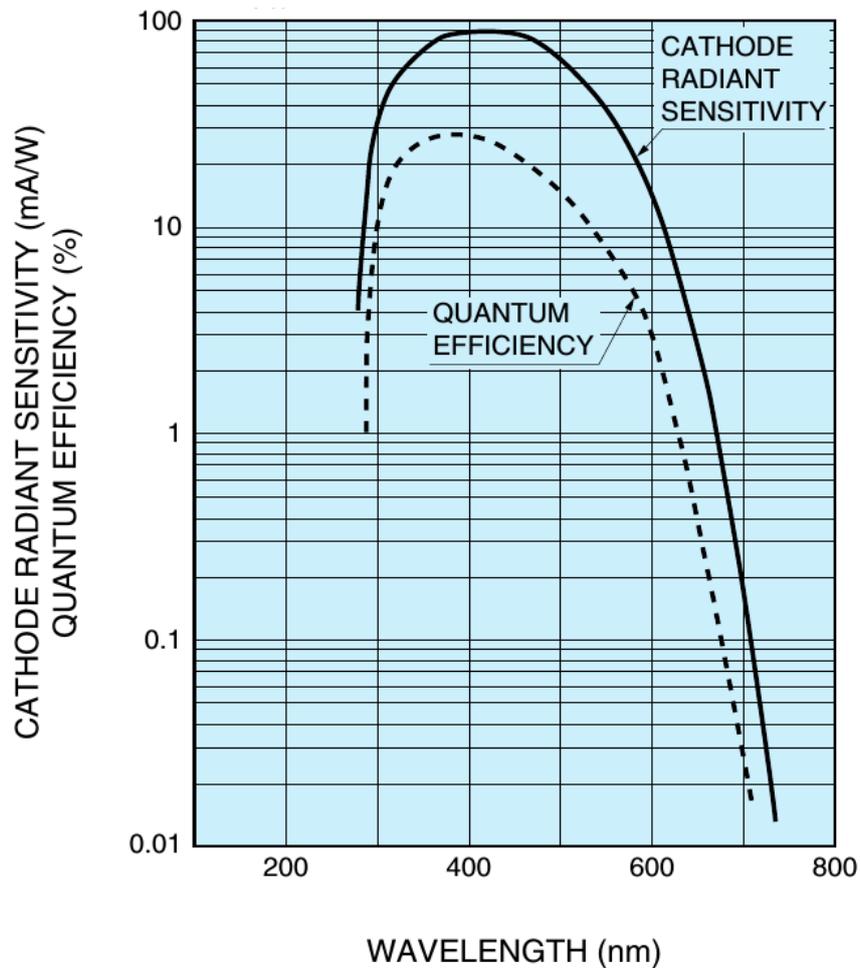


FIGURE 2.13 – Efficacité quantique des photomultiplicateurs R2059 d’Hamamatsu. L’efficacité quantique est maximale pour des photons de longueur d’onde d’environ 400 nm (alors que le spectre des photons émis par la scintillation du  $\text{CF}_4$  est compris entre 160 jusqu’au proche visible).

Ce dispositif met en forme et amplifie les signaux. La valeur de la charge intégrée pour chaque signal est proportionnelle au nombre de photo-électrons provenant de la photo-cathode.

L’électronique utilisé dans ce projet comprend aussi les hautes tensions utilisées pour alimenter les quatre photo-multiplicateurs et la chambre d’ionisation.

## 2.4 Conclusion du chapitre

Ce chapitre avait pour but d'introduire au lecteur le dispositif expérimental SCALP, en particulier les différents éléments composant le futur détecteur. Ce dispositif est dimensionné dans le but de quantifier la production de particules  $\alpha$  suivant une interaction avec des neutrons.

Une chambre d'ionisation scintillante, remplie d'un mélange gazeux, entourée de quatre photo-multiplicateurs, est utilisée pour permettre d'identifier et de discriminer les réactions nucléaires qui auront lieu dans le volume utile.

Un mélange gazeux composé de 97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$  est choisi. La faible proportion de  $\text{CO}_2$  permet d'avoir un nombre non-négligeable d'atomes oxygène cibles, tout en limitant la dégradation des performances attendues du dispositif (réduction de moitié du nombre de photons émis par les molécules de  $\text{CF}_4$ , augmentation de la résolution temporelle).



# Chapitre 3

## Mise en œuvre des simulations

L'utilisation de la méthode Monte Carlo est primordiale lorsqu'il s'agit de concevoir des projets de détection complexe tels que le projet SCALP. Cette méthode est à la base des logiciels plus connus comme GEANT4, MCNP, MCNPX et TRIPOLI. A l'aide d'une telle technique, il est possible d'étudier le système d'intérêt (la chambre d'ionisation scintillante de SCALP) et de se rapprocher de la réalité. Dans ce chapitre, il sera donné la structure du programme à travers lequel il a été possible de concevoir SCALP. Sa réponse au rayonnement neutronique est étudiée par le programme SICSIMULATION qui, après avoir généré les événements correspondants aux neutrons interagissant avec les noyaux du mélange gazeux, les filtre en simulant le dispositif expérimental (c'est-à-dire la chambre d'ionisation scintillante) sous un flux de neutrons incidents. Ces simulations sont menées de façon à contrôler qu'il soit possible d'atteindre le but du projet SCALP, c'est-à-dire d'effectuer la mesure de section efficace avec une précision que nous verrons dans le chapitre 4.

### 3.1 Structure générale du programme de simulation utilisé dans le projet SCALP

Le programme de simulation SICSIMULATION a été développé par le LPC pour déterminer la dimension de la chambre d'ionisation scintillante. Ces simulations sont importantes, car il faut trouver un compromis entre la résolution en temps et la quantité de lumière (voir 2.2). Plus l'énergie des neutrons est faible, plus le temps de vol est long et la résolution temporelle meilleure, mais plus la quantité de lumière détectée diminue. Inversement, plus l'énergie neutronique est élevée, plus le temps de vol est très court et la résolution temporelle mauvaise, mais plus la quantité de lumière détectée augmente. Pour des neutrons d'énergie de 10 MeV au maximum, il faut trouver la dimension de la chambre permettant d'avoir une bonne résolution en temps et de détecter une quantité de lumière suffisante pour permettre la discrimination de toutes les réactions.

Sur la figure 3.1 (en page 68), est représenté l'organigramme de la structure générale du programme de simulation utilisé dans le projet SCALP. Ce programme se nomme SICSIMULATION. C'est un programme écrit en C++ qui utilise GEANT4 pour propager les neutrons incidents dans le volume actif déterminé dans la chambre d'ionisation scintillante.

### 3.1. STRUCTURE GÉNÉRALE DU PROGRAMME DE SIMULATION UTILISÉ DANS LE PROJET SCALP

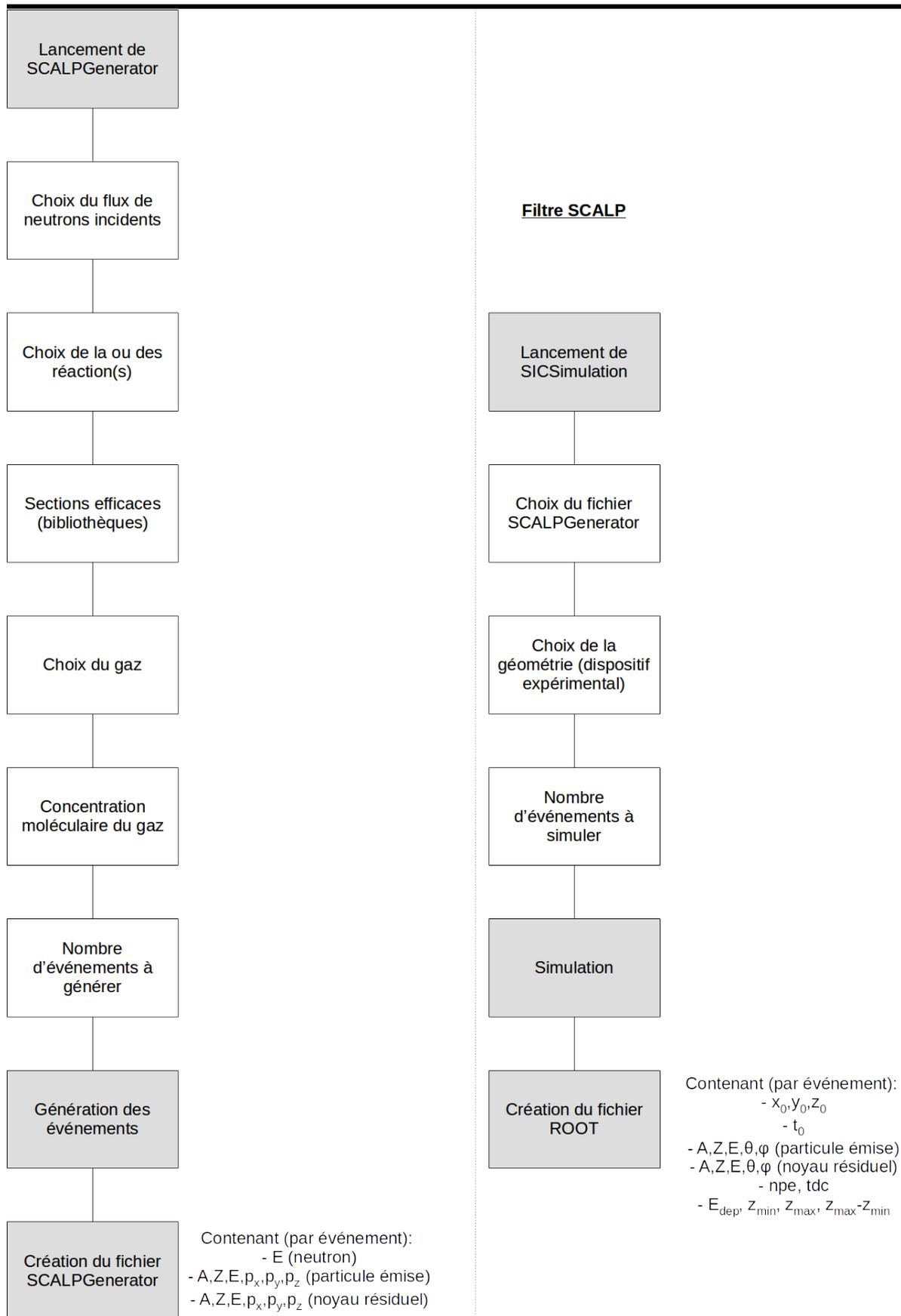


FIGURE 3.1 – Organigramme représentant le programme de simulation utilisé avec toutes les options utilisées. A gauche, l’organigramme relatif à l’utilisation du générateur d’événements SCALPGENERATOR. A droite, l’organigramme relatif à l’utilisation du programme de simulation SICSIMULATION. Les paramètres en sortie de chaque fichier sont expliqués dans les parties 3.2 et 3.3.

Est également utilisé un générateur d'événements qui va créer des neutrons ayant une énergie cinétique déterminée ou appartenant à une gamme définie. D'autres paramètres sont pris en compte, comme le gaz de simulation ou la réaction étudiée.

SICSIMULATION utilise pour son lancement différentes options. La première est la réaction nucléaire à simuler : ce paramètre est choisi à partir du fichier généré par SCALPGENERATOR (dans lequel a été généré un nombre défini d'événements à différentes énergies sur une ou plusieurs réactions nucléaires dans le gaz de simulation). Ensuite la géométrie (fichier contenant la description de la chambre d'ionisation) est appelée. Le gaz d'étude et le nombre d'événements sont ensuite précisés pour lancer les simulations.

Un nombre défini d'événements est au préalable généré par le générateur SCALPGENERATOR. Deux types de réactions peuvent être générés :

- Les événements sont générés avec un tirage à plat : dans ce cas une ou plusieurs réactions peuvent être étudiées en ne prenant en compte que la gamme en énergie cinétique des neutrons.
- Les événements sont générés en prenant en compte le flux de neutrons incidents (en l'occurrence provenant de NFS) : dans ce cas les sections efficaces (provenant de la bibliothèque ENDF/B-VII.1) sont prises en compte, de même que la concentration moléculaire du gaz étudié (soit du  $\text{CF}_4$  pur soit le mélange de  $\text{CF}_4$  et de  $\text{CO}_2$ ).

Enfin le nombre d'événements est ensuite précisé pour que le fichier contenant les événements soit créé.

Les organisations du générateur d'événements SCALPGENERATOR et du programme de simulation SICSIMULATION sont expliquées dans les parties suivantes (respectivement 3.2 et 3.3).

## 3.2 Le générateur d'événements SCALPGENERATOR

SCALPGENERATOR génère un nombre d'événements qui seront ensuite propagés par GEANT4 dans le volume actif de la chambre d'ionisation. Il prend en compte la composition du gaz simulé (les isotopes  $^{19}\text{F}$  et  $^{12}\text{C}$  pour du  $\text{CF}_4$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$ , et  $^{18}\text{O}$  en plus pour le mélange de gaz contenant du  $\text{CF}_4$  et du  $\text{CO}_2$ ), le flux de neutron utilisé pour les simulations et la section efficace des réactions générés (suivant les bases de données nucléaires décrites dans la partie 1.2.3).

Pour permettre un gain de temps dans la génération d'événements, chaque neutron subira une interaction (ce qui est faux dans la réalité). Ce biais implique donc que le temps n'est pas pris en compte dans le flux et dans les sections efficaces. Cette information est importante pour l'estimation de la section efficace à partir des simulations (dans la partie 4.2). En effet, la section efficace est estimée en prenant en compte le nombre de particules ayant interagi (en particules.s<sup>-1</sup>) (voir l'équation 1.10 en page 10).

### 3.2.1 Concentration moléculaire du gaz simulé

L'estimation de la concentration moléculaire du gaz simulé est nécessaire pour permettre la génération des événements le plus fidèlement possible à la réalité (pour que

ces événements soient pondérés avec le nombre de noyaux par isotopes dans le mélange gazeux). En prenant un gaz parfait ayant pour masse volumique  $\rho$ , pour pression  $P$ , pour masse molaire  $M$  et pour température  $T$ , la concentration moléculaire  $c$  est estimée de la façon suivante :

$$c = \frac{\rho}{M} = \frac{P}{RT} \quad (3.1)$$

Le tableau 3.1 liste les masses atomiques et les abondances isotopiques des noyaux composant les gaz étudiés. Les trois isotopes principaux sont  $^{19}\text{F}$ ,  $^{12}\text{C}$  et  $^{16}\text{O}$ . Le tableau 3.2 liste les masses molaires et les masses volumiques pour les gaz étudiés (pression de 1 bar et température de gaz 25 °C soit 298,15 K).

Une molécule de  $\text{CF}_4$  contient cinq atomes, quatre atomes de fluor et un atome de carbone. Une molécule de  $\text{CO}_2$  contient trois atomes, deux atomes d'oxygène et un atome de carbone. Par conséquent, pour un mélange de gaz contenant 97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ , le nombre moyen d'atomes par molécule est de 4,94 (voir le tableau 3.3 en page 71).

Noyau	Masse ( u)	abondance isotopique
$^{19}\text{F}$	18,998 40	1
$^{12}\text{C}$	12	0,9893
$^{13}\text{C}$	13,003 35	0,0107
$^{16}\text{O}$	15,994 91	0,997 57
$^{17}\text{O}$	16,999 13	0,000 38
$^{18}\text{O}$	17,999 16	0,002 05

TABLEAU 3.1 – Masse des noyaux utilisé par SCALPGENERATOR dans les conditions standards de température et de pression.

Au final, dans le cas du gaz  $\text{CF}_4$ , 80% sont des atomes de fluor (soit 80% de  $^{19}\text{F}$ ), 20% des atomes de carbone (19,79% dans le cas des  $^{12}\text{C}$  et 0,21% pour des  $^{13}\text{C}$ ). Dans le cas du mélange gazeux, 78,54% des atomes sont des  $^{19}\text{F}$ , 20,03% des  $^{12}\text{C}$ , 1,21% des  $^{16}\text{O}$  et 0,22% des  $^{13}\text{C}$ . Les isotopes  $^{17}\text{O}$  et  $^{18}\text{O}$  sont en quantité négligeables.

Gaz	Masse molaire $M$ ( g/mol)	Masse volumique $\rho$ ( g/cm <sup>-3</sup> )
$\text{CF}_4$	88,004 35	$3,550\ 06 \times 10^{-3}$
$\text{CO}_2$	44,009 55	$1,775\ 33 \times 10^{-3}$
Mélange	86,684 50	$3,496\ 81 \times 10^{-3}$

TABLEAU 3.2 – Masse molaire et masse volumique des gaz simulés utilisés par SCALPGENERATOR dans les conditions standards de température et de pression (25 °C et 1 bar). La ligne "Mélange" symbolise un mélange composé de 97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ .

A partir des données issues du tableau 3.2, la concentration moléculaire (dans le cas où le gaz, considéré comme étant parfait, est à une pression de 1 bar et une température de

Noyau ou isotope	Nombre par molécule et pourcentage					
	CF <sub>4</sub>		CO <sub>2</sub>		97% CF <sub>4</sub> + 3% CO <sub>2</sub>	
F	4	80%			3,88	78,5425%
C	1	20%	1	33,3%	1	20,2429%
O			2	66,7%	0,06	1,2146%
<sup>19</sup> F	4	80%			3,88	78,5425%
<sup>12</sup> C	0,9893	19,79%	0,9893	32,98%	0,9893	20,0263%
<sup>13</sup> C	0,0107	0,21%	0,0107	0,36%	0,0107	0,2166%
<sup>16</sup> O			1,995 14	66,50%	0,059 85	1,2116%
<sup>17</sup> O			0,000 76	0,03%	0,000 02	0,0005%
<sup>18</sup> O			0,004 10	0,14%	0,000 12	0,0025%
Total	5		3		4,94	

TABLEAU 3.3 – Nombre d’atomes ou d’isotopes en moyenne par molécule et pourcentage associé, dans les conditions standards de température et de pression (25 °C et 1 bar).

298, 15 K) est estimée à  $4,033\,955 \times 10^{-5}$  mol/cm<sup>-3</sup>. Les concentrations attendues dans le mélange gazeux sont représentées dans le tableau 3.4. La concentration du noyau <sup>19</sup>F est prédominante sur toutes les autres concentrations.

Concentration dans le mélange	
Moléculaire	$2,016\,98 \times 10^{-4}$ mol/cm <sup>-3</sup>
Atomique	$1,992\,77 \times 10^{-4}$ mol/cm <sup>-3</sup>
Noyau	Composition
<sup>19</sup> F	$1,565\,17 \times 10^{-4}$ mol/cm <sup>-3</sup>
<sup>12</sup> C	$3,990\,79 \times 10^{-5}$ mol/cm <sup>-3</sup>
<sup>13</sup> C	$4,316\,33 \times 10^{-7}$ mol/cm <sup>-3</sup>
<sup>16</sup> O	$2,414\,49 \times 10^{-6}$ mol/cm <sup>-3</sup>
<sup>17</sup> O	$9,197\,42 \times 10^{-10}$ mol/cm <sup>-3</sup>
<sup>18</sup> O	$4,961\,76 \times 10^{-9}$ mol/cm <sup>-3</sup>

TABLEAU 3.4 – Concentrations et compositions des noyaux dans le mélange de gaz.

### 3.2.2 Bilan et seuils des réactions simulés

Suivant les équations de conservations introduites dans la partie 1.2.1.1 et en prenant les masses listées dans le tableau 3.1, les bilans de réactions ( $Q$ ) et les seuils en énergie des équations simulés dans le cadre de ce projet sont présentés dans le tableau 3.5.

Le calcul de ces bilans est utile pour vérifier les résultats de la générations d’événements par SCALPGENERATOR.

Réaction	Bilan $Q$ ( MeV)	Seuil ( MeV)
$^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$	$1,818 \pm (-9,971 \times 10^{-8})$	
$^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$	$-1,525 \pm (-4,084 \times 10^{-7})$	$1,606 \pm (4,300 \times 10^{-7})$
$^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$	$-2,216 \pm (-9,970 \times 10^{-8})$	$2,355 \pm (1,060 \times 10^{-7})$
$^{13}\text{C}(n,\alpha)^{10}\text{Be}$	$-3,836 \pm (-1,018 \times 10^{-7})$	$4,133 \pm (1,097 \times 10^{-7})$
$^{19}\text{F}(n,p)^{19}\text{O}$	$-4,038 \pm (-4,362 \times 10^{-7})$	$4,252 \pm (4,594 \times 10^{-7})$
$^{18}\text{O}(n,\alpha)^{15}\text{C}$	$-5,010 \pm (-1,765 \times 10^{-7})$	$5,290 \pm (1,863 \times 10^{-7})$
$^{19}\text{F}(n,d)^{18}\text{O}$	$-5,769 \pm (-9,970 \times 10^{-8})$	$6,075 \pm (1,050 \times 10^{-7})$
$^{12}\text{C}(n,\alpha)^9\text{Be}$	$-5,702 \pm (-1,019 \times 10^{-7})$	$6,181 \pm (1,105 \times 10^{-7})$
$^{19}\text{F}(n,t)^{17}\text{O}$	$-7,557 \pm (-9,970 \times 10^{-8})$	$7,958 \pm (1,050 \times 10^{-7})$

TABLEAU 3.5 – Bilan et seuil des réactions prenant place dans les simulations (dans le sens des seuils en énergie croissant).

### 3.2.3 Sections efficace utilisées par le générateur d'événements

Les sections efficaces utilisées dans ce générateur d'événements sont issues de la bibliothèque ENDF/B-VII.1 (excepté pour les réactions sur le  $^{18}\text{O}$  où est utilisée la bibliothèque JEFF-3.2). Les sections efficaces prises sur le carbone sont celles sur le carbone naturel ( $^{\text{nat}}\text{C}$ ).

Les sections efficaces utilisées par le programme, du seuil des réactions 10 MeV, sont représentées sur la figure 3.2 (en page 73). Comme on peut le remarquer sur cette figure, les réactions (n, $\alpha$ ) sont prédominantes pour des neutrons d'une énergie inférieure à 10 MeV. Concernant les réactions induites par neutron où une (ou plusieurs) particule(s) chargée(s) est(sont) émise(s), les sections efficaces des réactions  $^{19}\text{F}(n,\alpha)$  et  $^{16}\text{O}(n,\alpha)$  sont prédominantes, hormis sous 1,6 MeV où seule la réaction  $^{17}\text{O}(n,\alpha)$  existe (réaction sans seuil).

### 3.2.4 Flux neutronique

Les sections efficaces des réactions  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  et  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  dépendent de l'énergie cinétique du neutron incident. Dans le cadre du projet SCALP, les neutrons incidents seront émis par la ligne de faisceau NFS [130]. Cette installation, actuellement en construction et en phase de test, fait partie de SPIRAL-2 [131] sur le site du GANIL à Caen, et se spécialise dans la production de faisceaux d'ions radioactifs. L'installation NFS contient une salle d'expérience de 30 m de long à partir de la source de neutrons, permettant ainsi de réaliser des mesures de temps de vol.

Cette ligne se trouve après l'accélérateur LINAG qui produit des protons et des deutons d'énergie cinétique maximale de 33 et 40 MeV respectivement. Les neutrons sont émis à partir des réactions  $^9\text{Be}(d,n)$  sur une gamme en énergie comprise entre 100 keV et 40 MeV avec un pic vers 14 MeV. La réaction  $^7\text{Li}(p,n)$  est aussi utilisée et émet des neutrons mono-énergétique de 28 MeV et un fond continu.

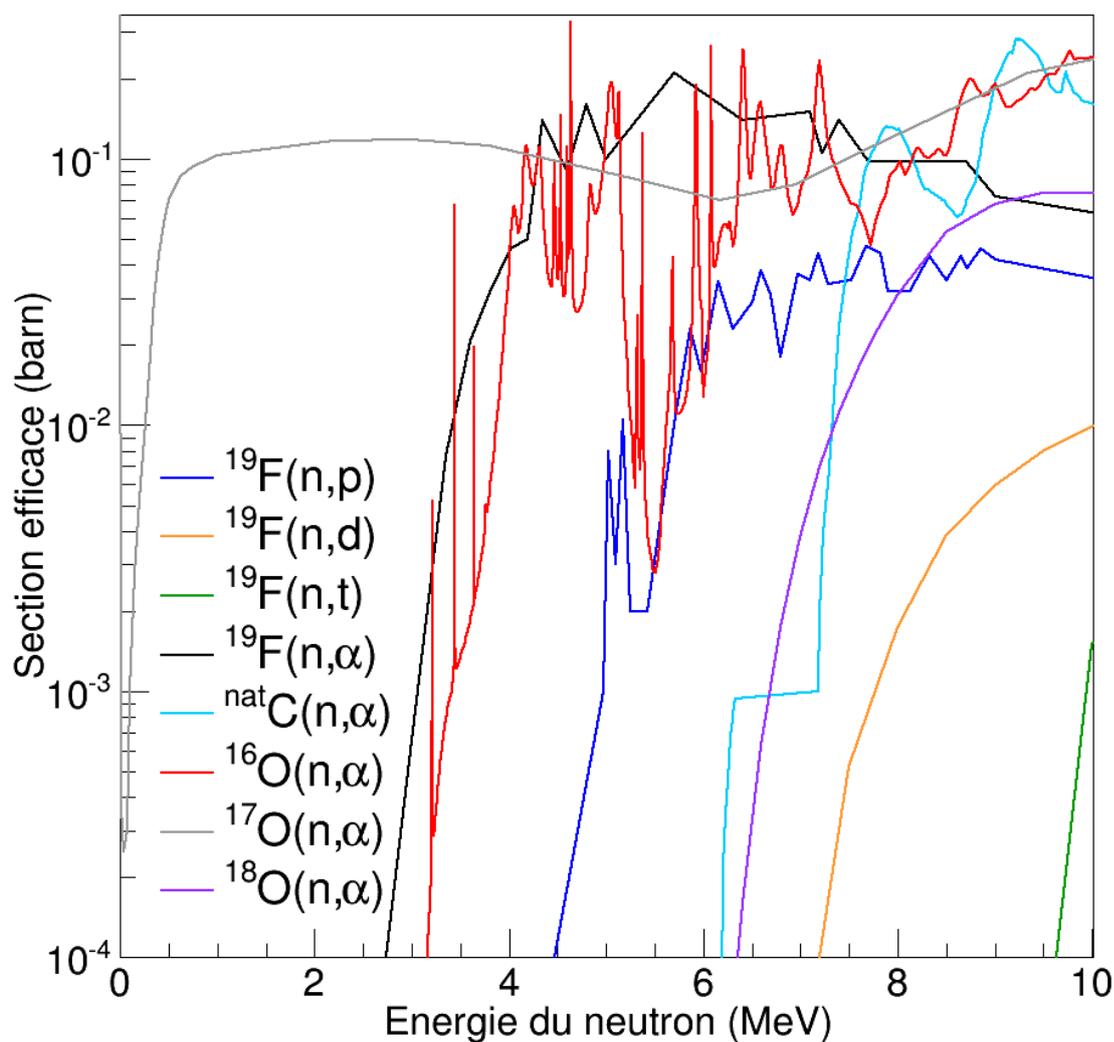


FIGURE 3.2 – Sections efficaces des réactions (n,p), (n,d), (n,t) et (n, $\alpha$ ) dont le seuil en énergie est en-dessous de 10 MeV, issues de la bibliothèque ENDF/B-VII.1 (excepté pour les réactions sur le  $^{18}\text{O}$  où est utilisée la bibliothèque JEFF-3.2). Les courbes des sections efficaces des deux réactions d'intérêts,  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  et  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ , sont respectivement représentées en noir et en rouge.

L'intensité moyenne maximale du faisceau d'ions attendue à la sortie du convertisseur serait estimée à  $50 \mu\text{A}$  [132]. Ces intensités dépendent du chopper utilisé pour contrôler la période du faisceau. Sans utiliser de chopper, l'intensité moyenne maximale du faisceau d'ions est de 5 mA.

La figure 3.3 (en page 75) représente le flux neutronique (échelle logarithmique en ordonnée) attendu pour différentes distances entre la source de neutron et le détecteur (de 5 à 20 m). Le flux diminue pour des neutrons de 5 MeV, puis augmente pour des neutrons de 14 MeV et enfin diminue. L'énergie maximale des neutrons attendue serait de 40 MeV. Pour une distance source-détecteur définie, plus l'intensité moyenne du faisceau d'ions est grande, plus le flux estimé est important. Par conséquent, le flux estimé de neutrons incidents serait le plus faible pour une faible intensité moyenne du faisceau d'ions (par exemple à  $10 \mu\text{A}$ ) et à une distance loin de la source (à 20 m). A contrario, il serait plus élevé pour une intensité moyenne grande ( $50 \mu\text{A}$ ) et pour un détecteur plus proche de la source (à 5 m). Respectivement, le flux neutronique total est donc compris entre  $8,5 \times 10^5$  et  $6,8 \times 10^7 \text{n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$ . Ces différences sur les estimations du flux de neutrons incidents sont particulièrement visibles sur la figure 3.3, où ne sont représentées que les extrémités de la base de vol (de 5 à 20 m) pour différentes intensités moyennes.

Pour les simulations, le flux neutronique utilisé par le programme SCALPGENERATOR est estimé pour une intensité de  $10 \mu\text{A}$  et une distance entre la source et le dispositif de 5 m. Sur la figure 3.3, ces estimations sont représentées par la courbe noire. Le flux neutronique moyen avec des paramètres est de  $1,36 \times 10^7 \text{n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$ . Pour des neutrons d'énergie cinétique inférieure à 10 MeV, le flux augmente puis diminue pour atteindre un minimum entre 4 et 5 MeV puis augmente.

### 3.3 Filtre expérimental (programme SICSIMULATION)

Ce programme appelé SICSIMULATION utilise GEANT4 pour simuler les interactions entre les neutrons incidents et les noyaux cibles (noyau d'oxygène et de fluor)<sup>1</sup>. SICSIMULATION permet d'obtenir les paramètres d'intérêt lors d'une interaction entre un neutron incident et un noyau de la zone active du détecteur. Ces résultats sont donnés en sortie sous forme d'un fichier ROOT qui utilise le programme d'analyse des données ROOT, également développé par le CERN [134], pour la construction des histogrammes. SICSIMULATION construit un arbre (ou TTREE) appelé SICEVENT contenant les valeurs des variables d'intérêt.

Différentes "options" sont nécessaires pour exécuter des simulations (dans l'ordre de l'organigramme présenté dans la figure 3.1 en page 68) :

- La géométrie utilisée pour les simulations est définie dans un fichier texte qui est appelé par le programme (pour cette partie, voir la partie suivante 3.3.2).
- Le programme permet de simuler un flux de neutron ayant un spectre sur une gamme en énergie définie. Dans ce cas, le générateur d'événement SCALPGENERATOR est utilisé. Ou alors les neutrons peuvent être mono-cinétiques. Cette option permet également d'étudier, au choix, une seule réaction à la fois ou un ensemble de réactions.

---

1. La version de GEANT4 utilisé dans ces simulations est la version 9.6.2 de 2013 [133].

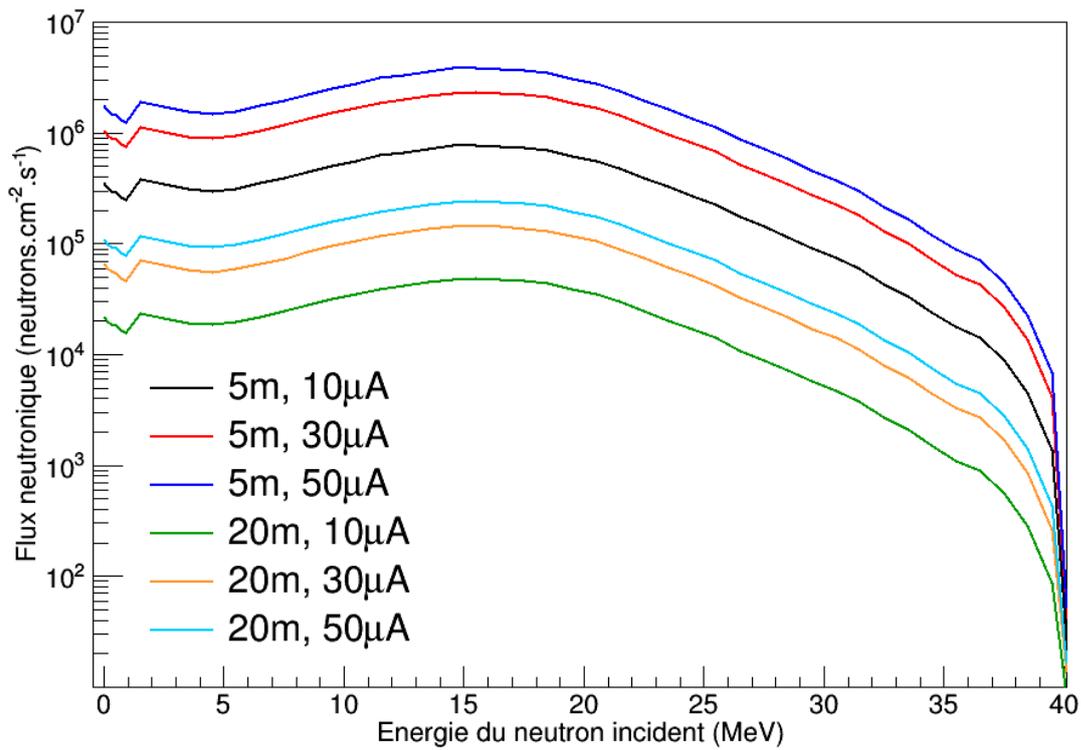


FIGURE 3.3 – Flux neutronique (pour un angle d'émission de 0°) estimé de l'installation NFS pour différentes distances entre le convertisseur (la source des neutrons) et le détecteur et pour différentes intensités moyennes du faisceau d'ions attendues. Le flux neutronique utilisé dans les simulations dans le projet SCALP est représenté en noir.

- Deux gaz sont étudiés : le  $\text{CF}_4$  et le mélange gazeux (97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ ).
- Le nombre d'événement à simuler est également demandé.

### 3.3.1 Généralités sur les simulations GEANT4

Une simulation est une imitation artificielle d'un dispositif ou d'un système [135] qui permet de représenter un problème par un modèle qui pourra ensuite être analysé. La méthode de Monte Carlo est une approche probabiliste permet ainsi de simuler la réalité [102, 135]. Dans notre cas, chaque neutron incident est simulé individuellement, ce qui permet de déterminer, à chaque événement, les paramètres associés. La méthode de Monte Carlo est à la base de certains programmes de simulation de transport de particules, comme MCNP (Monte Carlo N-Particle transport) ou GEANT4.

GEANT4 (pour GEometry ANd Tracking) [136] est un programme de simulation de type Monte-Carlo créé par le CERN qui permet la simulation du passage de particules à travers la matière. Développé par le CERN, il est utilisé en physique des particules, en physique nucléaire, dans l'ingénierie et la physique médicale [137, 138].

GEANT4 utilise plusieurs paquetages, notamment liés à la géométrie du système simulé, des interactions des particules dans le milieu ou de la réponse du détecteur. Le programme permet d'enregistrer chaque événement simulé, ainsi que les détails ou paramètres relatifs à celui-ci. La visualisation de la géométrie et des trajectoires des particules lors d'une simulation sont également possibles. Les programmes basés sur GEANT4 peuvent utilisés différentes sortes de particules primaires (la particule qui interagit) ainsi que différentes interactions induites.

### 3.3.2 Géométrie utilisée par le programme SICSIMULATION

La structure géométrique du système modélisé est décrite par des formes géométriques (et de leurs dimensions) et des matériaux utilisés. Ces formes sont ensuite incluses dans un environnement (appelé l'univers) en utilisant leurs coordonnées suivant trois axes ( $\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}$ ). Le centre de l'univers simulé est l'origine (0,0,0), et les particules incidentes sont émises suivant  $\vec{z}$ .

La géométrie utilisée par le programme SICSIMULATION pour les simulations GEANT4 est donc centrée sur l'origine (0,0,0). L'enceinte extérieure est de forme cylindrique. Elle permet de confiner le gaz pour les manipulations ( $\text{CF}_4$  et le mélange de  $\text{CF}_4$  et  $\text{CO}_2$ ). A l'intérieur se trouve la chambre d'ionisation. Les deux électrodes (l'anode et la cathode) consistent en deux plaques d'inox 304 qui sont distancées de 13 cm (cette distance est discutée dans la partie 3.5 dans la chapitre 4). Le dégradeur de champ<sup>2</sup> consiste en une succession de fils de cuivre (de diamètre de 0,2 mm) qui entoure le volume de gaz entre l'anode et la cathode. Ces fils sont séparés d'une distance de 10 mm et permettent de former la chambre d'ionisation (de forme cubique dans les simulations, de forme hexagonale par la suite) avec une largeur de 10 cm. Pour les simulations, cette largeur n'influe pas sur les résultats, la largeur du faisceau de neutron (au centre de la chambre d'ionisation) étant de 5 cm. La chambre d'ionisation est fixée à la paroi extérieur par des potences en époxy. Une des deux électrodes et les fils du dégradeur de champ étant connectés à une

---

2. Pour rappel, le dégradeur de champ améliore la collection des charges dans la chambre d'ionisation et uniformise le champ électrique entre l'anode et la cathode (voir la partie 2.3.1.1).

haute tension, ces potences ont aussi le rôle d'isolant. Les quatre photo-multiplicateurs entourent la chambre d'ionisation (avec une distance avec les fils de cuivre) et sont centrés sur le volume utile.

La figure 3.4 (en page 78) représente le schéma de la géométrie simulée par le programme SICSIMULATION. La chambre d'ionisation n'est pas centrée dans l'enceinte extérieure, car les vannes utilisées pour faire le pompage et faire le remplissage de gaz ne devraient pas, dans la mesure du possible, se situer sur l'axe du faisceau de neutron incident.

Sur la figure 3.5 (en page 79) est représentée la géométrie (simulant le dispositif expérimental) du projet SCALP par le programme SICSIMULATION à partir de GEANT4. Dans le cas présenté un neutron a interagi (le vertex de l'interaction) est visible en rouge et les photons reçus par les quatre photo-cathodes sont en vert.

### 3.3.3 Paramètres déterminés à partir des simulations

Dans le cadre de ce projet, différents paramètres sont déterminés pour chaque événement simulé.

- Les coordonnées du vertex d'interaction  $(x_0, y_0, z_0)$  selon les axes  $\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}$  (l'axe  $\vec{z}$  correspond à l'axe du faisceau de neutrons incidents) permettent de visualiser où se produit l'interaction (et rendent possible le contrôle sur les effets de bords s'ils existent).
- Le temps de vol de la particule incidente  $t_0$  est également déterminé sur la base de vol de 5 m plus la longueur  $z_0$ . Ce paramètre permet ensuite de déterminer l'énergie du neutron incident (de manière analogue à la méthode expérimentale).
- Les paramètres suivants sont déterminés concernant la particule émise et le noyau résiduel : le numéro atomique, le nombre de masse, l'énergie, les angles polaires et azimutales d'émissions.
- Les paramètres liés à la scintillation (photo-multiplicateur) : le nombre moyen de photo-électron  $npe_i$  émis par chaque photo-cathode  $i$  et le temps simulé entre l'interaction et la détection des photons par les photo-multiplicateurs  $t dc_i$  sont déterminés. Ces deux paramètres sont très importants, le premier représentant la quantité de lumière détectée par les photo-multiplicateurs et le second permettant d'en déduire la résolution sur le temps.
- Les paramètres liés à l'ionisation (chambre d'ionisation) : l'énergie déposée par l'ionisation dans le volume actif de la chambre d'ionisation, les extrémités du dépôt d'énergie le long de l'axe du faisceau de neutron et le parcours en profondeur de ce dépôt d'énergie.

## 3.4 Génération d'événements par SCALPGENERATOR

Suivant les paramètres introduits dans le paragraphe 3.2,  $5 \times 10^7$  événements (soit  $5 \times 10^7$  neutrons) ont été générés (pour du  $CF_4$  pur et pour un mélange gazeux de  $CF_4$  et  $CO_2$ ).

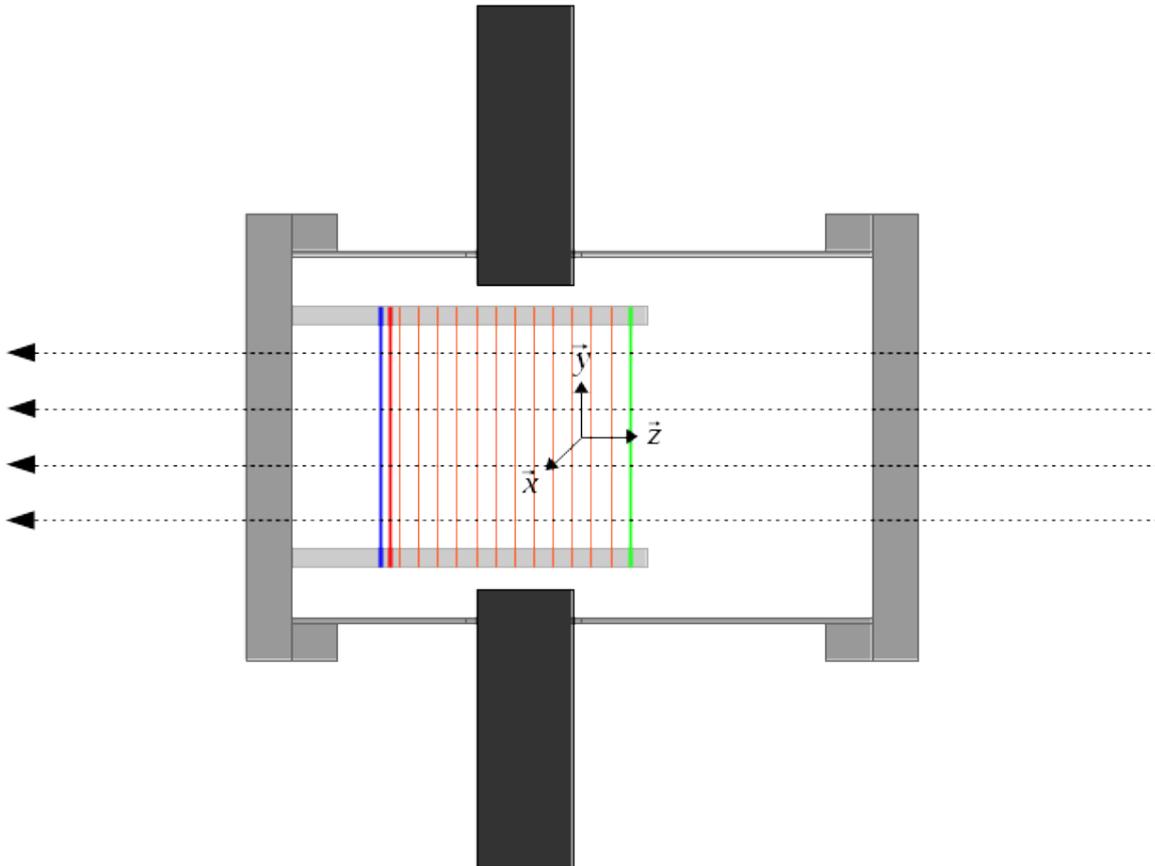


FIGURE 3.4 – Schéma de la géométrie (coupe vue de profil) utilisée dans le programme SICSIMULATION pour simuler le dispositif expérimental. En gris les structures en inox 304 qui composent la chambre externe. La chambre d'ionisation, à l'intérieur, est composée de deux électrodes se faisant face (en bleu l'anode et en vert la cathode) et est délimitée par les fils de cuivre (en orange) composant le dégradeur de champ, cette chambre a une grille de Frish (en rouge). En noir la couronne composée de quatre photo-multiplicateurs centrée sur la chambre d'ionisation. Les flèches en pointillés précisent la direction et le sens des neutrons incidents.

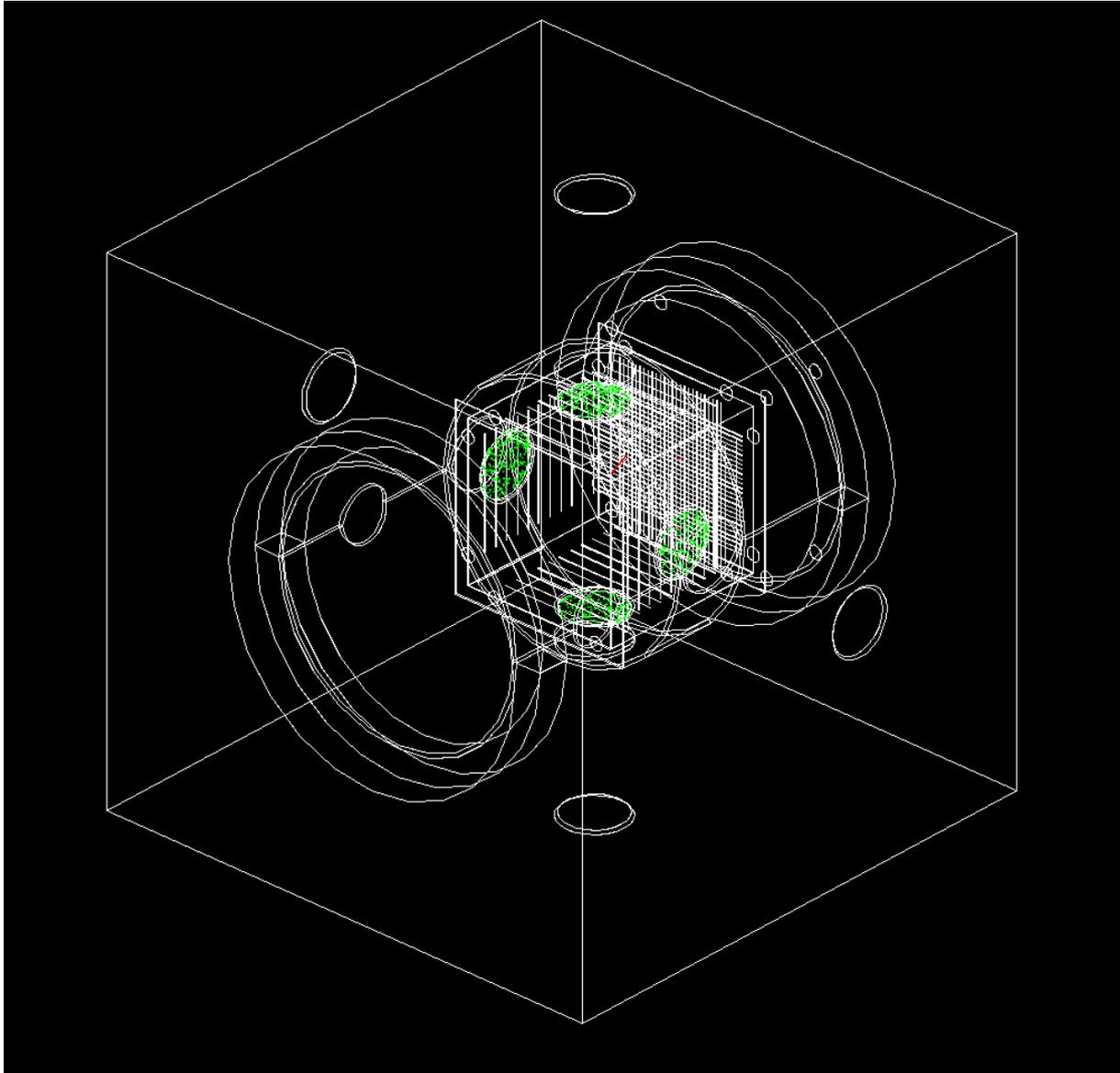


FIGURE 3.5 – Géométrie du projet SCALP par le programme SICSIMULATION à partir de GEANT4. Les structures (arêtes) des composants du dispositif expérimental sont en blanc. Le vertex de l'interaction est visible en rouge et les photons reçus par les photo-cathodes sont en vert.

Le nombre d'événements par réaction simulée pour les deux gaz d'études est listé dans le tableau 3.6. La différence avec la composition idéale du mélange gazeux qu'il y aurait dans la réalité (voir le tableau 3.3 en page 71) est visible, due à la prise en compte des sections efficaces et du seuil en énergie de chaque réaction. Le  $\text{CF}_4$  est composé de 80% de  $^{19}\text{F}$  et 20% de  $^{12}\text{C}$ , le pourcentage des réactions simulés pour chacun des noyaux est respectivement de 87,1% et 12,9%. Pour le mélange gazeux simulé, la composition est de 78,5% de  $^{19}\text{F}$ , 20,2% de  $^{12}\text{C}$  et 1,2% de  $^{16}\text{O}$ , alors que le pourcentage des réactions simulés est respectivement de 85,7%, 13,1% et 1,2%.

Réaction ou noyau	Gaz simulé			
	$\text{CF}_4$		97% $\text{CF}_4$ + 3% $\text{CO}_2$	
$^{19}\text{F}(\text{n,p})$	8 943 197	17,886%	8 796 598	17,593%
$^{19}\text{F}(\text{n,d})$	1 071 136	2,142%	1 053 701	2,107%
$^{19}\text{F}(\text{n,t})$	94 852	0,190%	93 577	0,187%
$^{19}\text{F}(\text{n},\alpha)$	33 436 196	66,872%	32 909 011	65,818%
$^{12}\text{C}(\text{n},\alpha)$	6 454 619	12,909%	6 544 690	13,089%
$^{16}\text{O}(\text{n},\alpha)$			601 742	1,203%
Autre			681	0,001%
$^{19}\text{F}$	43 545 381	87,091%	42 852 887	85,706%
$^{12}\text{C}$	6 454 619	12,909%	6 544 690	13,089%
$^{16}\text{O}$			601 742	1,203%

TABLEAU 3.6 – Nombre d'événements (et pourcentage) par réaction simulée dans les deux gaz d'études, pour des neutrons d'énergie maximale de 10 MeV.

Les figures 3.6 (en page 81) et 3.7 (en page 82) représentent le nombre d'événements (par pas en énergie de 10 keV), respectivement pour des réactions simulées dans du  $\text{CF}_4$  et dans du mélange gazeux, pour des neutrons d'énergie maximale de 10 MeV. La prise en compte du flux de neutrons incidents et des sections efficaces sont particulièrement visibles, en particulier pour les réactions  $^{19}\text{F}(\text{n},\alpha)$ ,  $^{19}\text{F}(\text{n,p})$  et  $^{16}\text{O}(\text{n},\alpha)$ .

L'estimation avec une bonne précision de la section efficace principalement à basse énergie, en particulier pour les deux réactions d'intérêts, est complexe, à cause de la faible statistique sur cette gamme en énergie. Hormis la réaction  $^{16}\text{O}(\text{n},\alpha)$ , le nombre d'événements par intervalle d'énergie entre les deux gaz des simulations est comparable (cette réaction ne comptant que pour 1,2% des réactions simulées).

### 3.5 Dimensions de la chambre d'ionisation

Les dimensions de la chambre d'ionisation ont été déduites par simulation, en particulier la distance entre l'anode et la cathode (longueur de la chambre d'ionisation).

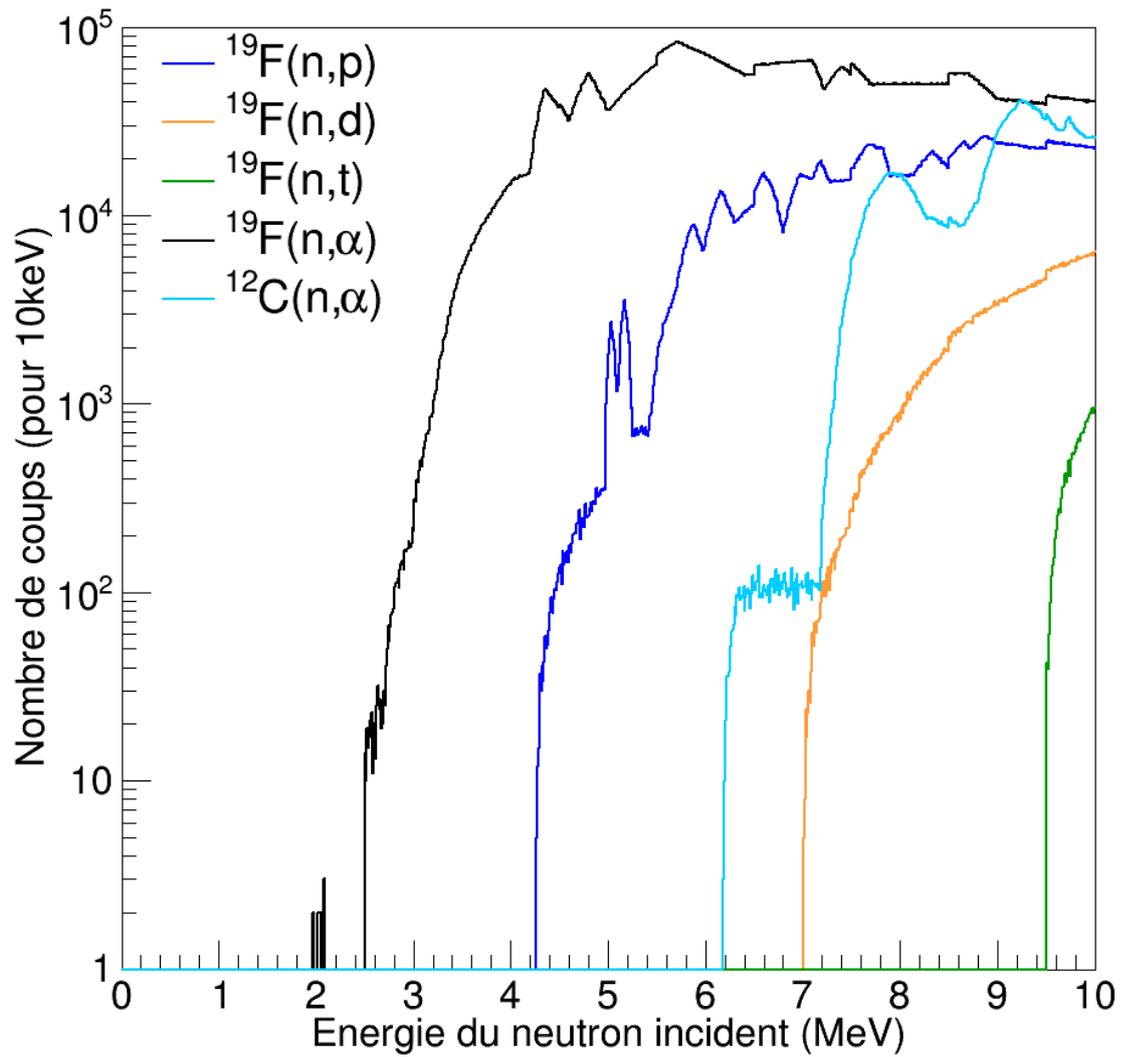


FIGURE 3.6 – Nombre de coups (par pas en énergie de 10 keV) pour chaque réaction dans du  $\text{CF}_4$  pur, pour des neutrons d'énergie maximale de 10 MeV.

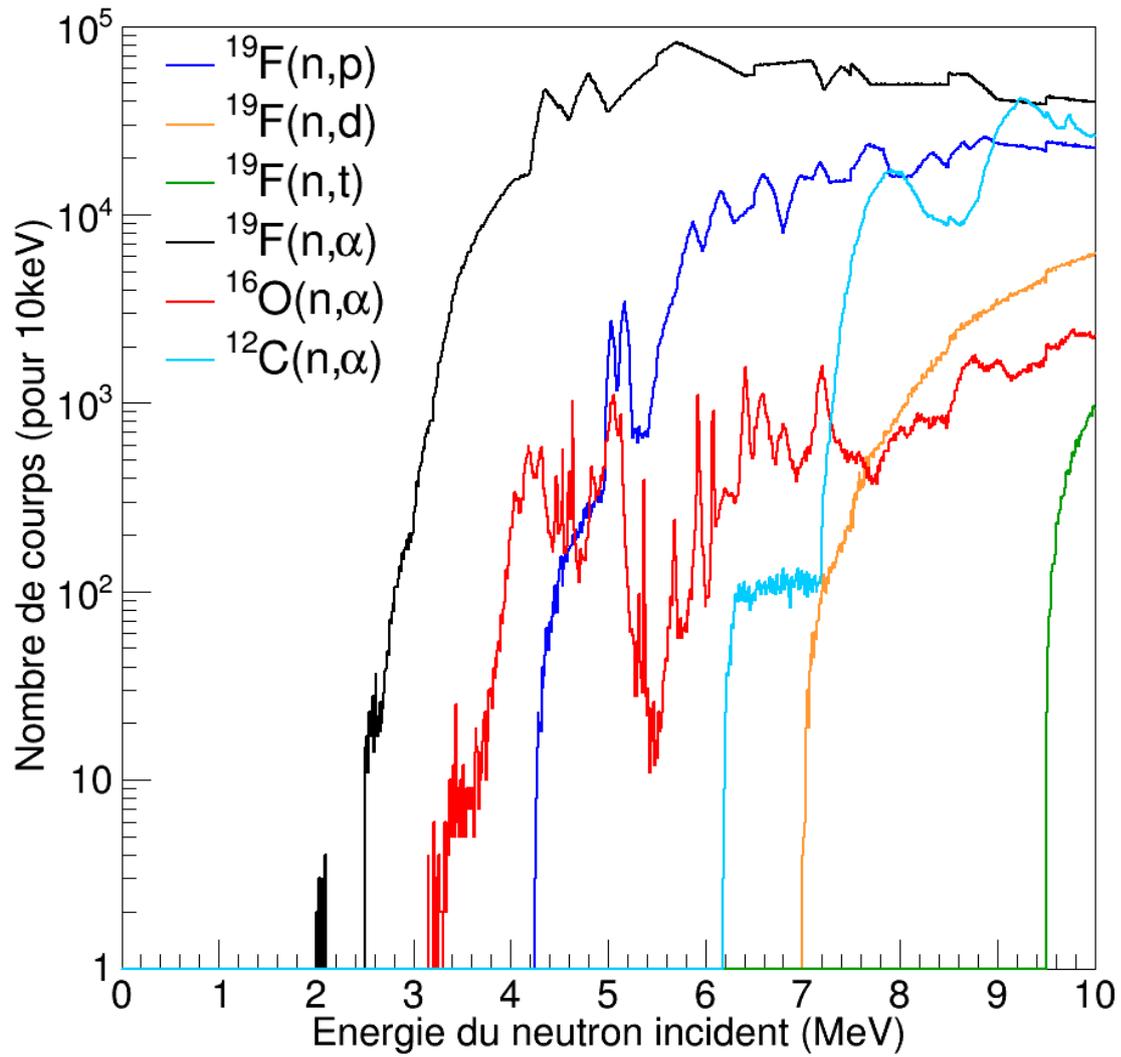


FIGURE 3.7 – Nombre de coups (par pas en énergie de 10 keV) pour chaque réaction dans le mélange gazeux (97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ ), pour des neutrons d'énergie maximale de 10 MeV.

Pour limiter les dimensions de la chambre externe, celle-ci doit être compacte, permettant ainsi d’optimiser les performances attendues. Par conséquent, la longueur de la chambre d’ionisation doit faire au maximum 15 cm. Pour que les réactions aient lieu et que les énergies soient correctement déposées dans le volume utile, une longueur minimale de 10 cm est choisie.

Pour définir la longueur de la chambre d’ionisation offrant les meilleurs performances, une étude sur l’estimation du temps de manipulation nécessaire d’avoir suffisamment de statistiques (correspondante à la précision voulue) à une énergie donnée est faite. Pour un flux de neutron incidents provenant de la ligne NFS à une distance entre le convertisseur (à la sortie de la ligne) et le détecteur de 5 m, pour une intensité moyenne de faisceau d’ions de  $10 \mu\text{A}$  et pour des neutrons d’énergie cinétique de 5,51 MeV, les estimations sont faites pour 10 000 événements détectés (1% de précision) dans la chambre à cette énergie pour chacune des deux réactions d’intérêts ( $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  et  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ ) dans le mélange (97%  $\text{CF}_4$  et 3%  $\text{CO}_2$ ). Cette méthode sera présentée plus en détail dans la partie 4.3. A cette énergie la section efficace de la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  est évaluée à 180,14 mb, alors que celles évaluées sur la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  sont beaucoup plus faible (2,78 mb par l’évaluation ENDF/B-VII.1 et 4,14 mb ENDF/B-VIII.B3).

Le tableau 3.7 représente les temps d’acquisition requis (estimation) pour différentes longueurs de la chambre d’ionisation. Ces estimations sont faites à partir des paramètres précisés précédemment. Plus la longueur de la chambre d’ionisation sera longue, plus les temps d’acquisition seront courts.

Réaction	$^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$	$^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$	$^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$
Bibliothèque	ENDF/B-VII.1	ENDF/B-VII.1	ENDF/B-VIII.B3
Longueur ( cm)	Temps ( s)	Temps ( h)	Temps ( h)
10	$53,10 \pm 6,81$	$59,42 \pm 4,92$	$39,88 \pm 3,30$
11	$47,55 \pm 6,10$	$53,44 \pm 4,42$	$35,87 \pm 2,97$
12	$43,05 \pm 5,52$	$48,55 \pm 4,02$	$32,59 \pm 2,70$
13	$39,33 \pm 5,04$	$44,49 \pm 3,68$	$29,86 \pm 2,47$
14	$36,20 \pm 4,64$	$41,05 \pm 3,40$	$27,55 \pm 2,28$
15	$33,54 \pm 4,30$	$38,10 \pm 3,15$	$25,58 \pm 2,12$

TABLEAU 3.7 – Temps d’acquisition estimés pour avoir la statistique requise pour atteindre 1% d’erreurs statistiques. Ces estimations sont faites pour les réactions  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  (en seconde) et  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  (en heure) pour avoir 10 000 événements à une énergie de neutrons de 5,51 MeV.

Le nombre moyen de photo-électrons émis par photo-cathode  $\langle npe \rangle$  (qui est lié aux nombres de photons émis par la désexcitation du  $\text{CF}_4$  et reçus par la photo-cathode), ainsi que le CRT (le Coincidence Resolving Time, définie dans la partie 4.1.2.2, est la résolution en temps du dispositif simulé), sont également deux paramètres à étudier pour déterminer une longueur de la chambre d’ionisation. Les tableaux 3.8 et 3.9 représentent les valeurs moyennes des  $\langle npe \rangle$  et des  $CRT$ , respectivement pour les deux réactions d’intérêts, pour différentes énergies du neutron incident.

Grandeur	Énergie ( MeV)	Longueur ( cm)					
		10	11	12	13	14	15
<i>&lt; npe &gt;</i>	2	1,54	1,46	1,38	1,31	1,24	1,2
	3	4,52	4,28	4,08	3,85	3,69	3,54
	4	7,47	7,09	6,75	6,38	6,08	5,78
	5	10,57	9,95	9,52	9,02	8,62	8,2
	6	13,62	12,9	12,23	11,64	11,09	10,68
	7	16,66	15,8	14,99	14,25	13,71	13,14
	8	19,79	18,68	17,82	16,92	16,23	15,42
	<i>CRT</i>	2	1,23	1,19	1,19	1,2	1,17
3		1,11	1,16	1,14	1,17	1,18	1,19
4		0,95	0,98	0,99	1,02	1,04	1,06
5		0,78	0,82	0,85	0,85	0,9	0,91
6		0,66	0,69	0,58	0,74	0,76	0,8
7		0,55	0,59	0,6	0,64	0,66	0,66
8		0,47	0,49	0,51	0,55	0,56	0,6

TABLEAU 3.8 – Valeurs moyennes du nombre moyen de photo-électrons  $\langle npe \rangle$  et du CRT (Coincidence Resoving Time) pour la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  dans le mélange composé de 97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ .

Grandeur	Énergie ( MeV)	Longueur ( cm)					
		10	11	12	13	14	15
<i>&lt; npe &gt;</i>	3	2,5	2,36	2,24	2,14	2,03	1,94
	4	4,91	4,71	4,65	4,38	4,41	4,33
	5	7,05	6,9	6,73	6,51	6,41	6,09
	6	9,32	9,02	8,78	8,89	8,35	8,33
	7	11,42	11,05	10,84	10,39	10,4	9,99
	8	13,3	13,21	12,78	12,56	12	11,96
<i>CRT</i>	3	1,05	1,05	1,06	1,06	1,06	1,05
	4	0,92	0,95	0,95	0,97	0,99	1
	5	0,79	0,81	0,82	0,83	0,86	0,88
	6	0,65	0,67	0,68	0,72	0,75	0,75
	7	0,53	0,56	0,57	0,61	0,62	0,66
	8	0,45	0,49	0,49	0,5	0,54	0,57

TABLEAU 3.9 – Valeurs moyennes du nombre moyen de photo-électrons  $\langle npe \rangle$  et du CRT (Coincidence Resoving Time) pour la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  dans le mélange composé de 97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ .

A une énergie donnée et pour une réaction donnée, le nombre moyen de photo-électrons émis par photo-cathode  $\langle npe \rangle$  diminue au fur et à mesure que la longueur de la chambre

augmente. Ceci est dû au fait que les photo-multiplicateurs, qui sont centrés sur la chambre d'ionisation et donc sur le volume utile, détectent moins de photons issus de la désexcitation du  $\text{CF}_4$  si ces derniers sont émis loin du centre de la chambre. Ceci a une influence sur la résolution en temps, qui augmente plus la longueur de la chambre est grande. Plus la longueur de la chambre est grande, plus la valeur du CRT augmente (sauf pour les estimations faites proches du seuil où les valeurs restent similaires), plus la résolution en temps du dispositif se dégrade. Et plus la longueur de la chambre augmente, plus le nombre moyen de photo-électrons émis par photo-cathode diminue (à cause de l'angle solide). Il faut donc prendre une longueur de chambre permettant d'avoir des temps de manipulations correctes tout en limitant la dégradation de la résolution en temps et de la quantité de lumière détectée.

Une longueur de 13 cm est donc choisie. Cette longueur est choisie car elle permet ainsi de détecter suffisamment de photons lumineux (et de limiter la dégradation de la résolution en temps), tout en permettant d'avoir des temps d'acquisition estimés raisonnables.

## 3.6 Conclusion du chapitre

Ce chapitre avait pour but d'introduire au lecteur le programme de simulation utilisé dans ce projet. Le générateur d'événement SCALPGENERATOR permet de générer des événements en prenant en compte divers paramètres (comme les sections efficaces ou la composition du mélange de gaz). Les simulations basées sur GEANT4, utilisé par le programme SICSIMULATION, ont juste été introduites, les simulations et les résultats attendus seront développés dans le prochain chapitre.

$5 \times 10^7$  événements (soit  $5 \times 10^7$  neutrons) sont générés par SCALPGENERATOR, en utilisant du  $\text{CF}_4$  pur et le mélange gazeux composé de 97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ . Ces fichiers générés sont utilisés par le programme SICSIMULATION pour les simulations de la chambre d'ionisation. La dimension de cette dernière a été déterminée. Une longueur de 13 cm a été choisie, permettant de détecter suffisamment de photons lumineux, de limiter la dégradation de la résolution en temps, et de limiter les temps d'acquisition.

# Chapitre 4

## Traitement et analyse des données simulées

Dans le chapitre précédent ont été introduits les deux programmes utilisés pour les simulations dans le projet SCALP. Le générateur d'événements SCALPGENERATOR est tout d'abord utilisé pour générer une liste d'événements (relatifs à une réaction nucléaire à une énergie définie ou à un ensemble de réactions nucléaires sur une gamme en énergie).

Cette liste est ensuite utilisée par le programme SICSIMULATION basé sur GEANT4 pour propager un nombre de neutrons dans la chambre en les filtrant par le dispositif expérimental. La prise en compte des caractéristiques du dispositif expérimental permet de déterminer des sections efficaces après traitement en accord avec les sections efficaces d'entrée. Le fait que l'on place le détecteur à 5 m du collimateur à la sortie de la ligne de neutrons est une situation défavorable en terme de résolutions en temps mais favorable en terme de statistiques.

Dans ce chapitre, il sera d'abord effectué, dans une première partie, une analyse des événements générés par SCALPGENERATOR. Ensuite, les résultats issus des simulations seront présentés et discutés. Enfin, les estimations des sections efficaces pour les deux réactions d'intérêts ( $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  et  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ ) à partir des résultats des simulations seront présentées.

### 4.1 Traitement des données des simulations

#### 4.1.1 Traitement des particules chargées dans la chambre d'ionisation

Pour analyser les résultats, on sélectionne les événements bien détectés, soit les neutrons qui déposent toute (ou presque toute) leur énergie cinétique dans le volume utile de la chambre, après interaction avec un noyau cible ( $^{19}\text{F}$  ou  $^{16}\text{O}$ ).

La condition imposée est donc que l'énergie déposée (énergie perdue dans le gaz par le noyau résidu qui recule et par la particule légère qui ionise le gaz) dans la chambre soit supérieure à 95% à la somme des énergies de la particule émise et du noyau résidu, c'est-à-dire :

$$E_{dep} \geq 0.95 \cdot (E_p + E_{res}) \quad (4.1)$$

où  $E_{dep}$  représente l'énergie déposée par les particules de la réaction simulée dans la chambre d'ionisation et  $E_p$  et  $E_{res}$  respectivement l'énergie estimée de la particule émise (proton, deuton, triton, alpha) et du noyau résidu. Les événements satisfaisants cette condition sont considérés comme bons, car ils déposent quasiment toute l'énergie dans la chambre et donc permettent ainsi d'estimer le volume utile.

En annexe C se trouvent les tableaux relatifs aux coordonnées  $(x_0, y_0, z_0)$ , pour les événements déposant au moins 95% de leur énergie dans le volume utile : les tableaux C.1 et C.2 représentent les valeurs moyennes de  $x_0$  (valeurs moyennes de la coordonnée du vertex suivant l'axe  $\vec{x}$ ) par énergie pour ces événements, les tableaux C.3 et C.4 pour les valeurs moyennes de  $y_0$  (valeurs moyennes de la coordonnée du vertex suivant l'axe  $\vec{y}$ ) et les tableaux C.5 et C.6 pour les valeurs moyennes de  $z_0$  (valeurs moyennes de la coordonnée du vertex suivant l'axe  $\vec{z}$  qui est la direction du faisceau de neutrons incidents).

Ces coordonnées  $(x_0, y_0, z_0)$  en fonction de l'énergie cinétique des neutrons incidents et en fonction de l'énergie déposée (pour les deux gaz simulés) sont représentées en figure 4.1 (en page 89), en figure 4.2 (en page 90), en figure 4.3 (en page 91), en figure 4.4 (en page 92), en figure 4.5 (en page 93) et en figure 4.6 (en page 94).

Le faisceau du neutron incident étant de forme cylindrique et ayant un diamètre de 50 mm, la distribution des coordonnées  $x_0$  et  $y_0$  est comprise entre  $\pm 25$  mm. Les figures 4.1, 4.2, 4.3 et 4.4 montrent que les valeurs moyennes des coordonnées des événements déposant au moins 95% de leur énergie dans le volume utile sont centrées sur 0, soit au centre du faisceau (quelque soit la réaction étudiée). Ces courbes ont un aspect rectiligne : jusqu'à une énergie de 10 MeV, les neutrons déposant dans le volume utile au minimum 95% de leur énergie cinétique sont au centre de la tâche du faisceau.

Par contre, les coordonnées  $z_0$  sont comprises entre  $-110$  et  $20$  mm. Le centre de la chambre d'ionisation se trouve donc à une coordonnée de  $-45$  mm. Les figures 4.5 et 4.6 montrent que les valeurs moyennes de  $z_0$  (pour les événements déposant au moins 95% de leur énergie dans le volume utile) dépendent de la profondeur de la chambre. Plus l'énergie des neutrons incident augmente, plus l'énergie déposée augmente et plus la valeur moyenne  $z_0$  diminue (plus ces événements se rapprochent de la première électrode).

La différence de comportement entre les courbes relatives aux réactions (n,p) et les autres s'explique par le fait que les protons émis ont, pour une même énergie cinétique, un parcours dans la matière plus important que les deutons, les tritons et les particules alpha. Pour des neutrons d'énergie cinétique supérieure à 7,5 MeV, les événements des réactions (n,p) ne déposent plus leur énergie entièrement dans le volume utile. Cet effet est également visible sur les figures suivantes (jusqu'à la figure 4.16 en page 108) et serait visible aussi sur les réactions (n,d) et (n,t) si la chambre d'ionisation serait plus longue.

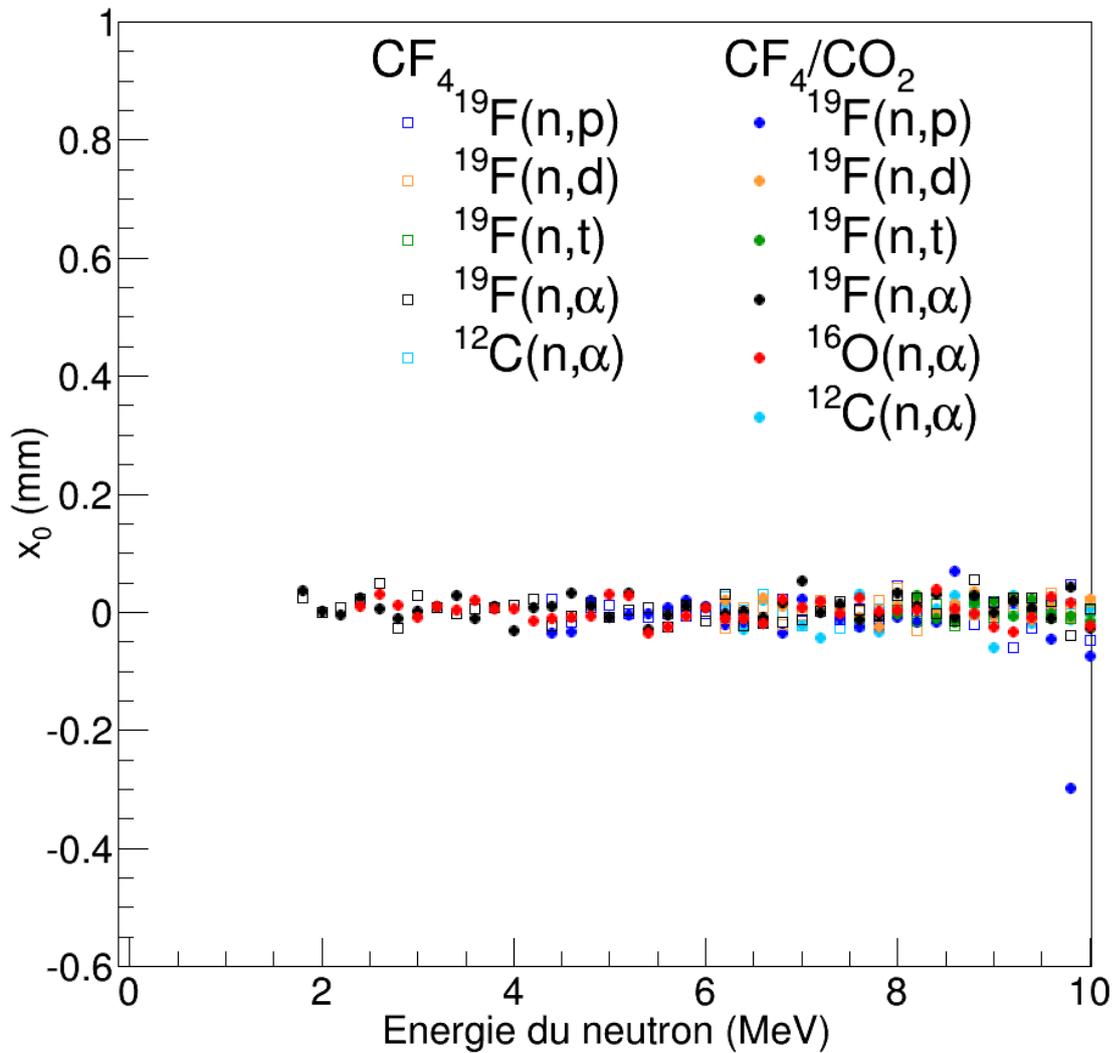


FIGURE 4.1 – Valeurs moyennes des coordonnées  $x_0$  en fonction de l'énergie du neutron incident.  $x_0$  est une des coordonnées du vertex du point d'interaction pour les diverses réactions. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulées dans le  $\text{CF}_4$ . Pour plus de clarté, les incertitudes ne sont pas représentées.

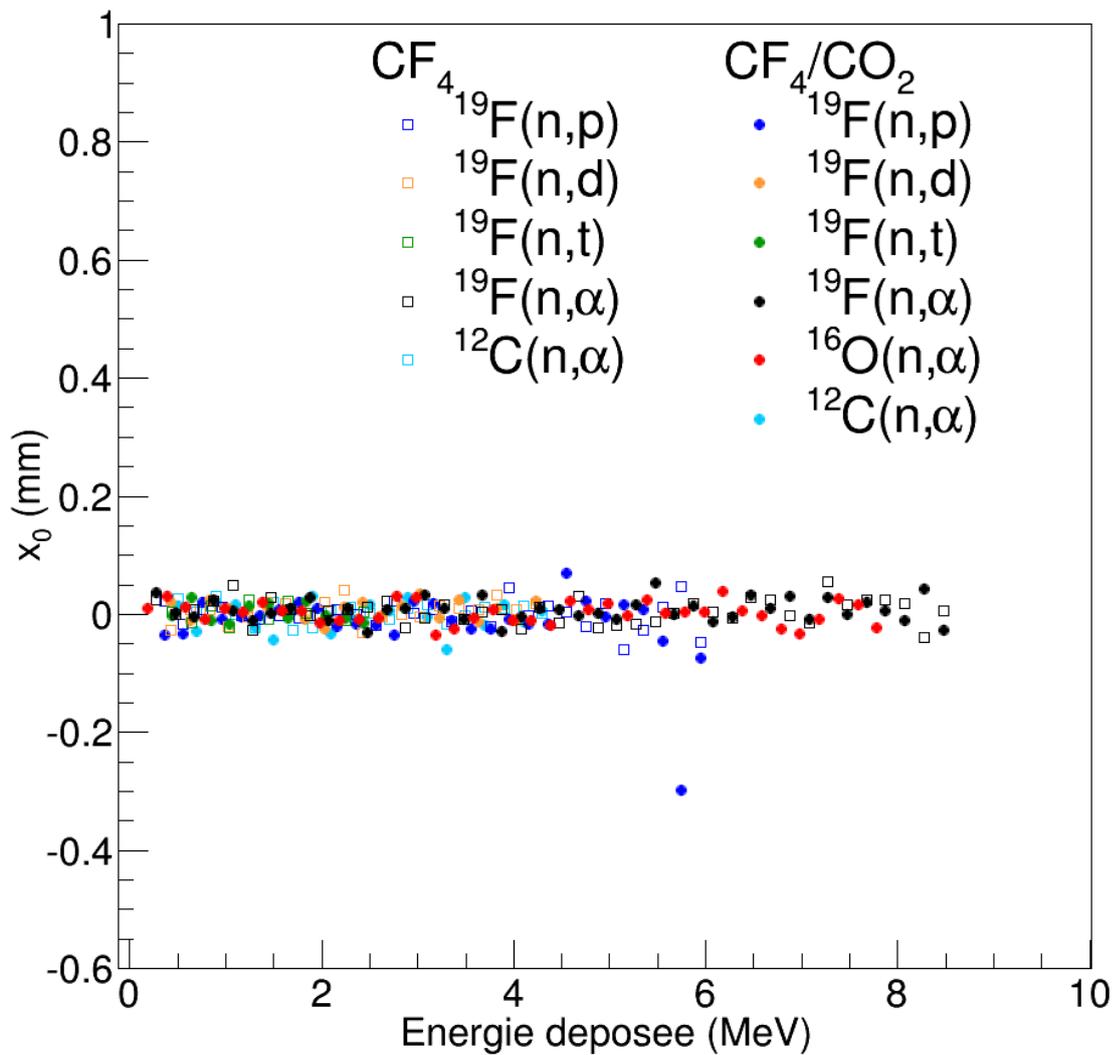


FIGURE 4.2 – Valeurs moyennes des coordonnées  $x_0$  en fonction de l'énergie déposée.  $x_0$  est une des coordonnées du vertex du point d'interaction pour les diverses réactions. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulées dans le  $\text{CF}_4$ . Pour plus de clarté, les incertitudes ne sont pas représentées.

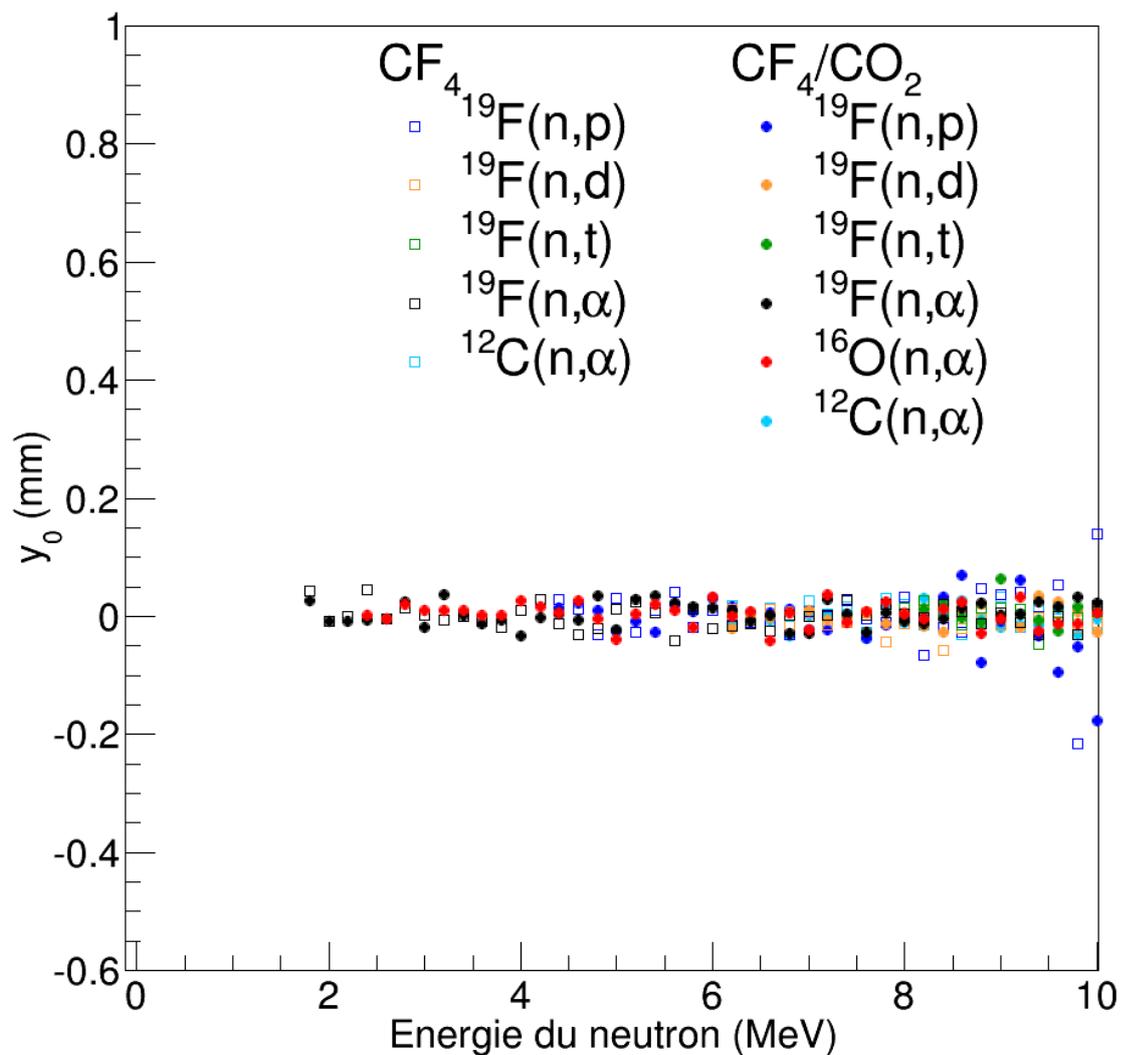


FIGURE 4.3 – Valeurs moyennes des coordonnées  $y_0$  en fonction de l'énergie du neutron incident.  $y_0$  est une des coordonnées du vertex du point d'interaction pour les diverses réactions. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulées dans le  $\text{CF}_4$ . Pour plus de clarté, les incertitudes ne sont pas représentées.

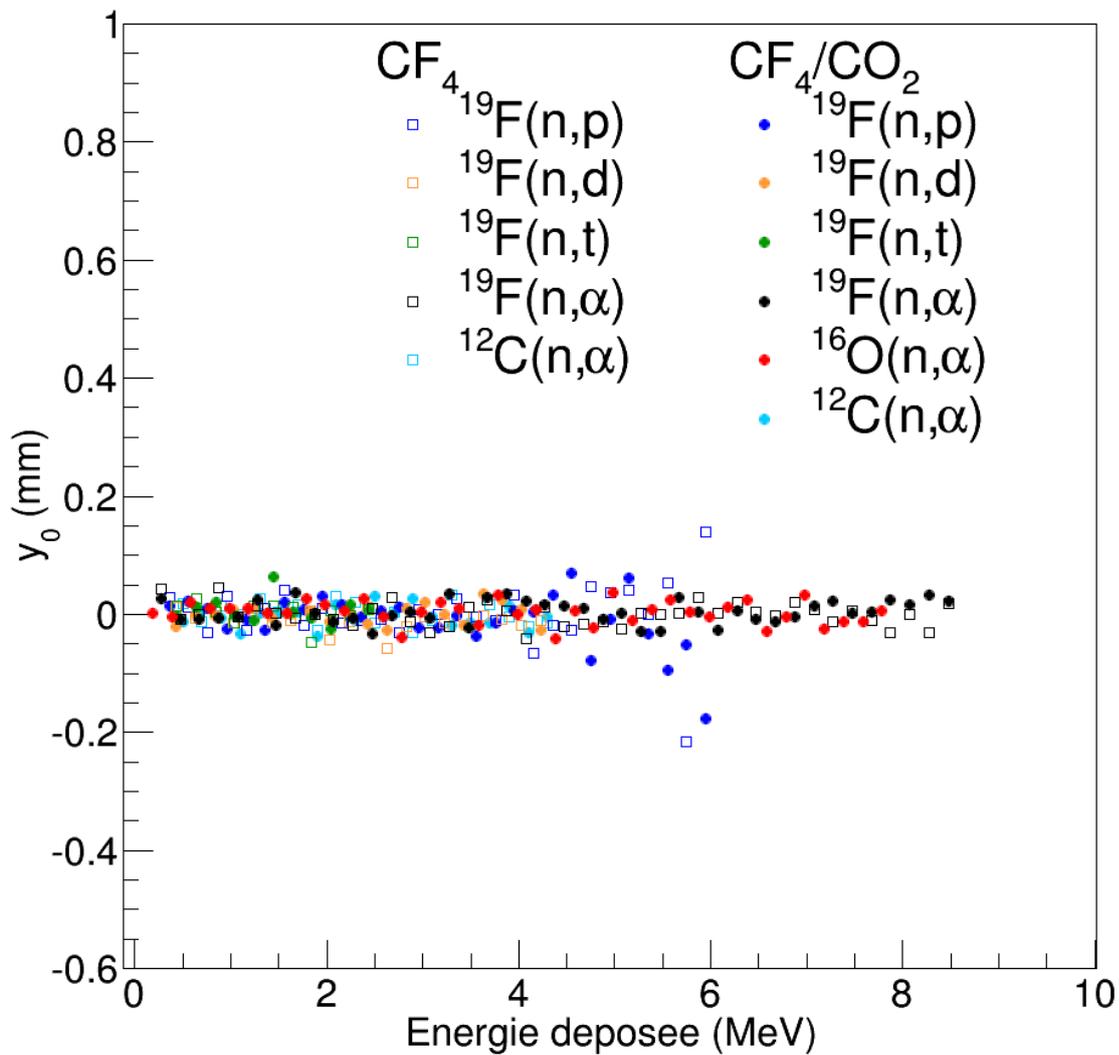


FIGURE 4.4 – Valeurs moyennes des coordonnées  $y_0$  en fonction de l'énergie déposée.  $y_0$  est une des coordonnées du vertex du point d'interaction pour les diverses réactions. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulées dans le  $\text{CF}_4$ . Pour plus de clarté, les incertitudes ne sont pas représentées.

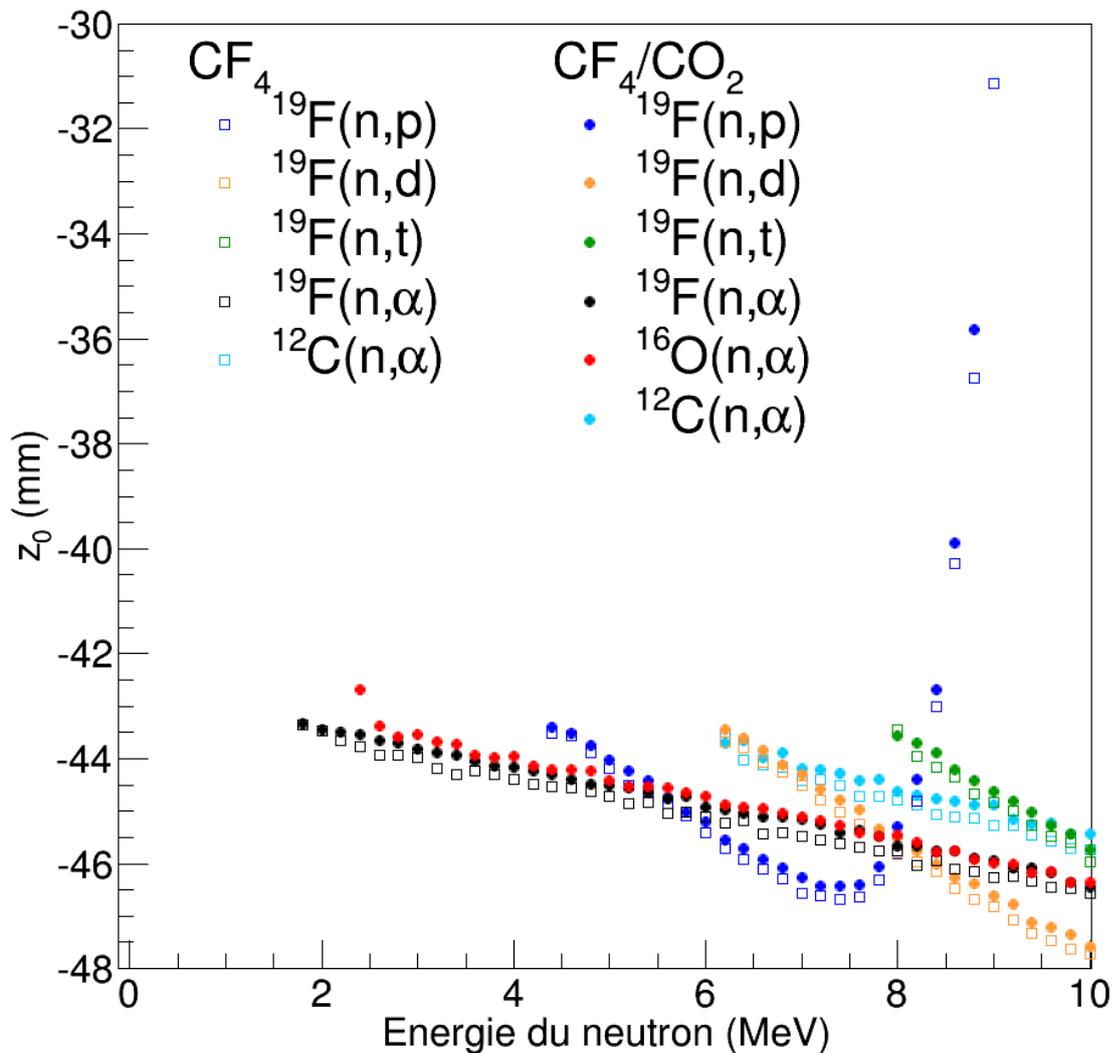


FIGURE 4.5 – Valeurs moyennes des coordonnées  $z_0$  en fonction de l'énergie du neutron incident.  $z_0$  est une des coordonnées du vertex du point d'interaction ( $\vec{z}$  est la direction du faisceau des neutrons incidents) pour les diverses réactions. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulées dans le  $\text{CF}_4$ . Pour plus de clarté, les incertitudes ne sont pas représentées.

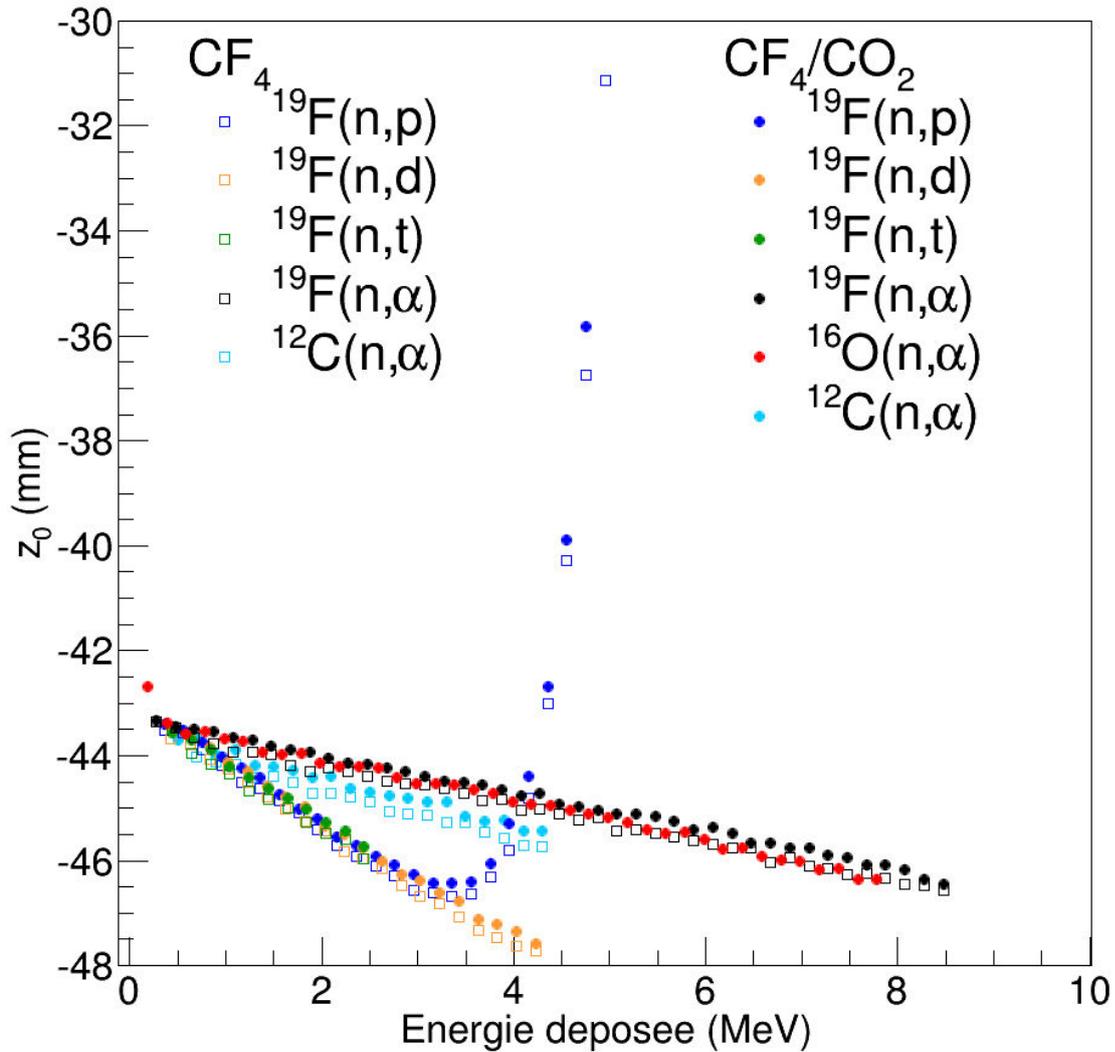


FIGURE 4.6 – Valeurs moyennes des coordonnées  $z_0$  en fonction de l'énergie déposée.  $z_0$  est une des coordonnées du vertex du point d'interaction ( $\vec{z}$  est la direction du faisceau des neutrons incidents) pour les diverses réactions. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulées dans le  $\text{CF}_4$ . Pour plus de clarté, les incertitudes ne sont pas représentées.

#### 4.1.1.1 Efficacité des réactions

Le pourcentage d'événements bien détectés permet de déterminer la gamme en énergie dans laquelle les réactions simulées sont considérées comme bien détectées, ainsi que l'efficacité de chaque réaction.

Les figures 4.7 (en page 96) et 4.8 (en page 97) représentent la fraction d'événements bien détectés des réactions pour des neutrons d'énergie inférieure à 10 MeV pour les réactions dans le  $\text{CF}_4$  et dans le mélange gazeux composé du  $\text{CF}_4$  et du  $\text{CO}_2$ , respectivement en fonction de l'énergie cinétique du neutron incident et en fonction de l'énergie déposée.

Cette fraction correspond donc aux nombres  $N_{+95\%}$  d'événements déposant plus de 95% de leur énergie dans la chambre d'ionisation sur le nombre total  $N_T$  d'événements simulés.

Ces deux nombres étant purement statistiques, l'incertitude sur cette fraction pour chaque énergie vaut :

$$\frac{N_{+95\%}}{N_{tot}} \cdot \sqrt{\frac{\sqrt{N_{+95\%}} \cdot \sqrt{N_{+95\%}}}{N_{+95\%}^2} + \frac{\sqrt{N_{tot}} \cdot \sqrt{N_{tot}}}{N_{tot}^2}} \quad (4.2)$$

où  $\sqrt{N_{tot}}$  et  $\sqrt{N_{+95\%}}$  sont les erreurs statistiques du nombre total d'événements et du nombre d'événements déposant plus de 95% de leur énergie.

Les réactions  $(n,\alpha)$  sur le  $^{19}\text{F}$ , le  $^{12}\text{C}$  et sur le  $^{16}\text{O}$ , sur des neutrons d'énergie inférieure à 10 MeV, déposent correctement leurs énergies : plus de 92,8% des événements sur la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)$ , plus de 91,5% sur la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)$  et plus de 96,7% sur la réaction  $^{12}\text{C}(n,\alpha)$ .

Pour les autres réactions, l'efficacité estimée décroît rapidement. Cet effet s'explique par le fait que les protons, les deutons et les tritons déposent moins d'énergie dans le volume utile (pour des neutrons de mêmes énergies cinétiques) que les particules  $\alpha$  (le parcours dans la matière des protons, des deutons et des tritons sont plus importants que les particules  $\alpha$ ).

En annexe C, les tableaux C.7 et C.8 se réfèrent aux figures 4.7 (en page 96) et 4.8 (en page 97).

#### 4.1.1.2 Estimation du volume utile

Le volume utile, correspondant à l'intersection du volume actif (apte à la détection) et le faisceau, est par définition le volume dans lequel les événements déposent toute (ou presque) leur énergie et donc ils sont bien détectés. Ces événements peuvent être ensuite analysés pour estimer la section efficace.

Pour l'estimer dans le projet SCALP, on suppose que le flux neutronique ait une forme cylindrique (alors qu'en réalité il a une forme conique).

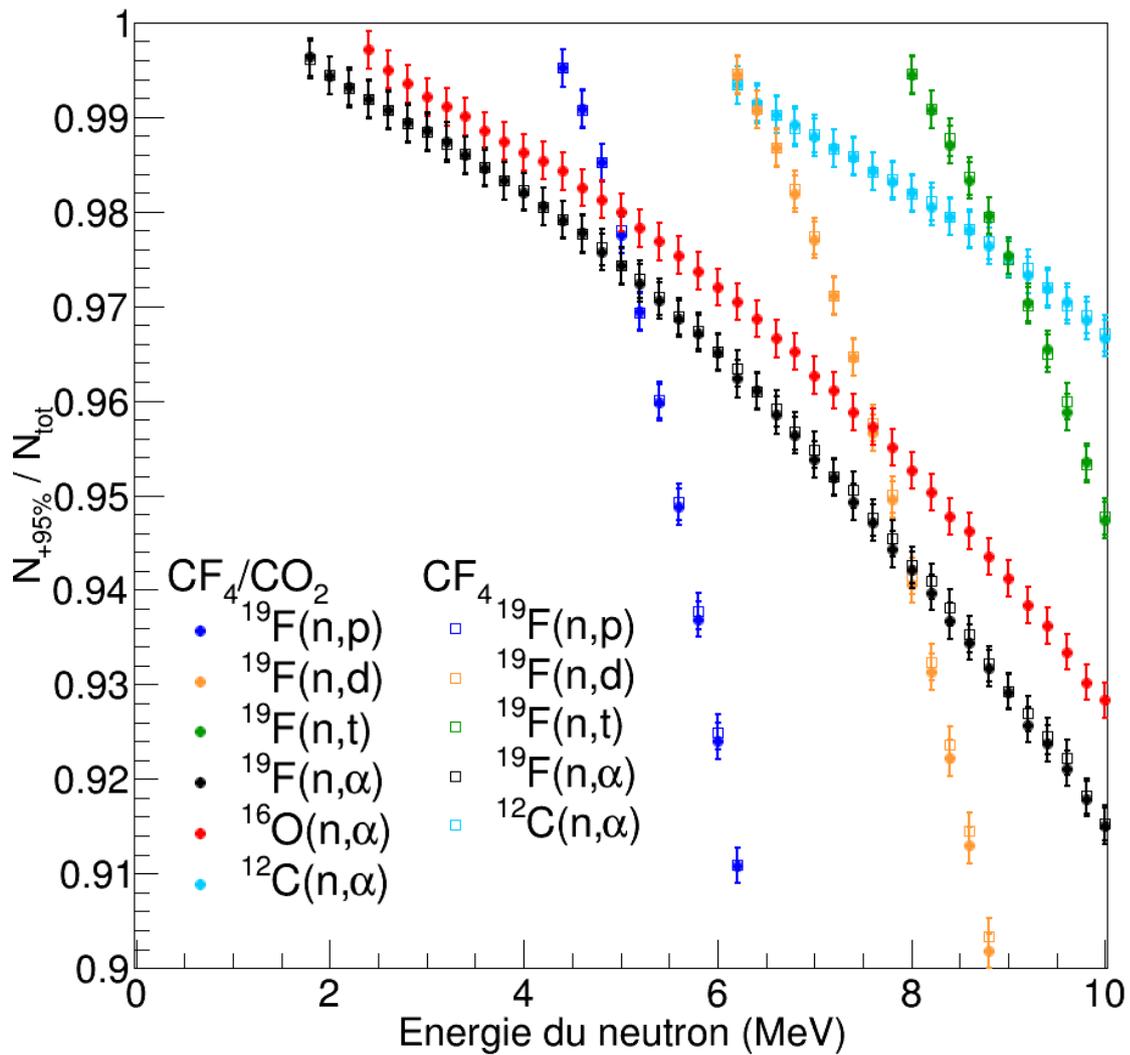


FIGURE 4.7 – Fraction d'événements bons (Nombre d'événements bons par rapport au nombre total d'événements simulés) en fonction de l'énergie cinétique des neutrons incidents pour les réactions simulées dans le  $CF_4$  pur et dans le mélange gazeux composé de 97% de  $CF_4$  et 3% de  $CO_2$ .

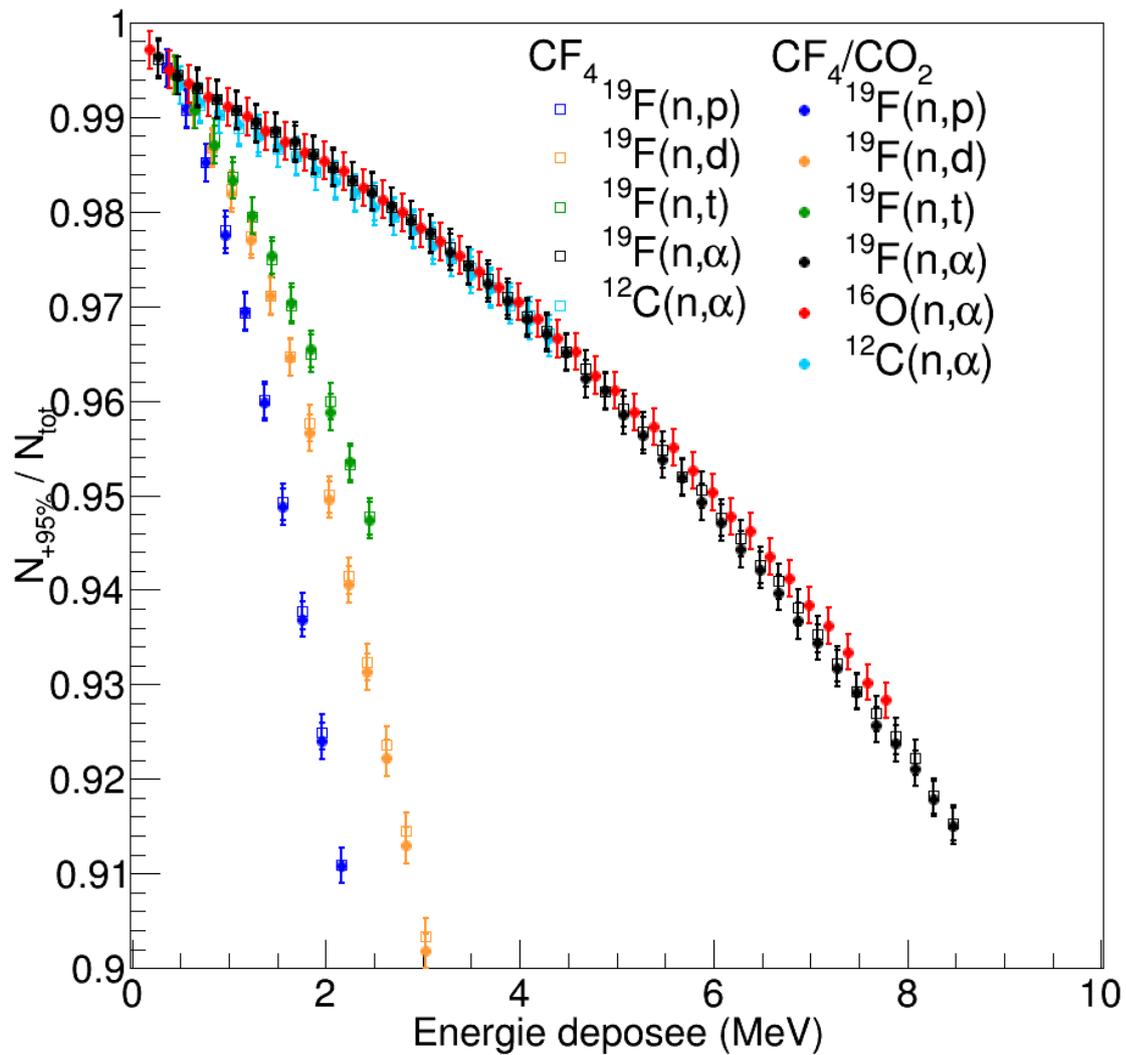


FIGURE 4.8 – Fraction d'événements bons (Nombre d'événements bons par rapport aux nombre total d'événements simulés) en fonction de l'énergie déposée dans la chambre d'ionisation pour les réactions simulées dans le  $CF_4$  pur et dans le mélange gazeux composé de 97% de  $CF_4$  et 3% de  $CO_2$ .

Le volume utile est alors défini comme :

$$V = \Pi \cdot r^2 \cdot z \quad (4.3)$$

où  $V$  est le volume utile (en  $\text{cm}^{-3}$ ),  $r$  le rayon du flux neutronique (suivant les axes  $\vec{x}$  et  $\vec{y}$  introduits dans la partie 3.3.2) et  $z$  la longueur utile (suivant l'axe  $\vec{z}$ ).

Le diamètre du flux neutronique est de 50 mm, le rayon  $r$  vaut donc  $25 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ . L'incertitude sur le volume utile est estimée de la façon suivante :

$$u_V = V \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot (u_r)^2}{r^2} + \frac{(u_z)^2}{z^2}} \quad (4.4)$$

La longueur utile diminue quand l'énergie du neutron incident augmente. Les tableaux C.9 et C.10, en annexe C, listent les longueurs utiles pour chaque réaction pour chaque énergie du neutron incident.

La figure 4.9 (en page 99) représente le volume utile estimé pour chaque réaction par énergie du neutron incident (en annexe C les tableaux C.11 et C.12 relatifs à ces deux figures). La figure 4.10 (en page 100) représente le volume utile estimé pour chaque réaction en fonction de l'énergie déposée. Le volume utile diminue quand l'énergie du neutron incident augmente.

De plus, de légères différences existent entre le volume utile, pour une énergie donnée et pour une réaction donnée, pour les événements simulés dans du  $\text{CF}_4$  et dans le mélange gazeux. Ces différences sont néanmoins inférieures aux erreurs estimés. Le volume utile estimé pour les réactions (n,p), (n,d) et (n,t) diminue plus rapidement que pour les réactions (n, $\alpha$ ), plus l'énergie du neutron incident augmente. L'incertitude relative sur le volume utile est estimée à 8% pour toutes les réactions.

## 4.1.2 Traitement de la détection de la lumière par les photo-multiplicateurs

### 4.1.2.1 Quantité de lumière détectée

Ce nombre est proportionnel aux nombres de photons émis par la désintégration des molécules  $\text{CF}_4$  et qui sont reçus par la photo-cathode associée.

La quantité de lumière est proportionnelle au nombre moyen des photo-électrons émis par la photo-cathode de chaque photo-multiplicateur et donc à chaque événement (soit chaque neutron interagissant dans le volume utile). Ce nombre dépend de l'efficacité quantique du photo-multiplicateur, de la transmission de lumière à travers la fenêtre d'entrée de quartz des photo-multiplicateurs, de l'énergie du neutron incident et du mélange gazeux.

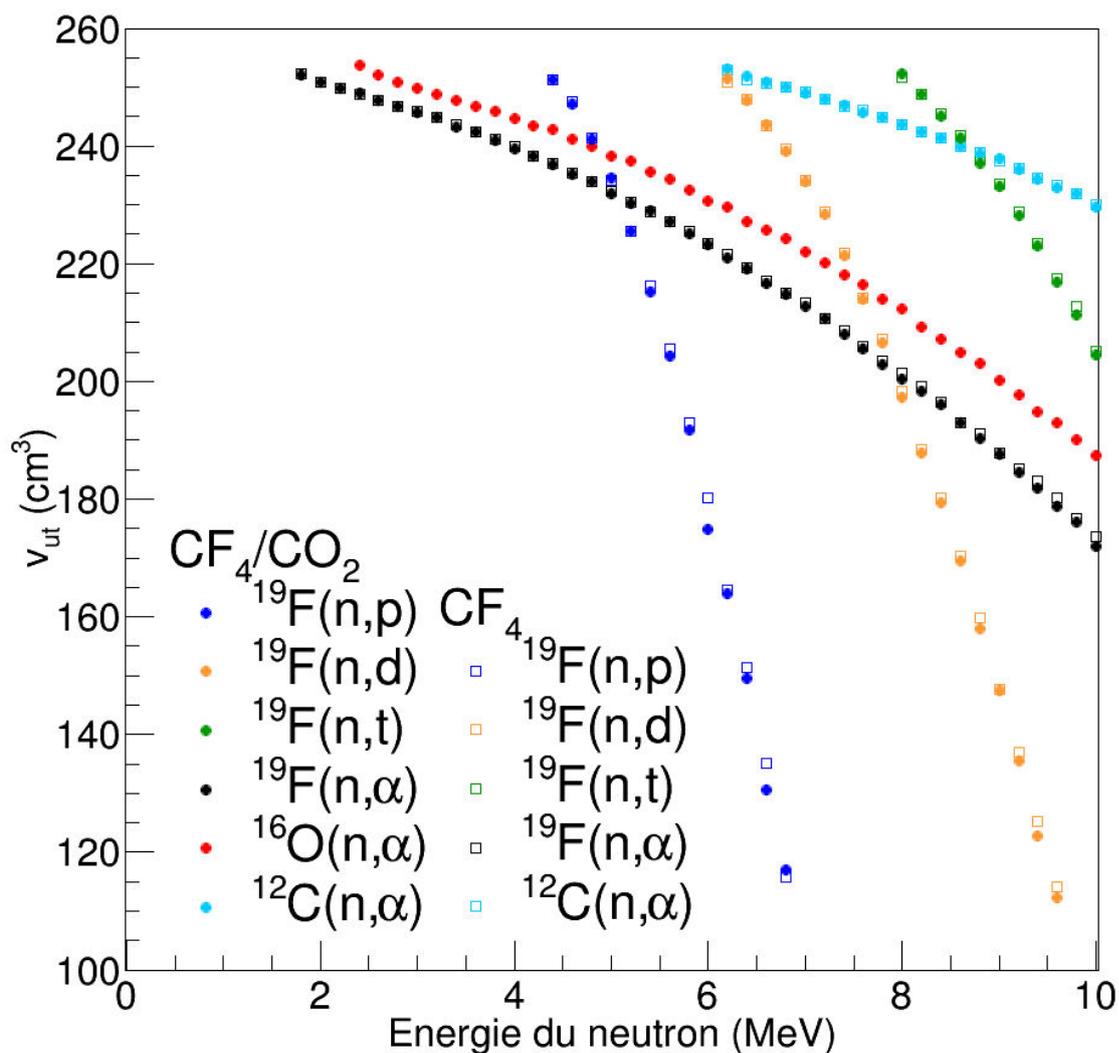


FIGURE 4.9 – Volume utile estimée en fonction de l'énergie du neutron incident. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulées dans le  $\text{CF}_4$ . Pour plus de clarté, les incertitudes ne sont pas représentées.

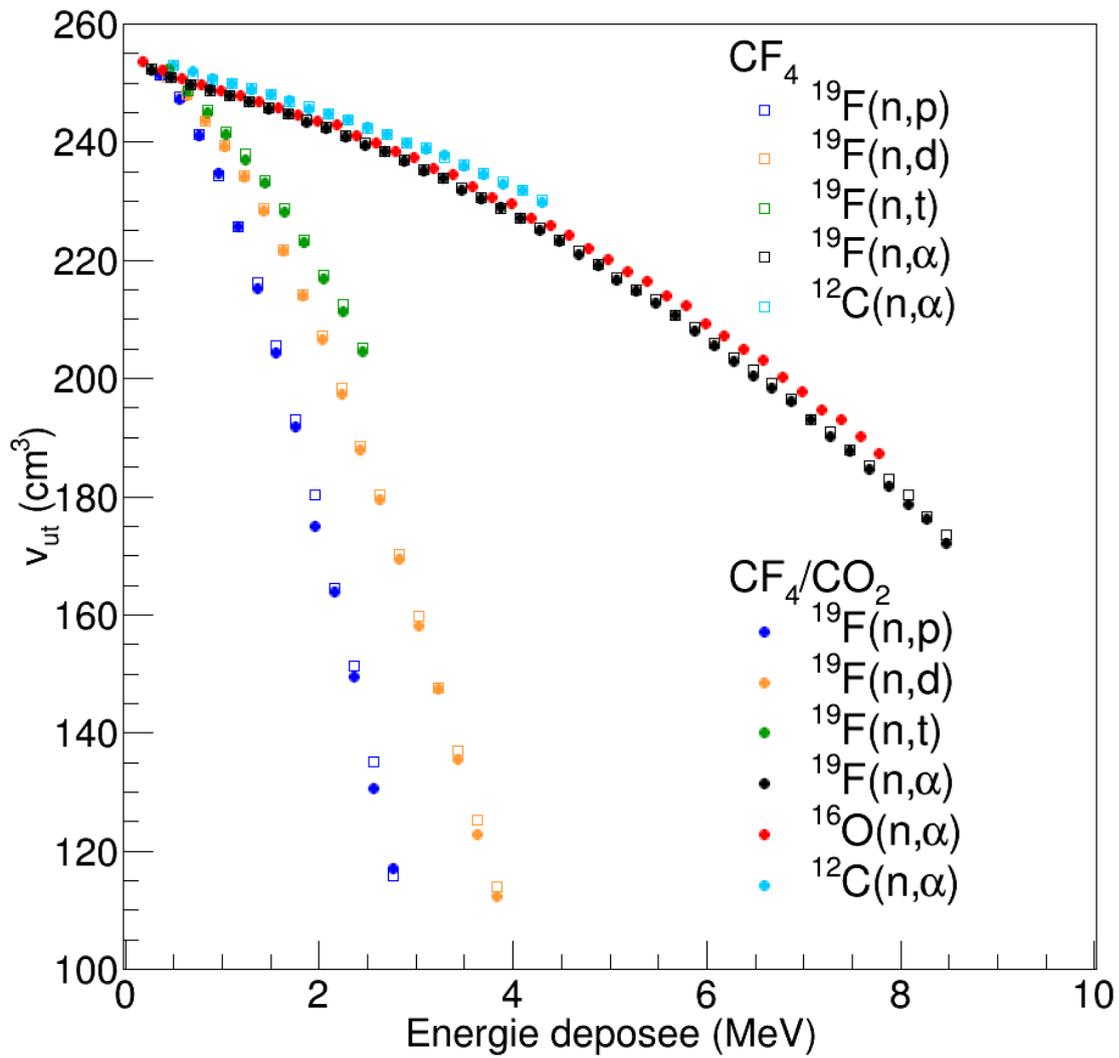


FIGURE 4.10 – Volume utile estimée en fonction de l'énergie déposée. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulées dans le  $\text{CF}_4$ . Pour plus de clarté, les incertitudes ne sont pas représentées.

Le nombre de photo-électrons détectés par les quatre photo-multiplicateurs est moyenné, pour chaque énergie neutronique. Cette moyenne est représentée sur la figure 4.11 (en page 102) en fonction de l'énergie du neutron incident et sur la figure 4.12 (en page 103) en fonction de l'énergie déposée.

Sur ces figures, la quantité de lumière émise pour les réactions  $^{19}\text{F}(n,\alpha)$  est représentée par des marqueurs noirs et pour les réactions  $^{16}\text{O}(n,\alpha)$  par des marqueurs rouges. La quantité de lumière augmente plus l'énergie du neutron incident augmente.

De plus, la quantité de lumière récupérée à partir des réactions simulées dans le mélange gazeux est inférieure d'environ un facteur 2 à celle issue des réactions dans le  $\text{CF}_4$  pur. Ce résultat est cohérent avec les résultats expérimentaux présentés dans la partie 2.2.1.3.

Les figures 4.13 et 4.14 (respectivement en page 104 et page 105) montrent le nombre de photo-électrons émis par le photo-multiplicateur qui reçoit le maximum de lumière dans chaque événement. Les résultats présentés sur cette figure sont cohérents avec ceux présentés sur les figures 4.11 et 4.12, à savoir que le nombre de photo-électrons émis pour les réactions  $(n,\alpha)$  augmente en fonction de l'énergie cinétique des neutrons incidents (et en fonction de l'énergie déposée).

Sur les figures 4.11, 4.12, 4.13 et 4.14, seules les valeurs moyennes sont représentées par soucis de clarté. Ces valeurs ont été déterminées à partir de la formule suivante :

$$\langle npe \rangle = \frac{1}{4} \cdot (npe(0) + npe(1) + npe(2) + npe(3)) \quad (4.5)$$

où  $npe(i)$  (avec  $i$  le numéro du photo-multiplicateur) est la valeur moyenne des histogrammes représentant la distribution des valeurs du nombre moyen de photo-électron émis par photo-cathode et par événement.  $\langle npe \rangle$  est la valeur moyenne des  $npe(i)$ .

L'incertitude sur la quantité de lumière émise par photo-cathode est l'écart-type du nombre moyen de photo-électron par énergie neutronique et par photo-cathode. En utilisant la méthode de la propagation des erreurs, en prenant  $\sigma_{npe(i)}$  l'écart-type de chaque distribution étudiée, l'incertitude de la valeur moyenne  $\langle npe \rangle$  est :

$$u_{\langle npe \rangle} = \frac{1}{4} \cdot \sqrt{(\sigma_{npe(0)})^2 + (\sigma_{npe(1)})^2 + (\sigma_{npe(2)})^2 + (\sigma_{npe(3)})^2} \quad (4.6)$$

En annexe C se trouvent les tableaux C.13, C.14, C.15 et C.16 qui se rapportent respectivement aux valeurs représentées dans les figures 4.11, 4.12, 4.13 et 4.14.

#### 4.1.2.2 Estimation du CRT

L'estimation des résolutions sur le temps de vol du futur dispositif expérimental est fondamentale dans ce projet.

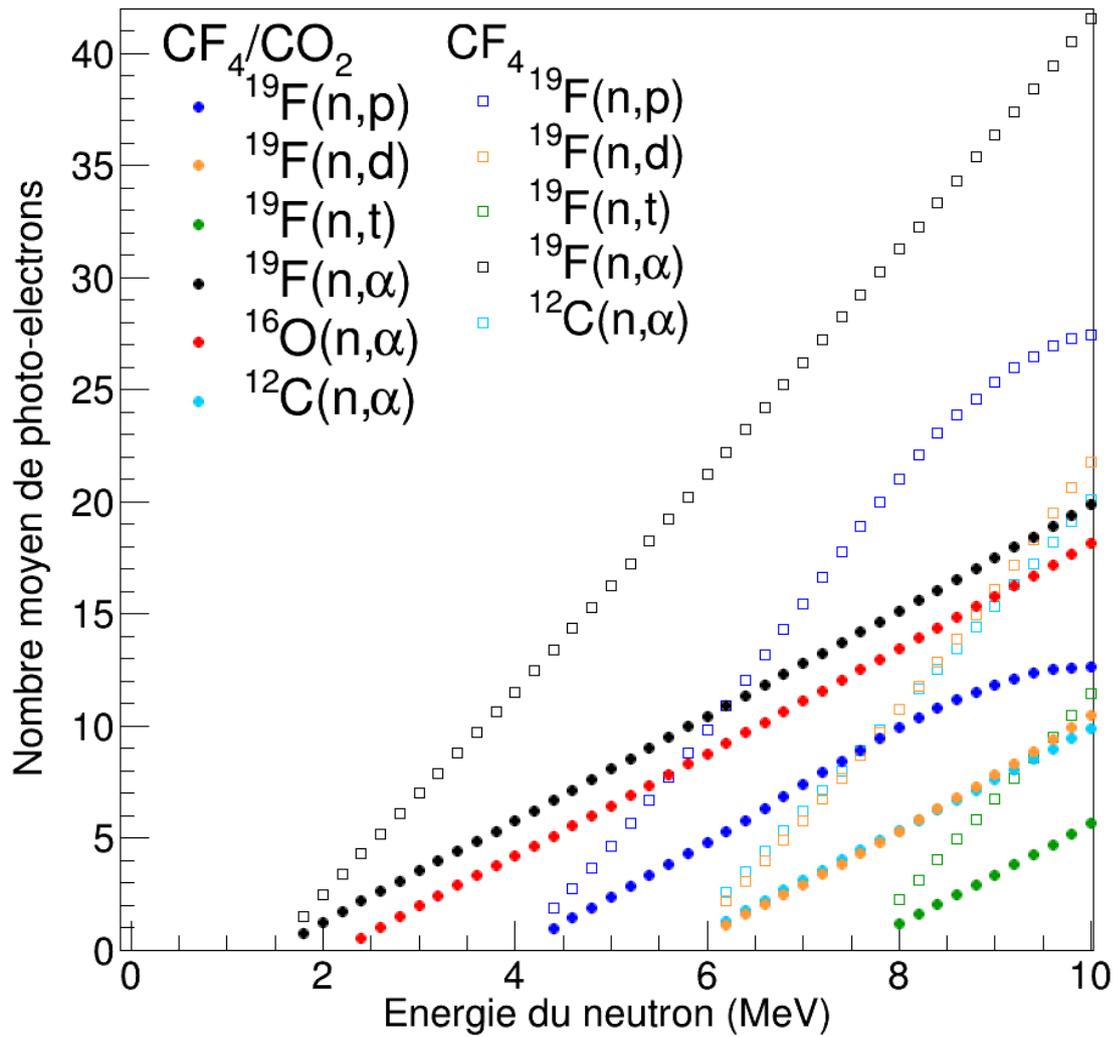


FIGURE 4.11 – Nombre moyen de photo-électrons émis par photo-cathode par énergie du neutron incident. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulés dans le mélange gazeux (97% de  $CF_4$  et 3% de  $CO_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulés dans le  $CF_4$ . Pour plus de clarté, les incertitudes ne sont pas représentées.

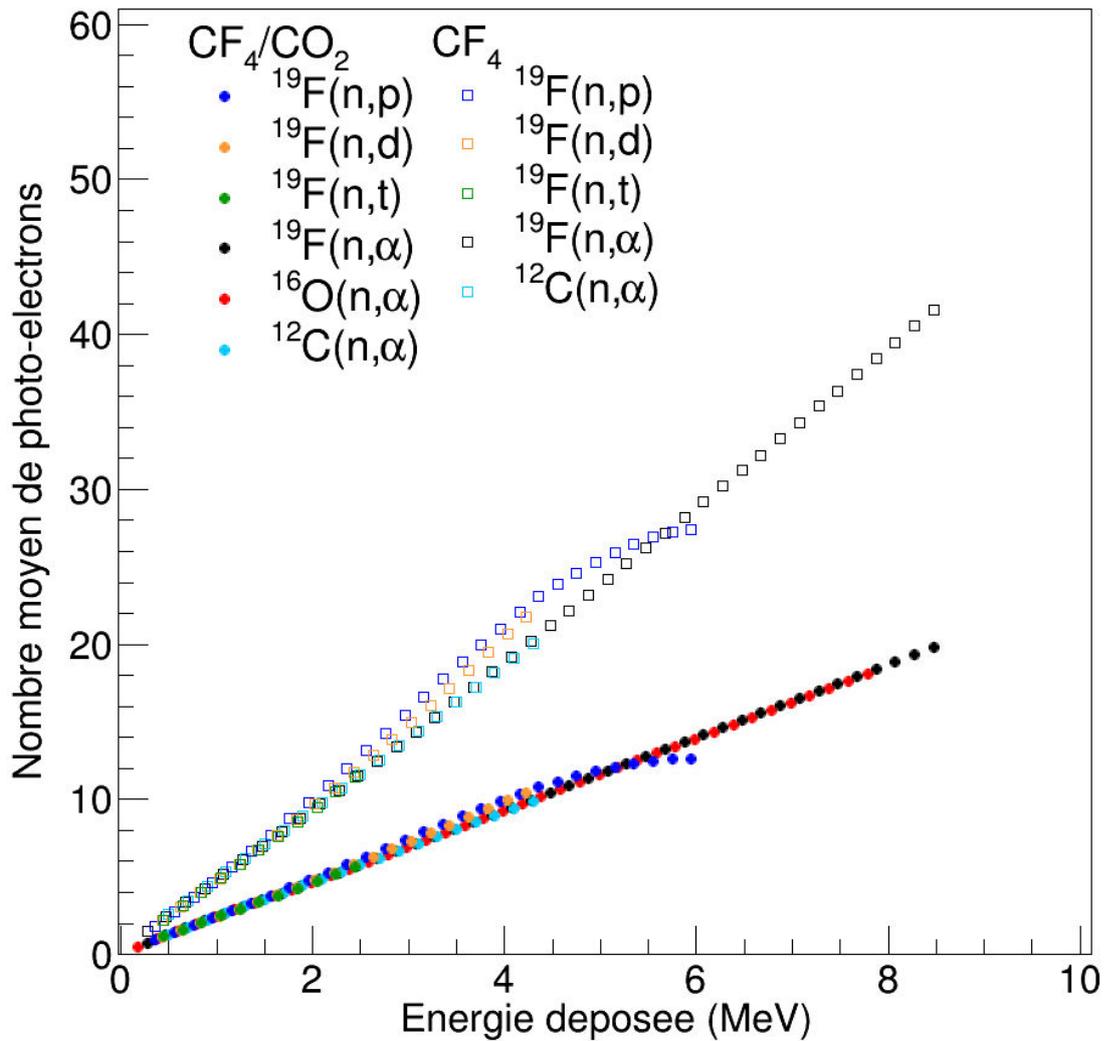


FIGURE 4.12 – Nombre moyen de photo-électrons émis par photo-cathode en fonction de l'énergie déposée. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulés dans le  $\text{CF}_4$ . Pour plus de clarté, les incertitudes ne sont pas représentées.

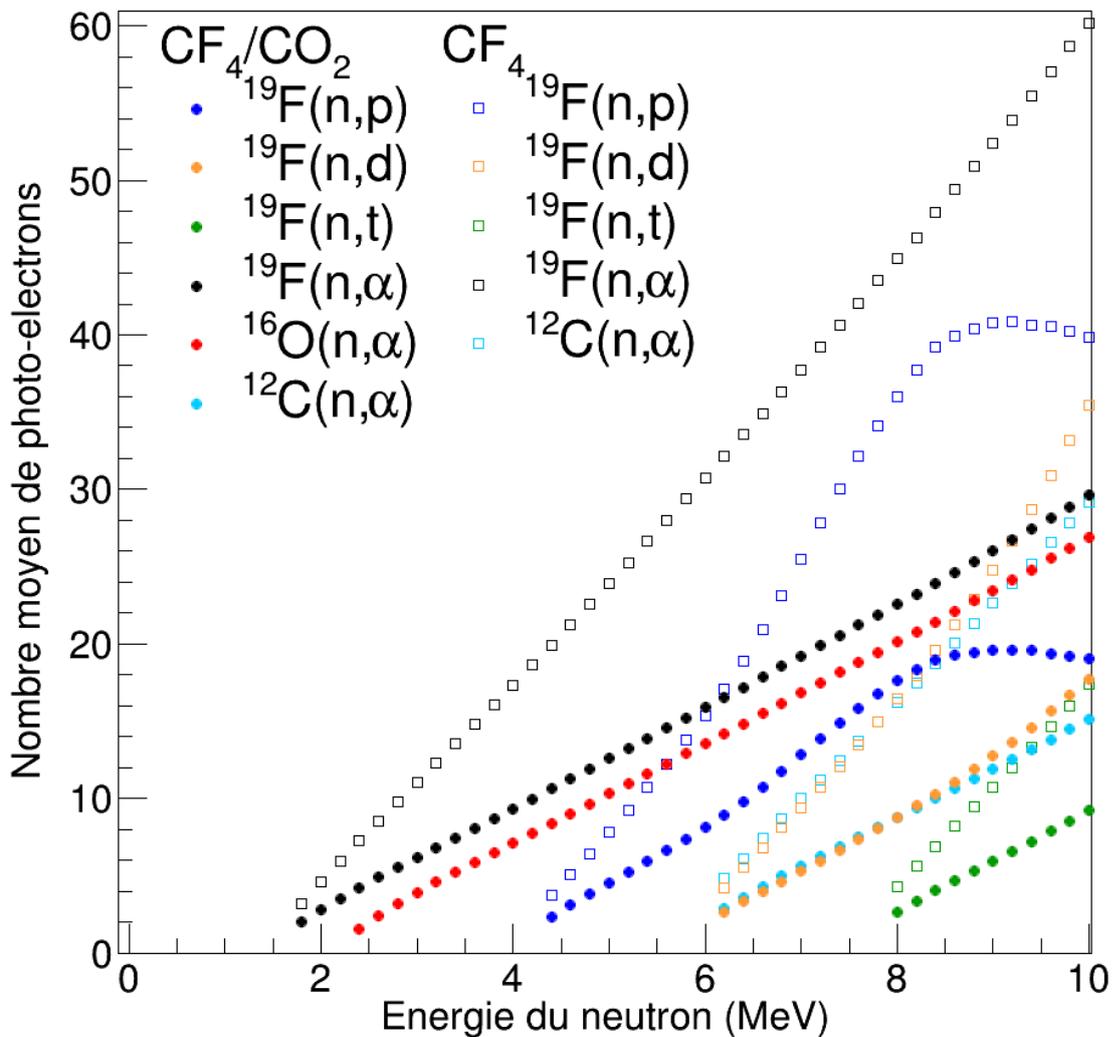


FIGURE 4.13 – Nombre moyen de photo-électrons émis par photo-cathode par énergie du neutron incident, pour le photo-multiplicateur recevant le maximum de lumière. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de  $CF_4$  et 3% de  $CO_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulées dans le  $CF_4$ . Pour plus de clarté, les incertitudes ne sont pas représentées.

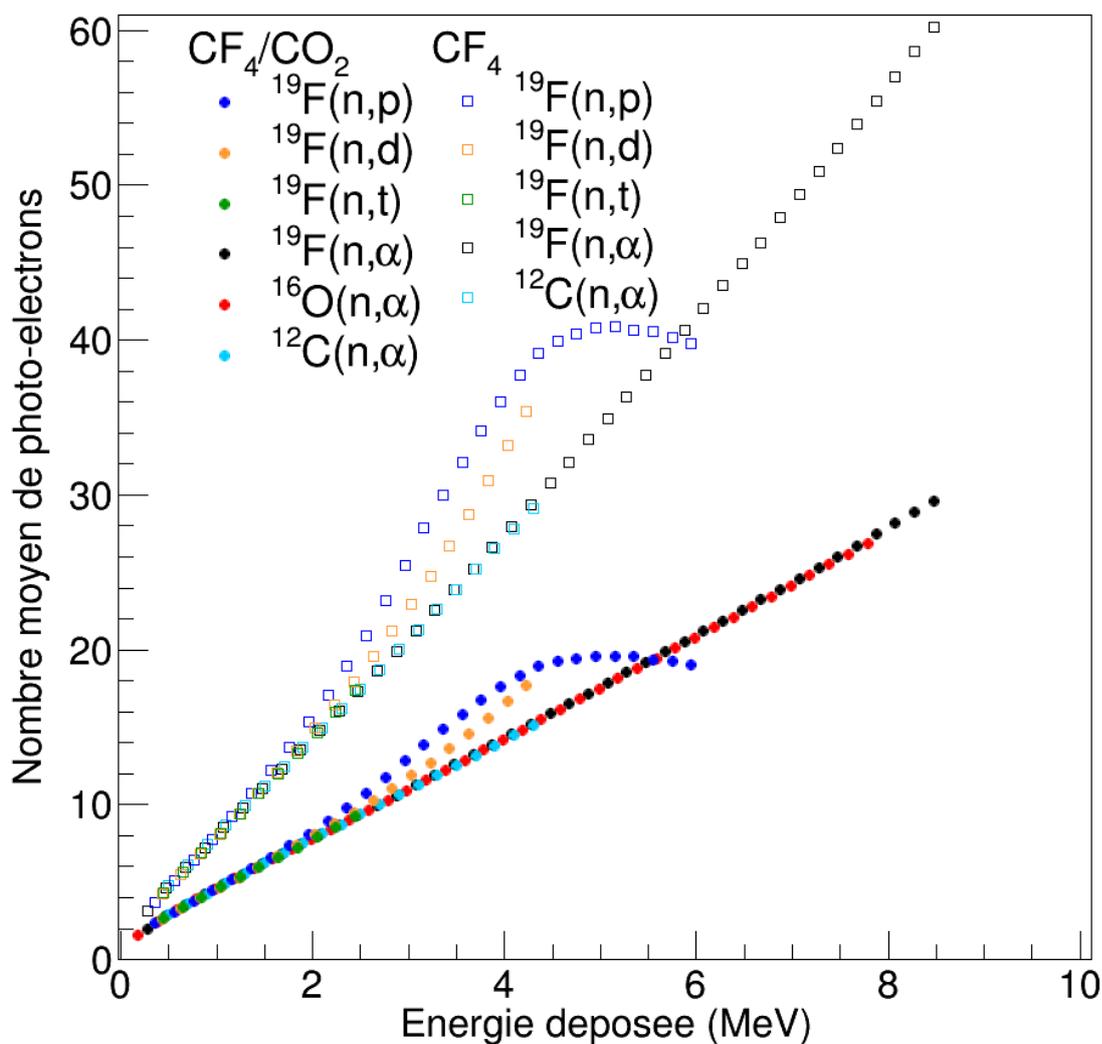


FIGURE 4.14 – Nombre moyen de photo-électrons émis par photo-cathode en fonction de l'énergie déposée, pour le photo-multiplicateur recevant le maximum de lumière. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de  $CF_4$  et 3% de  $CO_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulées dans le  $CF_4$ . Pour plus de clarté, les incertitudes ne sont pas représentées.

Ces résolutions sont définies par le "Coïncidence Resolving Time" (ou CRT) [120]. Le CRT est l'écart-type de la distribution de la différence de temps en coïncidence (sur une fenêtre de temps défini) d'un même événement détecté par deux photo-multiplicateurs.

Quatre photo-multiplicateurs composent le futur détecteur. Par conséquent six distributions peuvent être analysées. L'écart-type de chaque distribution est déterminé. Le CRT est la moyenne des six écart-type.

Les figures 4.15 (en page 107) et 4.16 (en page 108) représentent les valeurs moyennes des CRT respectivement en fonction de l'énergie cinétique du neutron incident et en fonction de l'énergie déposée.

Les tableaux C.17 et C.18 en annexe C se réfèrent aux valeurs présentées sur la figure 4.15. Les erreurs représentées sont les écart-types des ces valeurs.

Pour les réactions  $(n,\alpha)$ , les valeurs du CRT estimé augmentent puis diminuent plus l'énergie du neutron incident augmente. Cet effet peut s'expliquer par le fait qu'au bord du seuil en énergie les réactions déposent entièrement leur énergie dans le volume utile. La résolution sur le temps de vol est par conséquent plus faible.

Pour les réactions  $(n,p)$ ,  $(n,d)$  et  $(n,t)$  les résolutions sur le temps de vol augmentent. A haute énergie, ces réactions ne déposent pas (ou peu) entièrement leur énergie. Les écarts entre les résolutions estimées sont donc plus importants. Les résolutions sur le temps de vol sont plus élevées (donc moins meilleures) pour les événements simulés dans le mélange gazeux que dans du  $CF_4$  pur.

L'ajout de 3% de  $CO_2$  dans du  $CF_4$  dégrade donc bien les résultats. Les résolutions sur le temps de vol pour les événements simulés dans le mélange composé de  $CF_4$  et  $CO_2$  sont plus élevées d'environ 70% que pour les événements simulés dans du  $CF_4$ .

### 4.1.3 Énergie des particules émises et énergie déposée dans le volume utile

L'énergie déposée dans le volume utile est une donnée importante du projet SCALP. En effet, la discrimination des réactions lors des futures expériences se fera en déterminant l'énergie déposée de chaque événement et le temps de vol du neutron incident associé. La détermination avec précision de l'énergie déposée est donc primordiale.

La figure 4.17 (en page 109) représente les valeurs moyennes de l'énergie déposée pour chaque énergie du neutron incident (en annexe C les tableaux C.19 et C.20 sont relatifs aux données représentées sur cette figure). Les valeurs moyennes de l'énergie déposée par énergie du neutron incident par réaction sont équivalentes pour différents gaz simulés (les marqueurs sont superposés sur la figure 4.17).

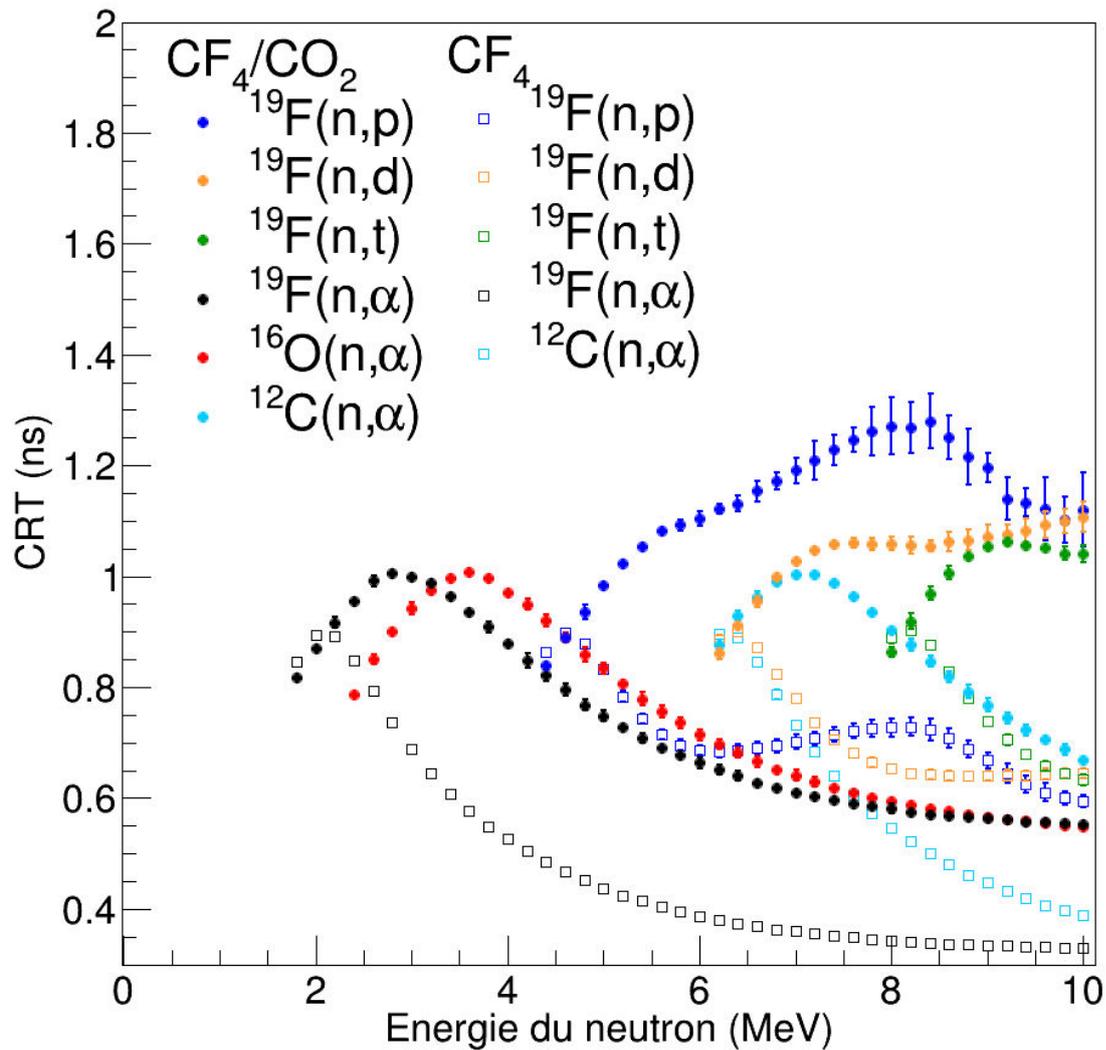


FIGURE 4.15 – Valeur moyenne des CRT (Coïncidence Resolving Time) estimée. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions dans le mélange gazeux (97% de CF<sub>4</sub> et 3% de CO<sub>2</sub>) et les marqueurs carrés aux réactions dans le CF<sub>4</sub>.

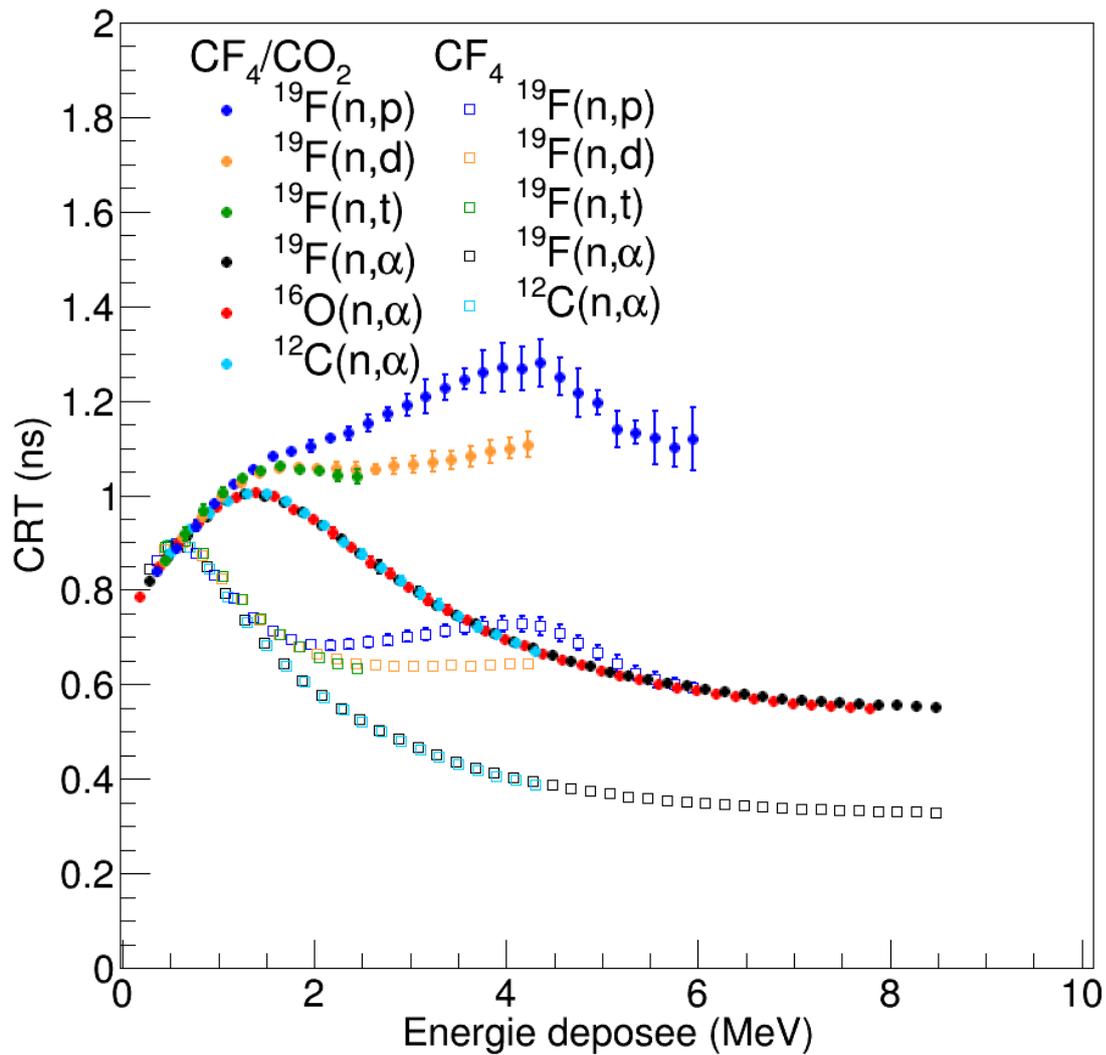


FIGURE 4.16 – Valeur moyenne des CRT (Coïncidence Resolving Time) estimée en fonction de l'énergie déposée. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulées dans le  $\text{CF}_4$ .

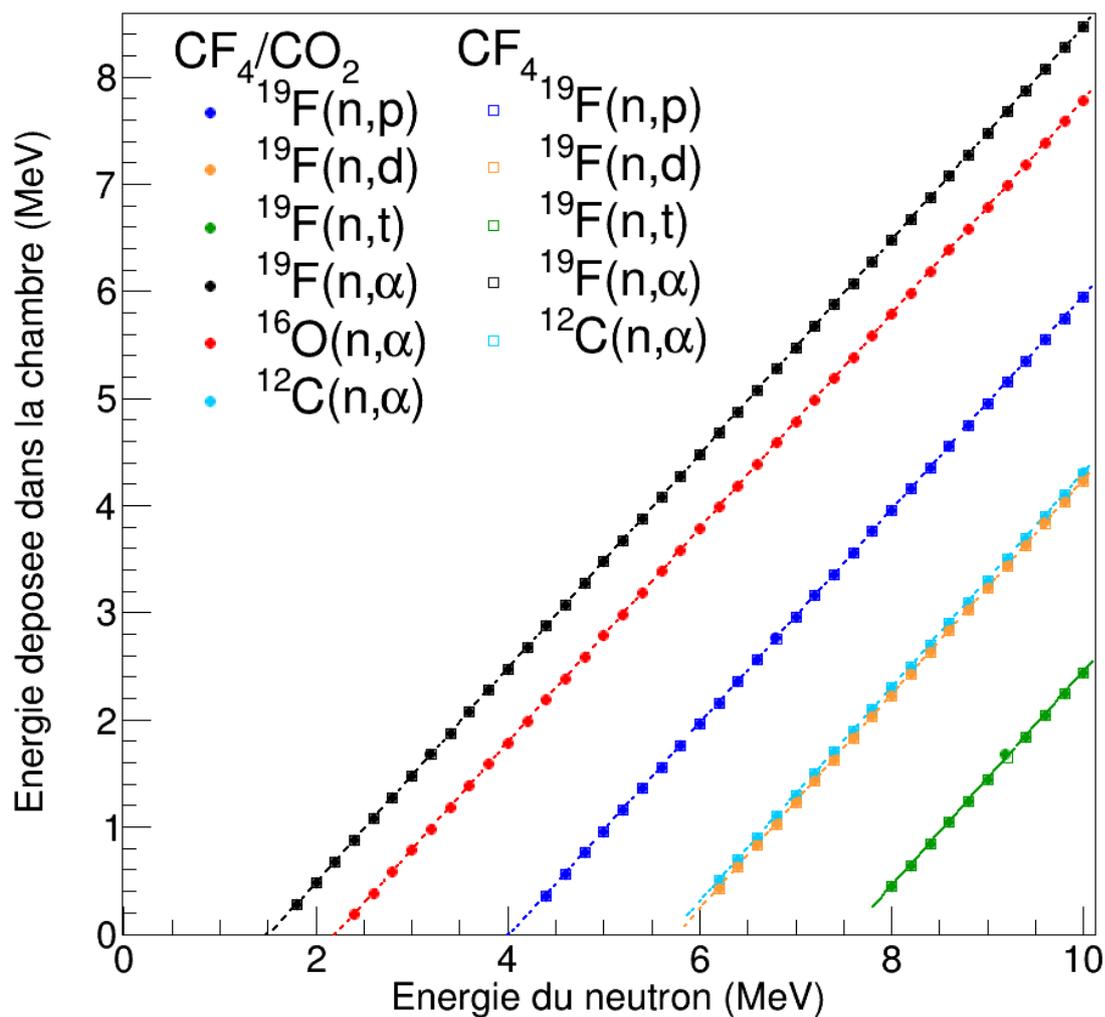


FIGURE 4.17 – Valeurs moyennes de l'énergie déposée pour chaque énergie du neutron incident. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de  $CF_4$  et 3% de  $CO_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulées dans le  $CF_4$ . Les courbes en pointillées représentent les ajustements à partir d'une fonction polynomiale d'ordre 1 sur les valeurs expérimentales.

Les valeurs simulées de l'énergie déposée sont proportionnelles aux valeurs de l'énergie cinétique du neutron incident. Un ajustement polynomial d'ordre 1 est réalisé.

Avec  $E_{dep}$  et  $E_n$  respectivement l'énergie déposée et l'énergie du neutron incident, cette fonction linéaire est de la forme :

$$E_{dep} = a + b \cdot E_n \quad (4.7)$$

Le tableau 4.1 représente les constantes  $a$  et  $b$  déterminées pour chaque ajustement. La proportionnalité de la relation entre  $E_{dep}$  et  $E_n$  est démontré par le fait que la constante  $b$  soit centrée sur 1.

	$^{19}\text{F}(n,p)$	$^{19}\text{F}(n,d)$	$^{19}\text{F}(n,t)$
$a$	$-4,024 \pm 0,004$	$-5,776 \pm 0,006$	$-7,57 \pm 0,08$
$b$	$0,9974 \pm 0,0005$	$1,0007 \pm 0,0007$	$1,002 \pm 0,008$
$\chi^2/\text{ndf}$	$5,87 \times 10^{-4}/27$	$2,37 \times 10^{-4}/18$	$2,58 \times 10^{-3}/9$
	$^{19}\text{F}(n,\alpha)$	$^{12}\text{C}(n,\alpha)$	$^{16}\text{O}(n,\alpha)$
$a$	$-1,5230 \pm 0,0008$	$-5,706 \pm 0,004$	$-2,21504 \pm 0,00008$
$b$	$1,0000 \pm 0,0001$	$1,0008 \pm 0,0005$	$0,99983 \pm 0,00001$
$\chi^2/\text{ndf}$	$1,70 \times 10^{-4}/40$	$1,21 \times 10^{-4}/18$	$1,03 \times 10^{-6}/37$

TABLEAU 4.1 – Constantes déterminées à partir de l'ajustement polynomial d'ordre 1 pour les réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ ).

Les valeurs de la constante  $a$  correspondent aux valeurs des bilans en énergie de chaque réaction associée. Ces valeurs sont listées dans le tableau 3.5 dans le chapitre 3, et sont bien cohérentes avec les valeurs de la constante  $a$ .

Les figures 4.18 (en page 111) et 4.19 (en page 112) représentent les valeurs moyennes du temps de vol estimé pour chaque réaction simulée et pour chaque énergie du neutron incident.

Sur ces deux figures des paraboles sont visibles. Elles sont toutes confondues sur la figure 4.18, ce qui démontre que la détermination du temps de vol des neutrons à partir de leur énergie cinétique incidente est correcte, et ne dépend ni des types de réactions ni du mélange gazeux utilisé.

Par contre sur la figure 4.19 ces paraboles sont séparées. Seul le mélange gazeux utilisé n'influe pas dans la détermination du temps de vol (les réactions sur le  $\text{CF}_4$  et sur le mélange gazeux sont confondues, pour une même réaction). La bonne détermination du temps de vol du neutron incident est primordial pour discriminer les signaux des différentes réactions nucléaires prenant place dans le volume utile.

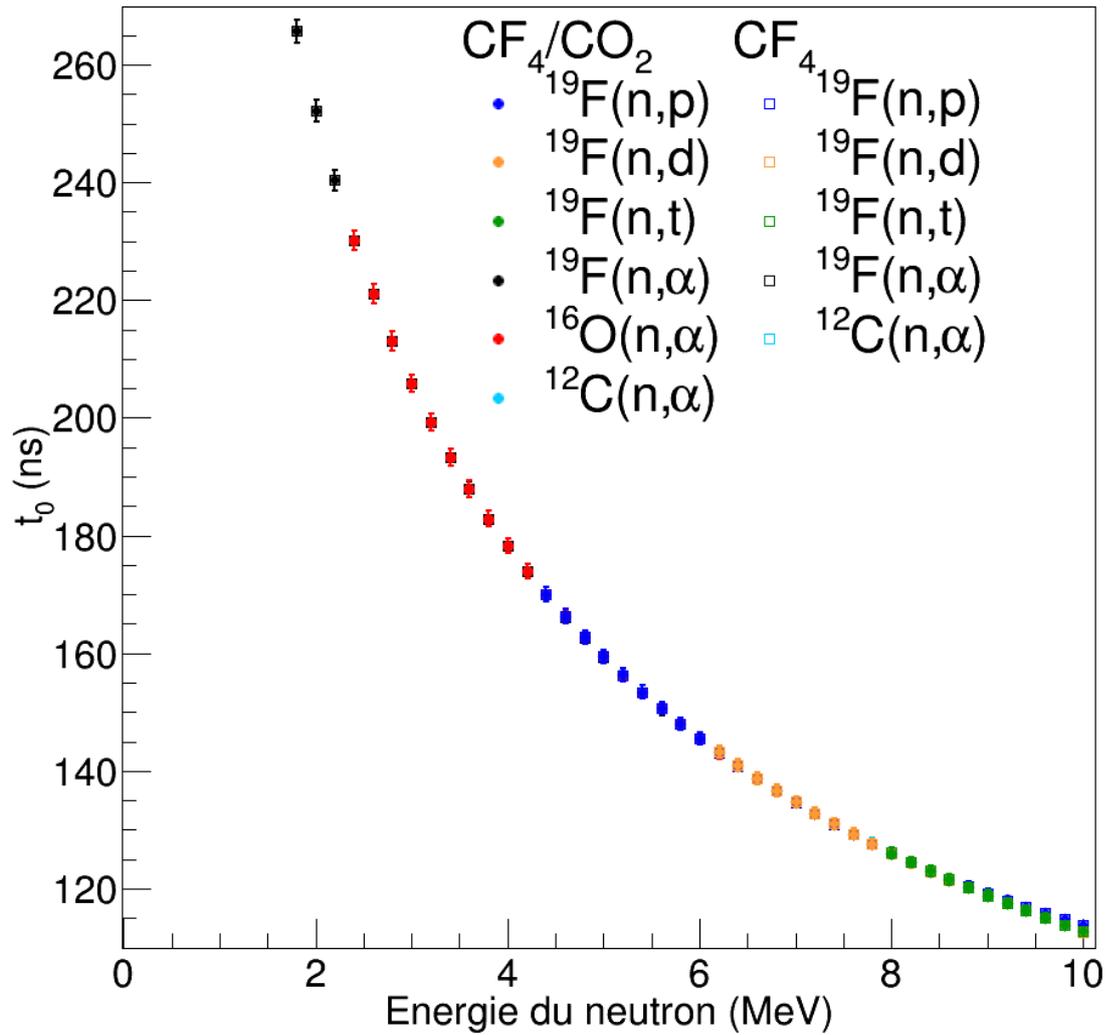


FIGURE 4.18 – Valeurs moyennes du temps de vol estimé à partir des énergies des neutrons incidents. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de CF<sub>4</sub> et 3% de CO<sub>2</sub>) et les marqueurs carrés aux réactions simulées dans le CF<sub>4</sub>.

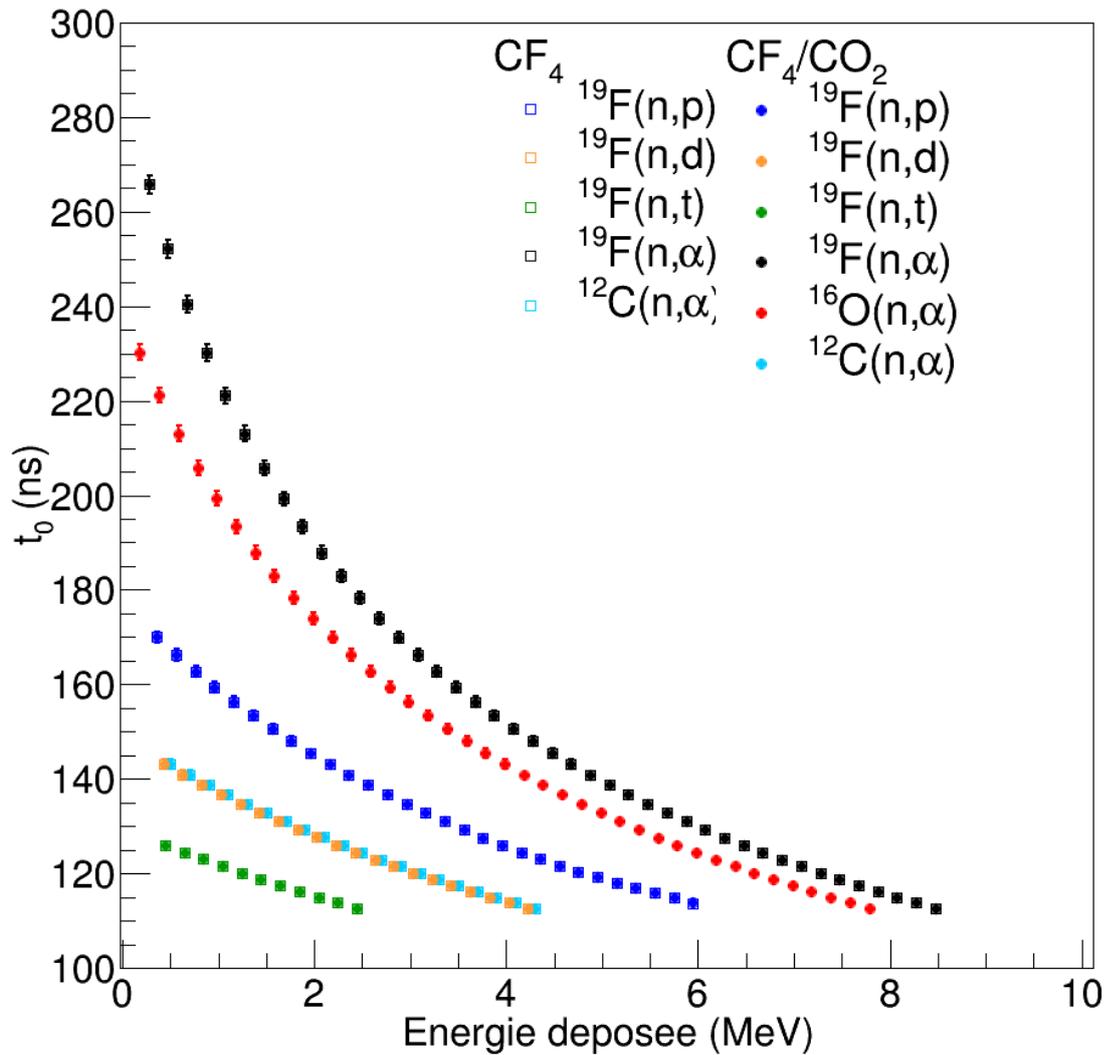


FIGURE 4.19 – Valeurs moyennes du temps de vol estimé à partir des énergies des neutrons incidents en fonction de l'énergie déposée. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de  $CF_4$  et 3% de  $CO_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulées dans le  $CF_4$ .

Les résultats présentés dans ces deux figures sont listés dans les tableaux C.21 et C.22 en annexe C.

Les figures 4.20 (en page 114), 4.21 (en page 115), et les figures 4.22 (en page 116) et 4.23 (en page 117) , et les tableaux C.23, C.24, C.25 et C.26 associés en annexe C, représentent l'énergie moyenne des particules émises et des noyaux résiduels après réaction, en fonction de l'énergie cinétique du neutron incident (pour les figures 4.20 et 4.22) et fonction de l'énergie déposée (pour les figures 4.21 et 4.23).

Sur ces figures, plus l'énergie cinétique du neutron incident augmente, plus les énergies de la particule émise (proton, deuton, triton, alpha) et du noyau résidu augmentent. Quelque soit le gaz utilisé, pour une même énergie neutronique cinétique, les énergies des particules émises et des noyaux résidus sont les mêmes.

La différence d'allure des courbes des réactions (n,p) par rapport aux autres courbes s'explique par le fait que le parcours des protons est plus important que le parcours des autres particules étudiées et qu'en l'occurrence elles ne déposent pas entièrement leur énergie dans le volume utile.

Pour les réactions  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  et pour des neutrons incidents d'énergie inférieure à 10 MeV, les énergies des particules alpha émises sont au maximum de 6,5 MeV et les noyaux  $^{16}\text{N}$  résiduels de 2 MeV. Pour les réactions  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  ces énergies sont respectivement de 5,6 MeV et de 2,2 MeV.

## 4.2 Analyse des données simulées

La mesure de la section efficace est le but même du projet SCALP. La possibilité d'estimer les sections efficaces des réactions d'intérêt et leur précision attendue est l'objectif des simulations GEANT4 avec le programme SICSIMULATION.

Les sections efficaces sont déterminées expérimentalement à partir des histogrammes représentant le nombre d'événements par énergie cinétique du neutron incident, et à partir du volume utile et du flux de neutron incident par énergie.

### 4.2.1 Estimation de l'énergie du neutron incident et étude de sa dégradation

L'énergie de la particule incidente est un paramètre primordial pour l'estimation de la section efficace, qui est la fonction d'excitation d'une réaction nucléaire en fonction de l'énergie de la particule incidente. Or, l'énergie du neutron incident ne peut être déterminée expérimentalement que par la méthode du temps de vol.

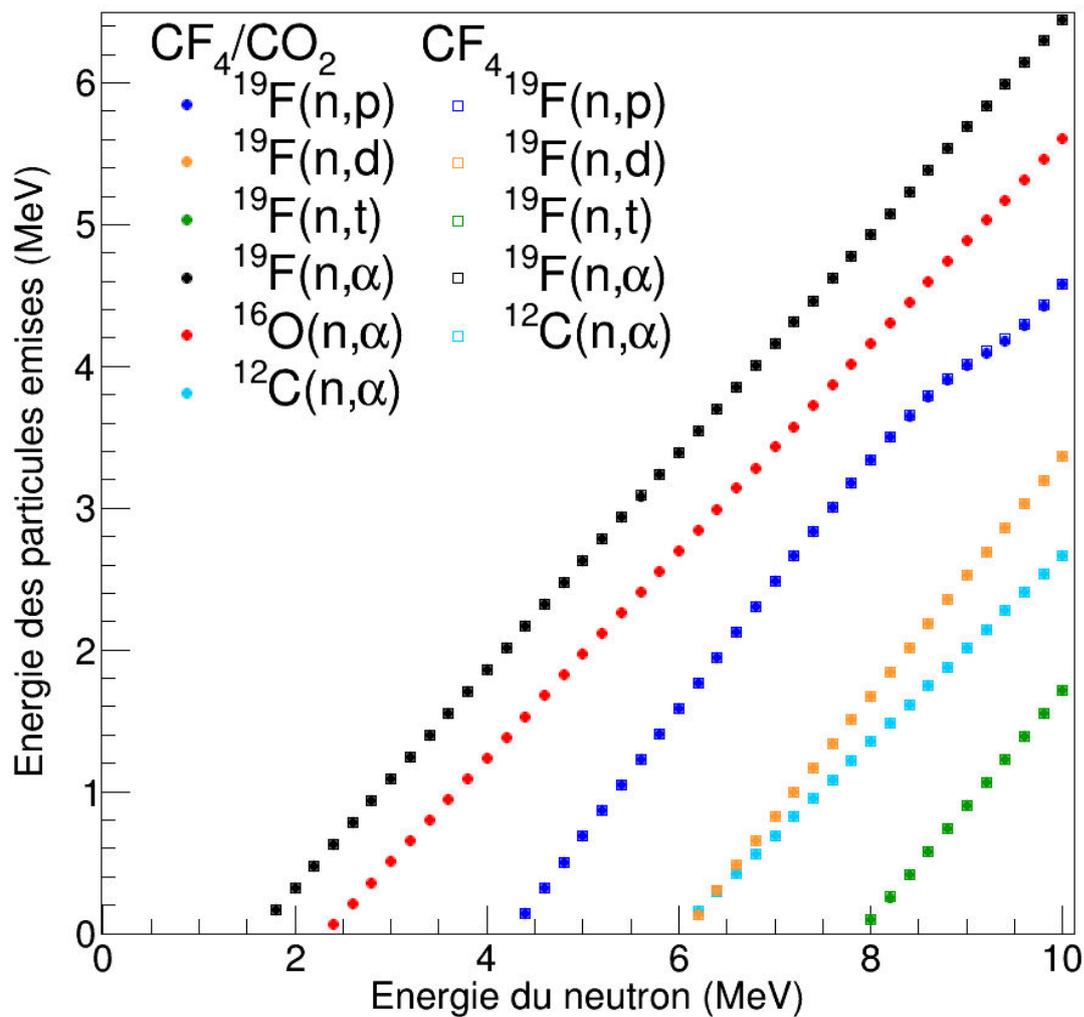


FIGURE 4.20 – Valeurs moyennes de l'énergie des particules émises (proton, deuteron, triton, alpha) pour chaque énergie du neutron incident. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de  $CF_4$  et 3% de  $CO_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulées dans le  $CF_4$ .

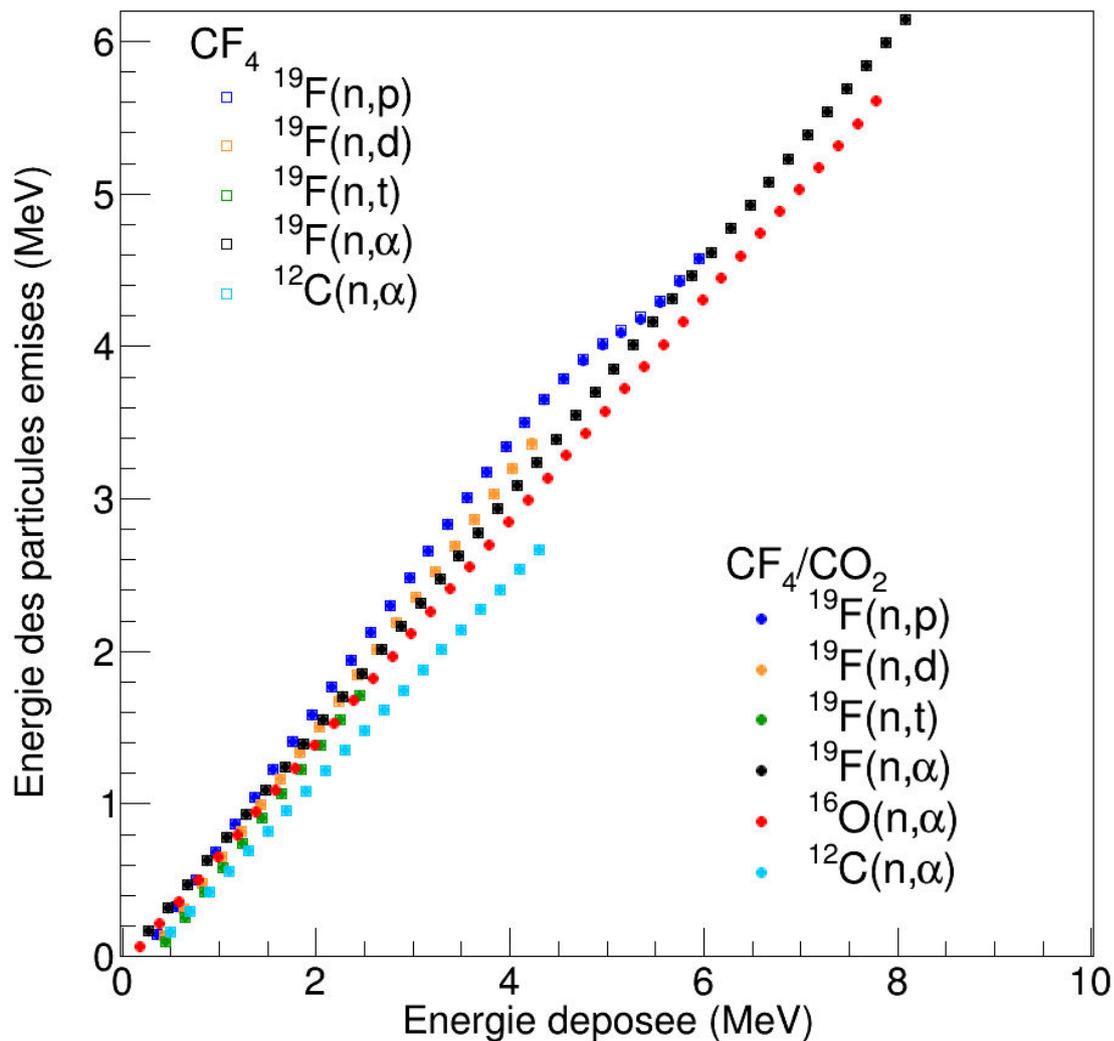


FIGURE 4.21 – Valeurs moyennes de l'énergie des particules émises (proton, deuton, triton, alpha) en fonction de l'énergie déposée. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulées dans le  $\text{CF}_4$ .

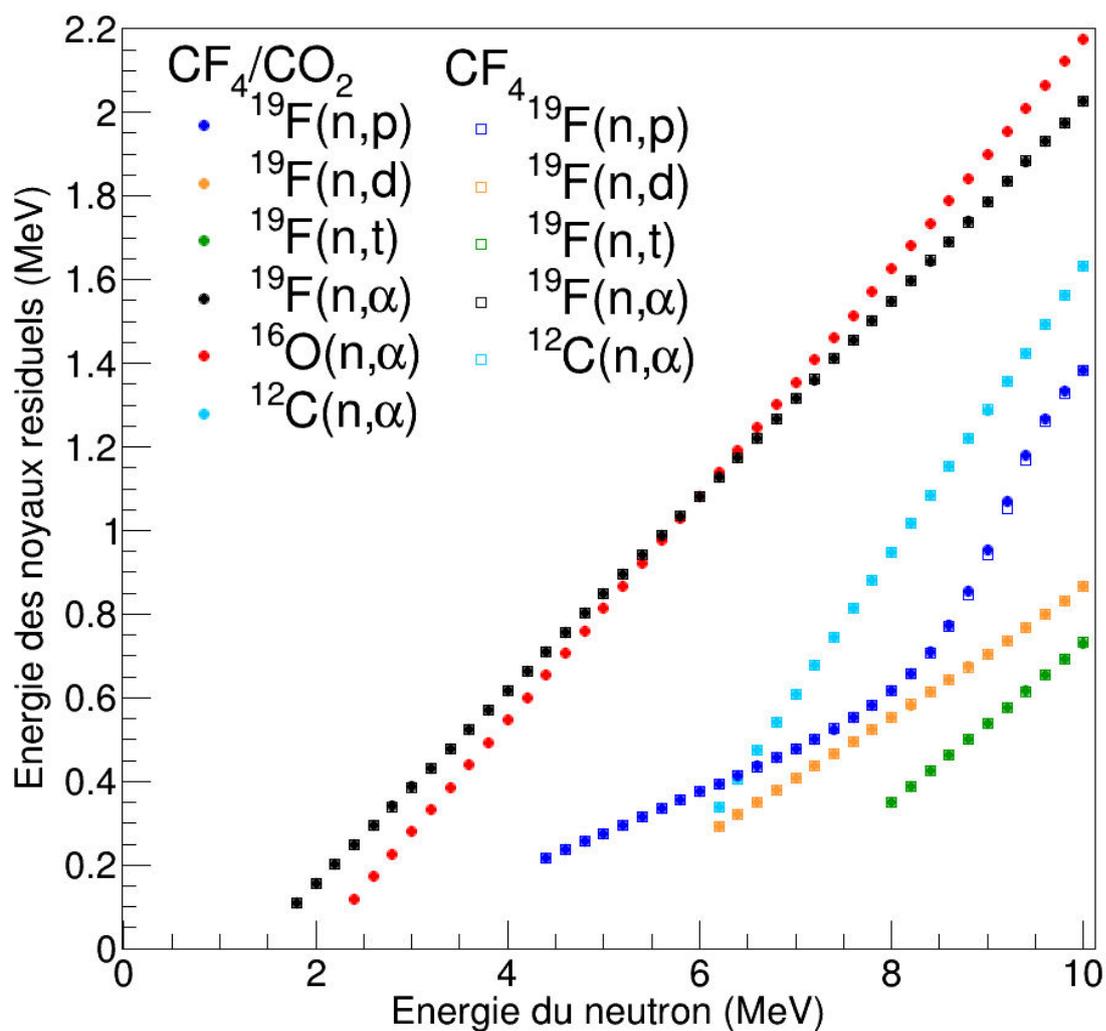


FIGURE 4.22 – Valeurs moyennes de l'énergie des noyaux résiduels ( $^{19}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$ ,  $^{16}\text{N}$ ,  $^{13}\text{C}$  et  $^9\text{Be}$ ) pour chaque énergie du neutron incident. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulées dans le  $\text{CF}_4$ .

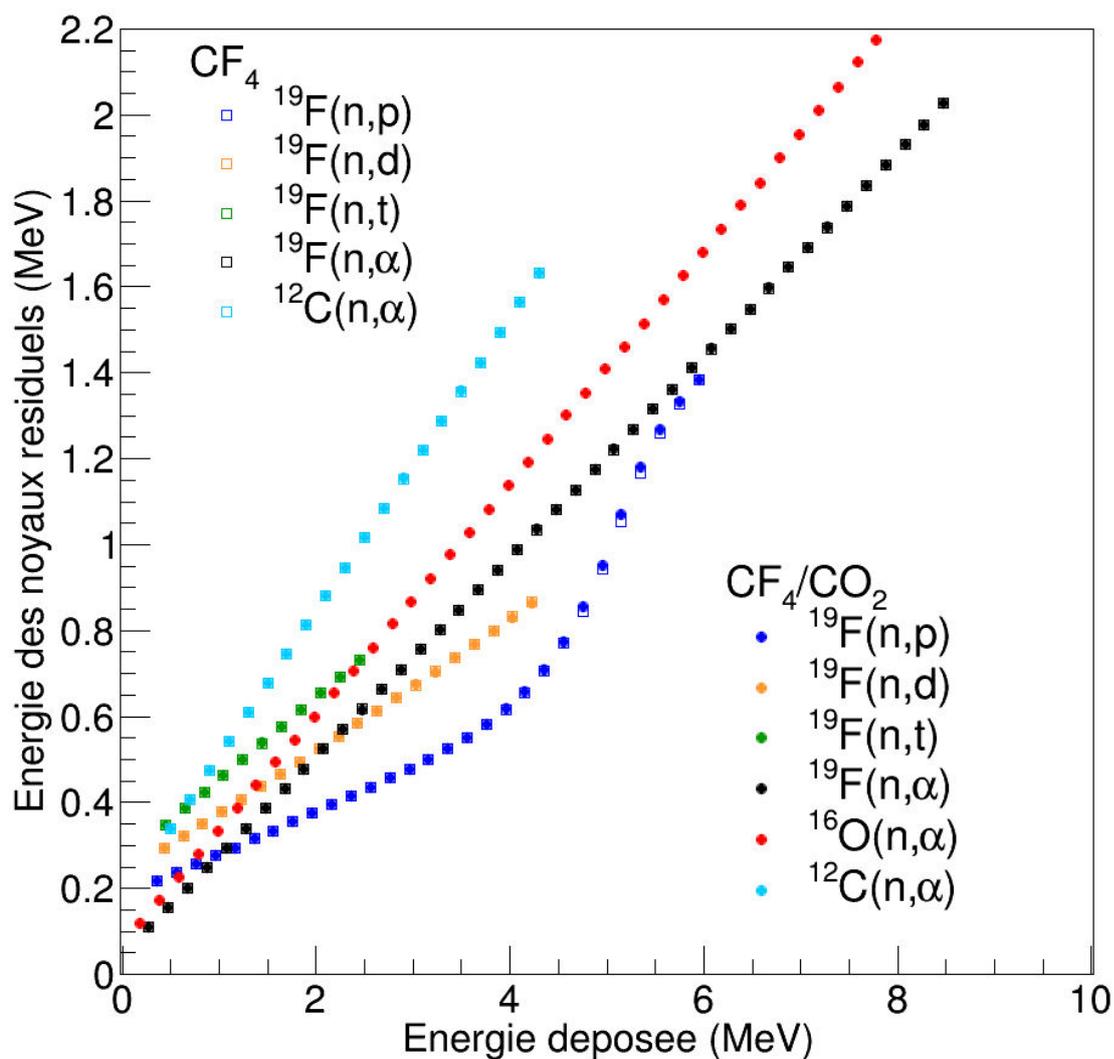


FIGURE 4.23 – Valeurs moyennes de l'énergie des noyaux résiduels ( $^{19}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$ ,  $^{16}\text{N}$ ,  $^{13}\text{C}$  et  $^9\text{Be}$ ) en fonction de l'énergie déposée. Les marqueurs ronds représentent les événements relatifs aux réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ ) et les marqueurs carrés aux réactions simulées dans le  $\text{CF}_4$ .

En effet, la distance entre le dispositif expérimental et la source de neutrons (émis par la ligne de faisceau de neutron NFS) est connu avec précision :  $L = 5 \text{ m} \pm 1 \text{ cm}$ .

Pour les simulations, cette distance correspond à la base de vol d'une particule émise par la source jusqu'à son point d'interaction dans le volume de gaz confiné entre les électrodes de la chambre d'ionisation.

La distance  $L$  correspond donc à la distance entre la source de neutrons et l'origine des coordonnées  $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$  qui se trouve au centre de l'enceinte extérieure. Le point d'interaction est défini par les coordonnées  $(x_0, y_0, z_0)$ . La distance de vol  $d$  vaut donc :

$$d = L + z_0 \quad (4.8)$$

L'énergie estimée du neutron incident  $En$  est défini par l'équation suivante :

$$En = \frac{1}{2} \cdot m_n \cdot \left( \frac{d}{t} \right)^2 \quad (4.9)$$

L'incertitude liée à l'énergie estimée du neutron incident est :

$$u_{En} = 2 \cdot En \cdot \sqrt{\frac{(u_d)^2}{d^2} + \frac{(u_t)^2}{t^2}} \quad (4.10)$$

La figure 4.24 (en page 119) représente la distribution de l'énergie cinétique du neutron incident (par intervalle d'énergie de 100 keV) à partir des résultats des simulations, pour du  $\text{CF}_4$  pur et pour le mélange gazeux composé de 97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ . Sur ces figures la courbe noire se réfère à l'énergie cinétique du neutron incident déterminée à partir de l'équation suivante :

$$En = \frac{1}{2} \cdot m_n \cdot \left( \frac{z_0 + 5000}{t_0} \right)^2 \quad (4.11)$$

où l'énergie cinétique  $En$  est fonction de la base de vol  $z_0 + 5000$  et le temps de vol  $t_0$  (temps simulé entre le moment où le neutron est émis et le moment où une réaction a lieu dans le volume utile).

Cette équation est utilisée par le programme de simulation SICSIMULATION pour déterminer l'énergie cinétique des neutrons incident à partir du générateur d'événements SCALPGENERATOR.

Expérimentalement, l'énergie cinétique ne sera pas mesurée, mais sera déduite à partir des signaux reçus par la chambre d'ionisation. Le temps de vol sera estimé à partir du moment où le neutron sera émis par la ligne NFS et au moment où les photons issus de la désexcitation du  $\text{CF}_4$  seront détectés par la photo-cathode (sur les quatre photo-multiplicateurs) recevant le maximum de lumière, soit  $t_0 + t_{max}$ .

$$En = \frac{1}{2} \cdot m_n \cdot \left( \frac{z_{moy}}{t_0 + t_{max}} \right)^2 \quad (4.12)$$

Sur la figure 4.24 l'énergie cinétique représentée par la courbe rouge est déterminée à partir de l'équation 4.12. La distribution des énergies cinétiques représentées sur la figure 4.24 montre des structures dues aux résonances des sections efficaces.

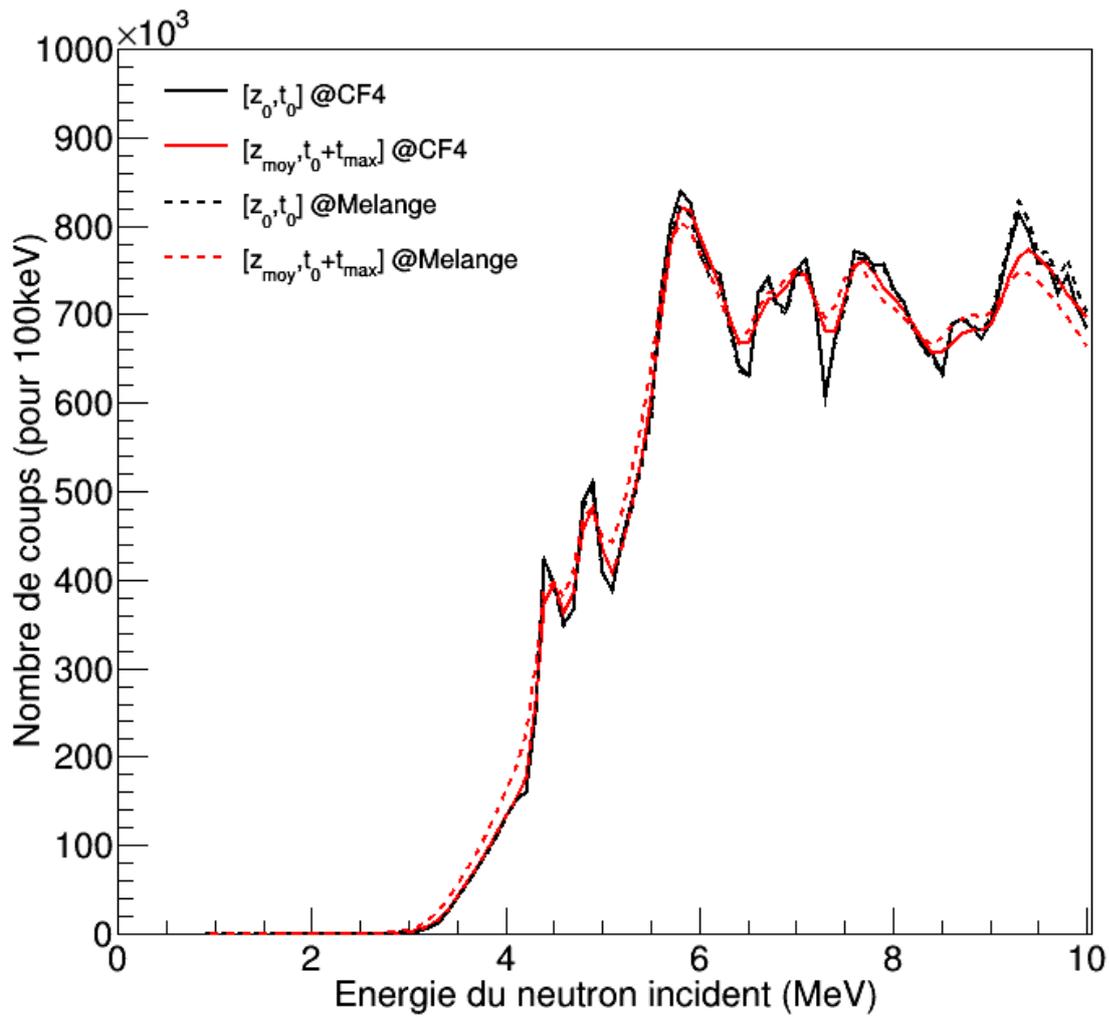


FIGURE 4.24 – Distribution de l'énergie cinétique du neutron incident (par intervalle d'énergie de 100 keV) pour le  $CF_4$  (courbes en trait plein) et pour le mélange gazeux (97%  $CF_4$  et 3%  $CO_2$ ) (courbes en pointillés). En noir les courbes représentent l'énergie en fonction de  $z_0$  et  $t_0$  (équation 4.11) et en rouge l'énergie en fonction de  $z_{moy}$  et  $t_0 + t_{max}$  (équation 4.12).

La courbe noire et la courbe rouge montrent des différences. Sur cette dernière, les structures sont moins importantes.

La résolution relative de l'énergie est déterminée à partir de la différence, pour chaque événement, de l'énergie cinétique utilisée dans les simulations (donc l'énergie des événements provenant de SCALPGENERATOR) et de l'énergie cinétique déterminée. Ceci correspond donc à la différence entre les courbes noires et les courbes rouges de la figure 4.24.

La largeur à mi-hauteur  $FWHM$  de la différence entre les deux énergies déterminées par les équations 4.11 et 4.12 est calculée pour chaque énergie  $\langle E \rangle$  (à partir des écarts-types estimés  $\sigma$ ). Cette largeur permet ensuite de déterminer la résolution relative  $\frac{\Delta(E)}{E}$  en énergie suivant l'équation suivante :

$$\frac{\Delta(E)}{E} = \frac{FWHM}{\langle E \rangle} = \frac{2 \cdot \sqrt{2 \cdot \ln(2)} \cdot \sigma}{\langle E \rangle} \quad (4.13)$$

La figure 4.25 (en page 121) représente la résolution relative en énergie estimée du dispositif expérimental, en utilisant pour la détermination de l'énergie cinétique du neutron incident l'équation 4.12.

En utilisant cette méthode, la résolution se dégrade. A faible énergie, celle-ci est comprise entre 6,5 et 9% (respectivement pour du  $CF_4$  et pour le mélange gazeux). La valeur de ces résolutions diminuent plus l'énergie du neutron incident augmente. La résolution est plus faible aux basses énergies, tandis qu'elle s'améliore plus l'énergie augmente. Pour des énergies de 10 MeV (énergies maximales utilisées dans ce manuscrit), les résolutions sont respectivement de 3,5% et 4%.

En annexe C sont répertoriés dans les tableaux C.27 et C.28 les résolutions relatives en énergie estimées pour les deux gaz pour différentes énergies.

## 4.2.2 Efficacité lumineuse

Un seuil en quantité de lumière doit être appliqué pour permettre de récupérer les événements relatifs aux réactions d'intérêts. Avec un mélange composé de 97% de  $CF_4$  et 3% de  $CO_2$ , le nombre de photo-électrons émis par photo-cathode est la moitié de ceux émis dans du  $CF_4$  pur (voir la partie 2.2). Cette contrainte implique que des seuils en énergie différents seront à appliquer lors des manipulations sur la ligne de faisceau NFS pour permettre de récupérer les signaux des deux réactions  $^{19}F(n,\alpha)$  et  $^{16}O(n,\alpha)$ .

Pour cela des courbes représentant les efficacités lumineuses (pour différents seuils en lumière) sont étudiées. Ces courbes permettront, lors des mesures auprès de la ligne de faisceau de neutrons NFS, de déterminer le nombre de coups à prendre en compte par énergie, en fonction du seuil en quantité de lumière utilisé. Les courbes 4.26 (en page 122) et 4.27 (en page 123) représentent les efficacités lumineuses pour les événements des réactions  $^{19}F(n,\alpha)$ ,  $^{16}N$  et  $^{16}O(n,\alpha)$ ,  $^{13}C$ , dans le  $CF_4$  et dans le mélange gazeux respectivement.

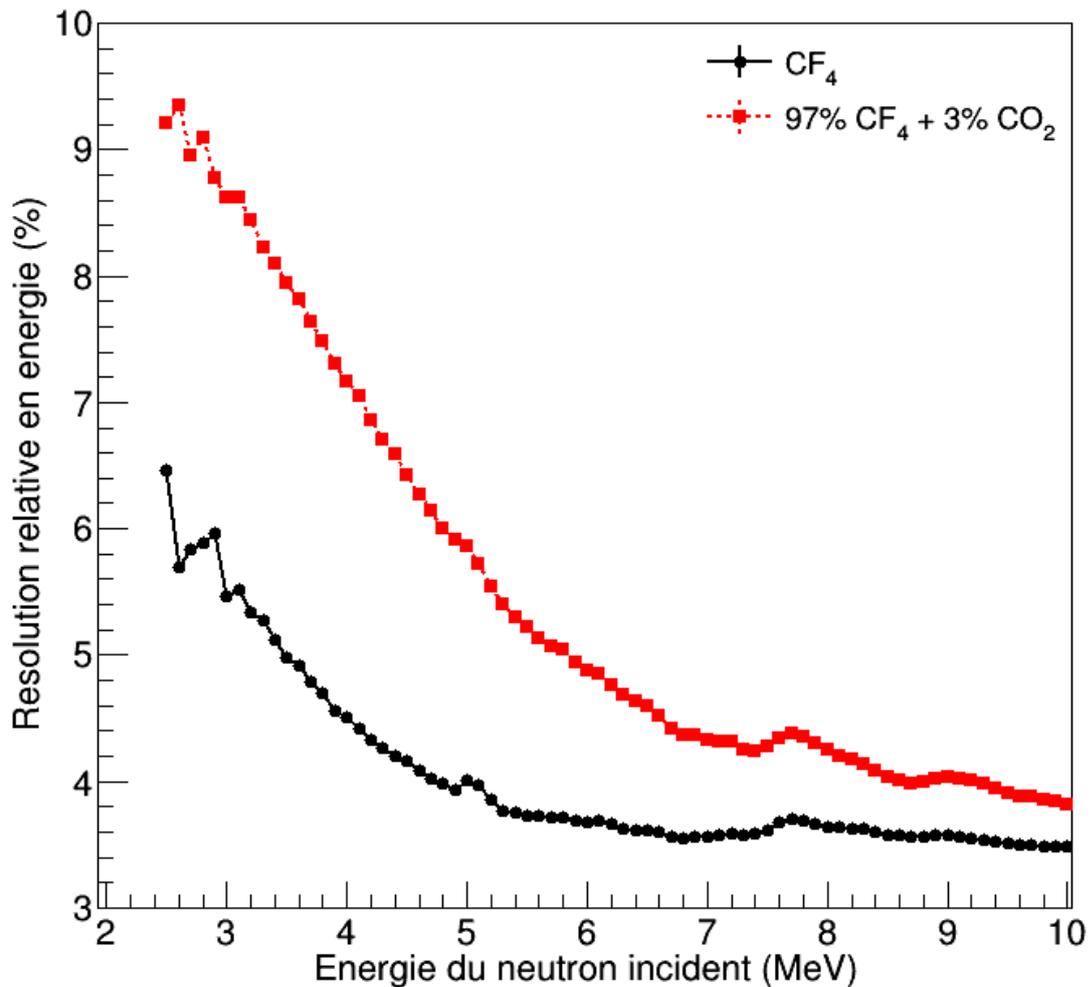


FIGURE 4.25 – Résolution relative en énergie du dispositif expérimental (en utilisant pour la détermination de l'énergie cinétique du neutron incident l'équation 4.12). La courbe rouge représente la résolution relative en énergie déterminée pour les événements simulés dans du  $\text{CF}_4$  et la courbe noire pour le mélange composé de 97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ .

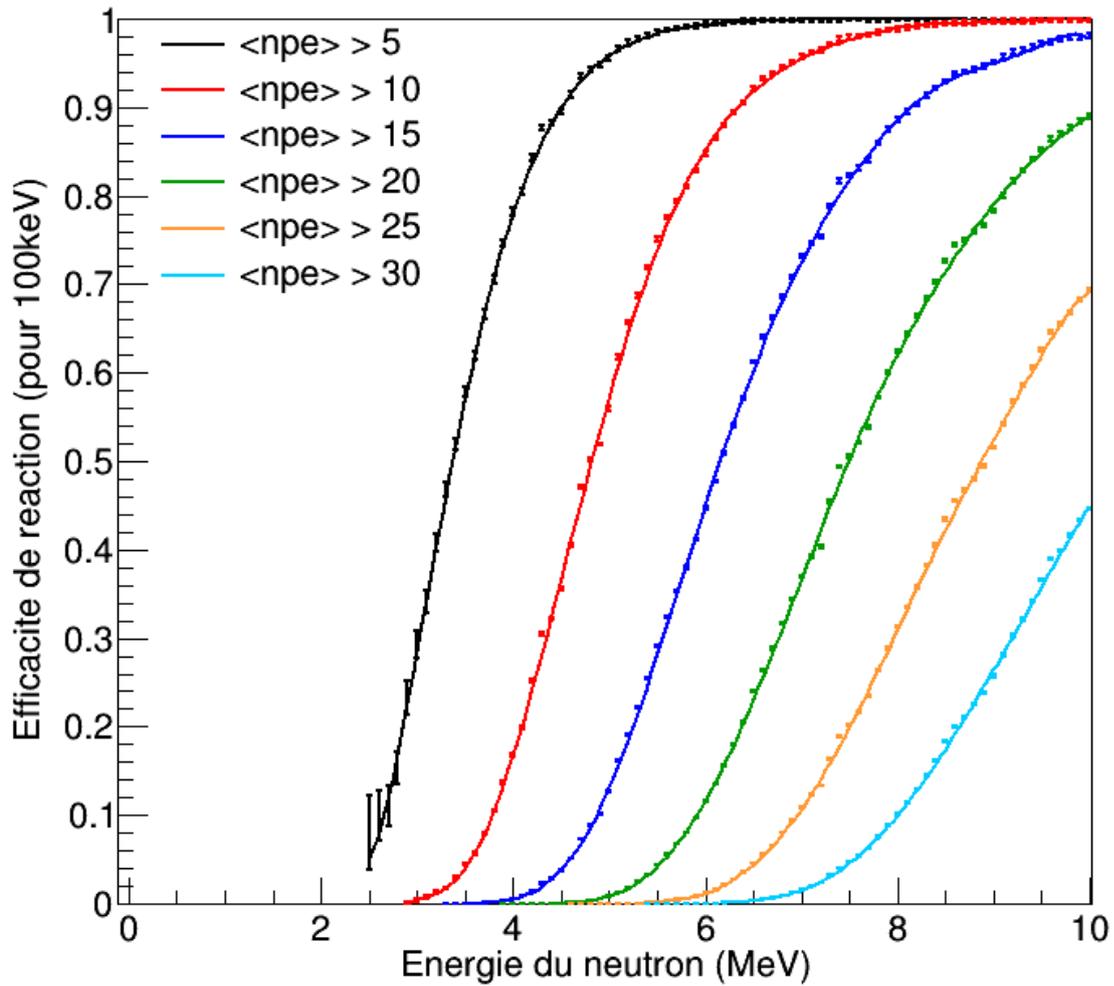


FIGURE 4.26 – Efficacité lumineuse en fonction de l'énergie de neutron incident pour la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  simulés dans du  $\text{CF}_4$ . Les pointillées représentent les ajustements à partir des valeurs expérimentales en utilisant une fonction polynomiale de degré 9 (degré 6 pour la courbe  $\langle npe \rangle = 30$ ).

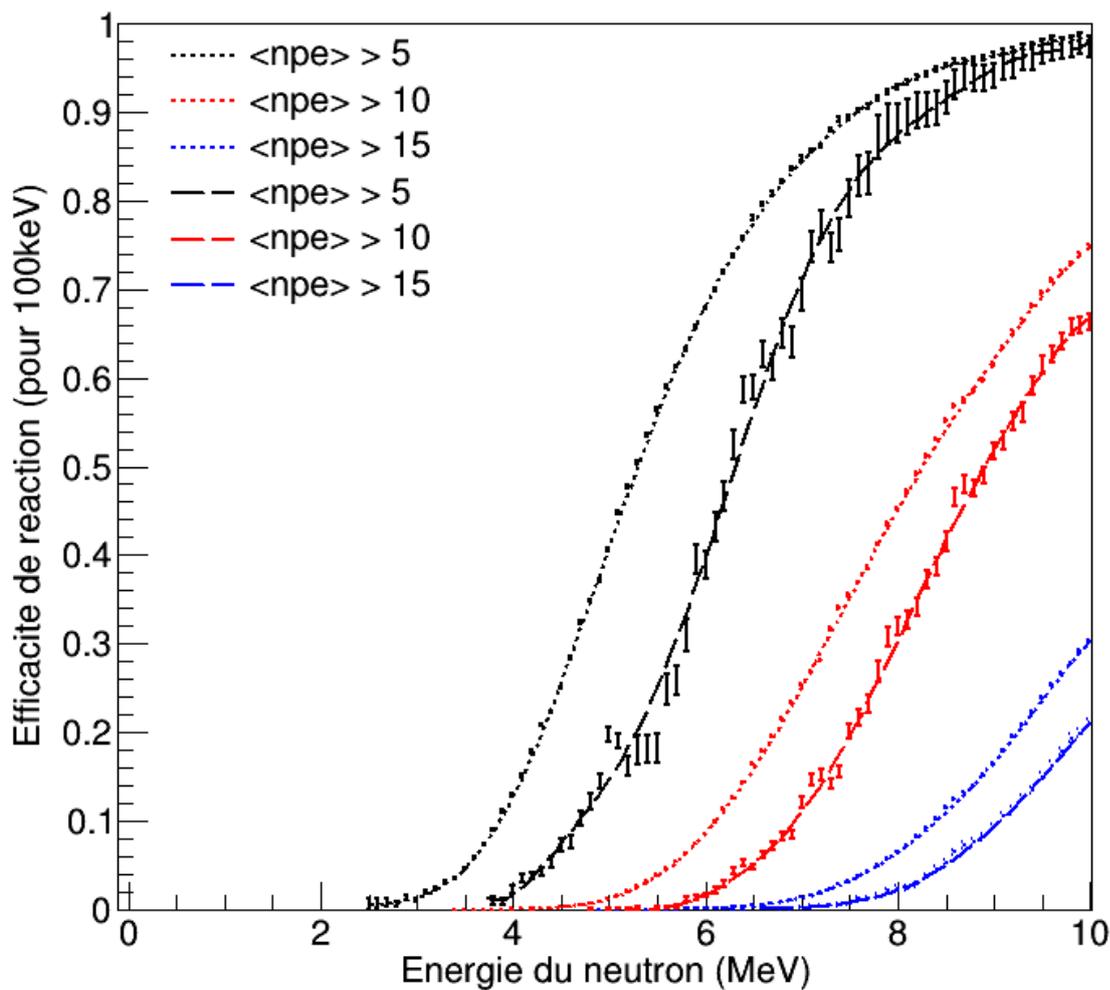


FIGURE 4.27 – Efficacité lumineuse en fonction de l'énergie de neutron incident pour les réactions  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  (courbes en tirets fins) et  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  (courbes en tirets longs) dans le mélange gazeux (97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ ). Les pointillés représentent les ajustements à partir des valeurs expérimentales en utilisant une fonction polynomiale de degré 9 (ou moins dans certains cas).

L'efficacité lumineuse  $c_i$  à une énergie donnée se détermine à partir du rapport entre le nombre de coups par intervalle d'énergie avec seuil en lumière  $N_i$  sur le nombre de coups total (sans utilisation de seuil en lumière) pour le même intervalle en énergie  $N_{tot}$  :

$$c_i = \frac{N_i}{N_{tot}} \quad (4.14)$$

Les incertitudes  $\sqrt{N_i}$  et  $\sqrt{N_{tot}}$  sont des erreurs statistiques. Les erreurs relatives sont donc importantes pour des énergies proches du seuil, et faibles pour des hautes énergies. Des ajustements sont réalisés à partir de fonctions polynomiales. Leurs paramètres sont représentés dans l'annexe C dans les tableaux C.29 et C.30.

### 4.2.3 Section efficace estimée

En appliquant la définition opérationnelle de la section efficace, on écrit :

$$\sigma_{eq} = \frac{N_{eq}}{c_{95} \cdot \Phi \cdot N_{cible}} \quad (4.15)$$

où  $\sigma_{eq}$  est la section efficace équivalente,  $N_{eq}$  le nombre d'événements,  $c_{95}$  le coefficient de correction d'efficacité de réaction (introduits dans la partie 4.1.1.1),  $\Phi$  le flux de neutrons incidents (à une énergie cinétique définie) et  $N_{cible}$  le nombre d'atomes cibles. Une fois la valeur de  $\sigma_{eq}$  obtenue, la valeur de la section efficace est déterminée.

A partir de ce nombre, une normalisation est réalisée, permettant ainsi de déterminer la section efficace de chaque réaction estimée à partir des performances du dispositif expérimental SCALP. La valeur de la section efficace de la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  à 8 MeV ( $\sigma_{ENDF} = 0,098$  b) est utilisée pour la normalisation, car la fonction d'excitation évaluée par ENDF/B-VII.1 est constante entre 7,7 et 8,7 MeV. La section efficace équivalente  $\sigma_{est,^{19}\text{F}(n,\alpha)}$  à 8 MeV est déterminée (pour la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  dans le  $\text{CF}_4$  et dans le mélange). A partir de ce nombre la section efficace estimée pour chaque réaction est déterminée :

$$\sigma_{est} = \frac{\sigma_{eq} \cdot \sigma_{ENDF}}{\sigma_{est,^{19}\text{F}(n,\alpha)}} \quad (4.16)$$

Les courbes d'efficacité lumineuse introduites dans la partie 4.2.2 sont utilisées dans le cas où un seuil en quantité de lumière est utilisée. Avec ces conditions la section efficace estimée avec un seuil en quantité de lumière est équivalente à celle estimée sans seuil.

Les sections efficaces des réactions  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ ,  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  et  $^{12}\text{C}(n,\alpha)^9\text{Be}$  dans le  $\text{CF}_4$  et dans le mélange composé de  $\text{CF}_4$  et  $\text{CO}_2$  (normalisées à 8 MeV) sont représentées sur les figures 4.28 (en page 125) et 4.29 (en page 126). Elles sont comparées avec les évaluations (ENDF) correspondantes.

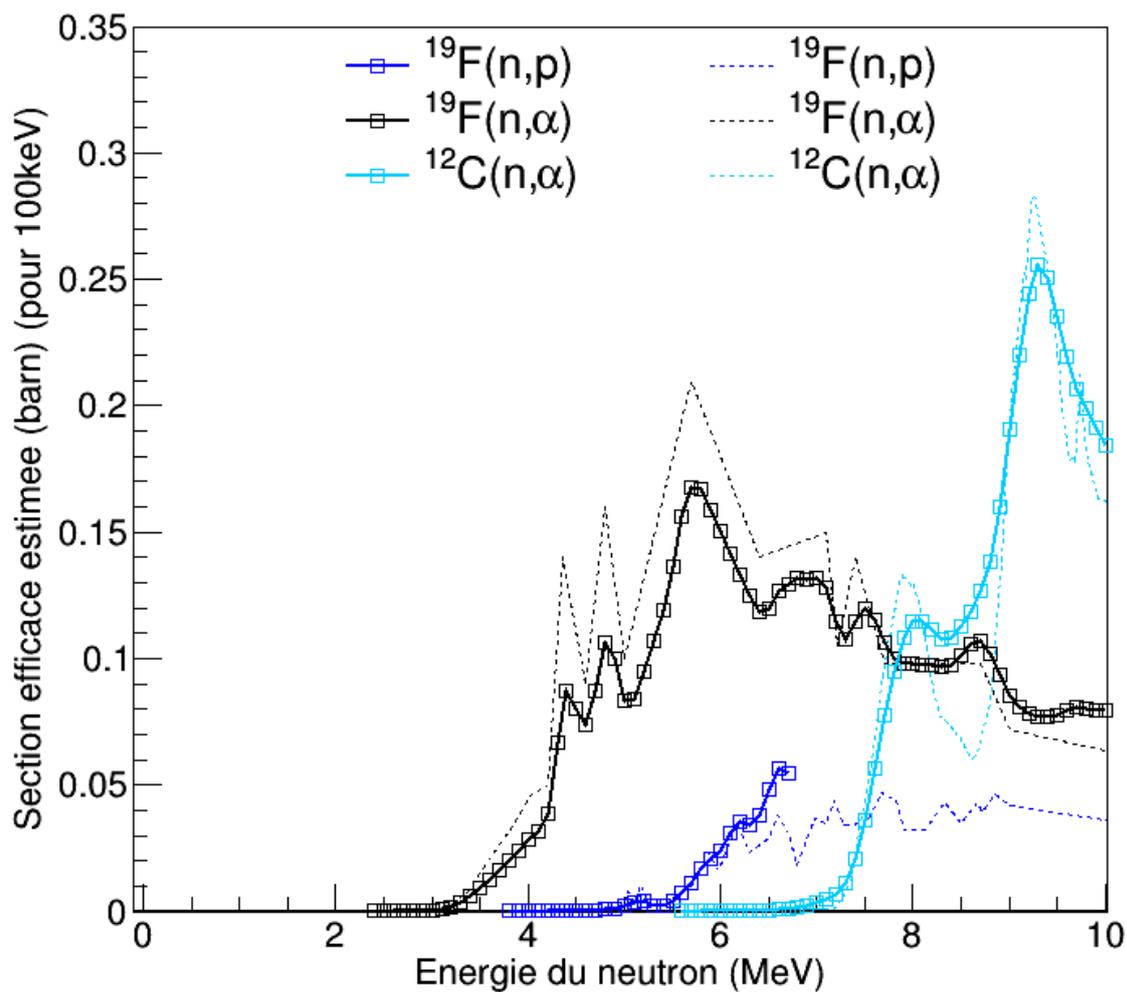


FIGURE 4.28 – Section efficace estimée à partir des résultats des simulations GEANT4 après normalisation à 8 MeV des réactions simulées dans du  $\text{CF}_4$  : en noir la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$ , en bleu foncé la réaction  $^{19}\text{F}(n,p)^{19}\text{O}$  et en bleu clair la réaction  $^{12}\text{C}(n,\alpha)^9\text{Be}$  (qui n'est pas différenciée avec la réaction  $^{19}\text{F}(n,d)^{18}\text{O}$ ). En pointillé, sont représentées les évaluations de ces trois réactions par ENDF/B-VII.1.

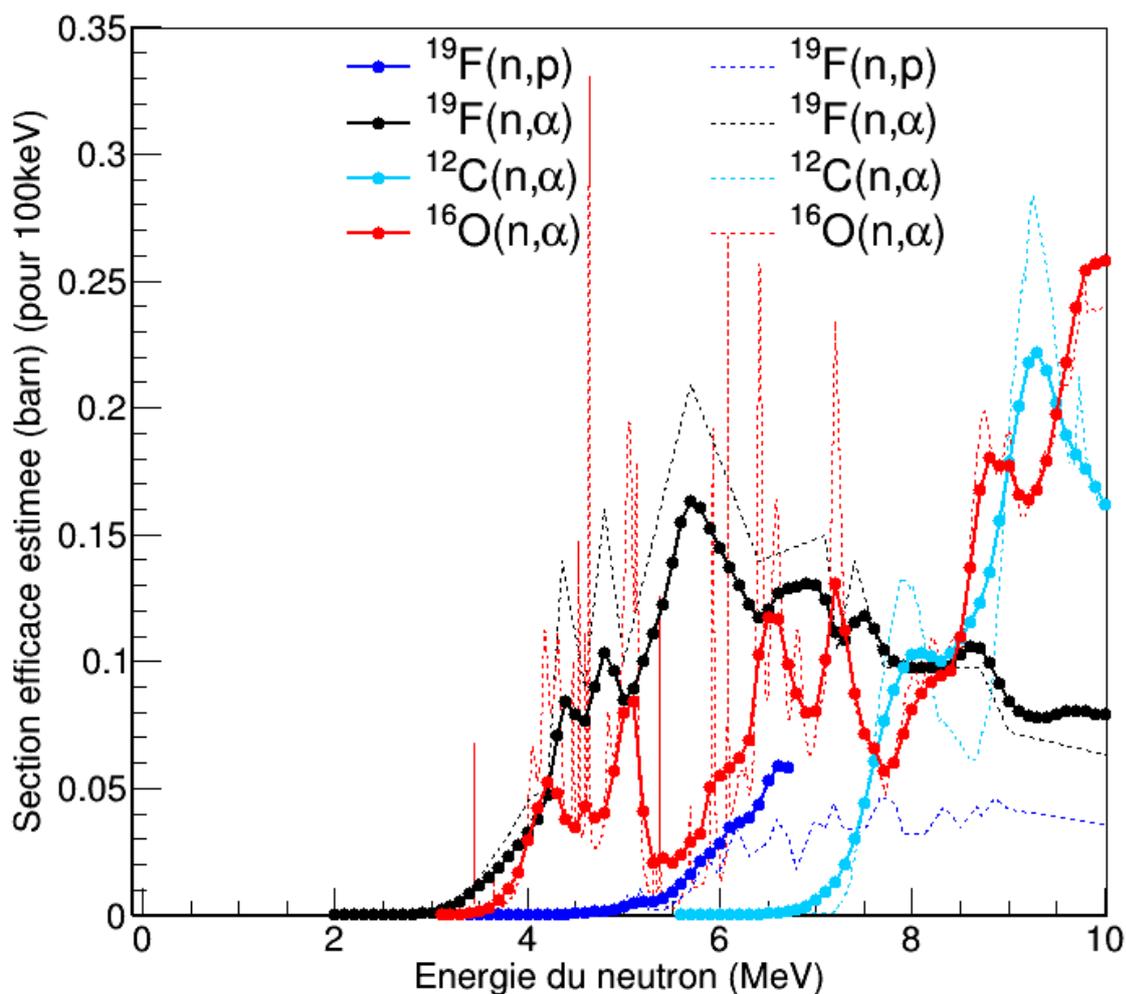


FIGURE 4.29 – Section efficace estimée à partir des résultats des simulations GEANT4 après normalisation à 8 MeV dans le mélange gazeux (97% de CF<sub>4</sub> et 3% de CO<sub>2</sub>) : en noir la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$ , en rouge la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ , en bleu foncé la réaction  $^{19}\text{F}(n,p)^{19}\text{O}$  et en bleu clair la réaction  $^{12}\text{C}(n,\alpha)^9\text{Be}$  (qui n'est pas différenciée avec la réaction  $^{19}\text{F}(n,d)^{18}\text{O}$ ). En pointillé, sont représentées les évaluations de ces quatre réactions par ENDF/B-VII.1.

Les estimations sur la section efficace de la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  montrent des différences avec l'évaluation ENDF. A faible énergie, les estimations semblent sous-estimées.

Après l'énergie prise pour la normalisation, elles sont sur-estimées. Les structures de la section efficace sont visibles. Les estimations sur la section efficace de la réaction  $^{12}\text{C}(n,\alpha)^9\text{Be}$  sont aussi comparées avec les évaluations. Néanmoins, cette réaction n'est pas différenciée avec la réaction  $^{19}\text{F}(n,d)^{18}\text{O}$ . Les estimations sur cette réaction sont donc biaisées.

Les estimations de la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  sont comparées avec les évaluations ENDF. Hormis aux énergies où des résonances sont importantes, les estimations sont cohérentes avec l'évaluation ENDF sur toute la gamme en énergie étudiée.

#### 4.2.4 Précisions estimées sur la section efficace

Dans la partie précédente ont été présentées les estimations des sections efficaces attendues après simulation par GEANT4 du dispositif SCALP. Ces estimations ont été faites à partir d'une normalisation, en utilisant la section efficace de l'évaluation ENDF/B-VII.1 de la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  à 8 MeV. L'équation 4.15 introduit la section efficace équivalente déterminée à chaque énergie. En utilisant la propagation des erreurs, l'incertitude sur cette valeur est la suivante :

$$u_{\sigma_{eq}} = \sigma_{eq} \cdot \sqrt{\left(\frac{u_{N_{eq}}}{N_{eq}}\right)^2 + \left(\frac{u_{c95}}{C95}\right)^2 + \left(\frac{u_{\Phi}}{\Phi}\right)^2 + \left(\frac{u_{N_{cible}}}{N_{cible}}\right)^2} \quad (4.17)$$

L'erreur relative sur le volume utile a été estimée à 8%. Par conséquent, le nombre d'atomes cibles est déterminée avec une incertitude non négligeable. C'est le paramètre dont l'incertitude (relative) est la plus importante. La normalisation utilisée implique également d'autres erreurs. La section efficace utilisée par la bibliothèque ENDF/B-VII.1 a une précision de 10% d'après JANIS [139]. Ce paramètre doit être pris en compte dans l'estimation de la section efficace obtenue à partir des simulations. En utilisant la normalisation, l'incertitude sur la section efficace estimée  $N_{est}$  est :

$$u_{\sigma_{est}} = \sigma_{est} \cdot \sqrt{\left(\frac{u_{\sigma_{eq}}}{\sigma_{eq}}\right)^2 + \left(\frac{u_{\sigma_{ENDF}}}{\sigma_{ENDF}}\right)^2 + \left(\frac{u_{\sigma_{est},^{19}\text{F}(n,\alpha)}}{\sigma_{est,^{19}\text{F}(n,\alpha)}}\right)^2} \quad (4.18)$$

L'erreur relative sur la valeur de la section efficace estimée  $N_{est}$  est de 15% à haute énergie. A faible énergie cette erreur est plus importante. Les figures 4.30 et 4.31 représentent les sections efficaces estimées représentées respectivement dans les figures 4.28 et 4.29 , auxquelles ont été ajoutées les erreurs estimées. Elles sont également comparées avec les évaluations faites par la bibliothèque ENDF/B-VII.1 pour chaque réaction. Les résultats présentés dans les figures 4.30 et 4.31 sont disponibles en annexe C, dans les tableaux C.31, C.32 et C.33.

A faible énergie, les sections efficaces estimées sur la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  sont systématiquement inférieures aux évaluations de chaque réaction nucléaire. A partir de 6, 5 MeV, elles sont cohérentes entre elles, aux incertitudes près.

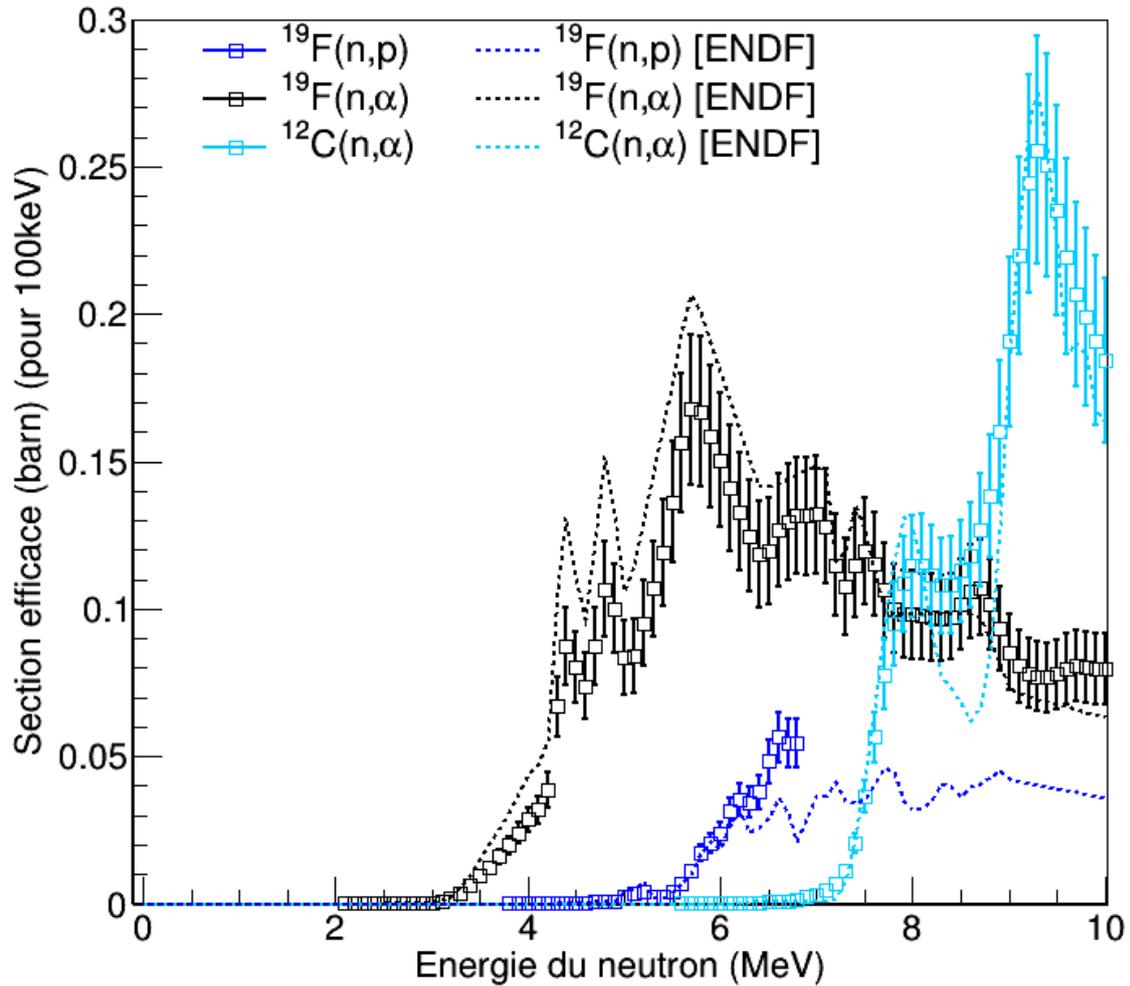


FIGURE 4.30 – Section efficace estimée des réactions simulées dans le  $\text{CF}_4$  pur et les incertitudes associées. En pointillé, sont représentées les évaluations de ces trois réactions par ENDF/B-VII.1 (déterminées pour les mêmes intervalles en énergie).

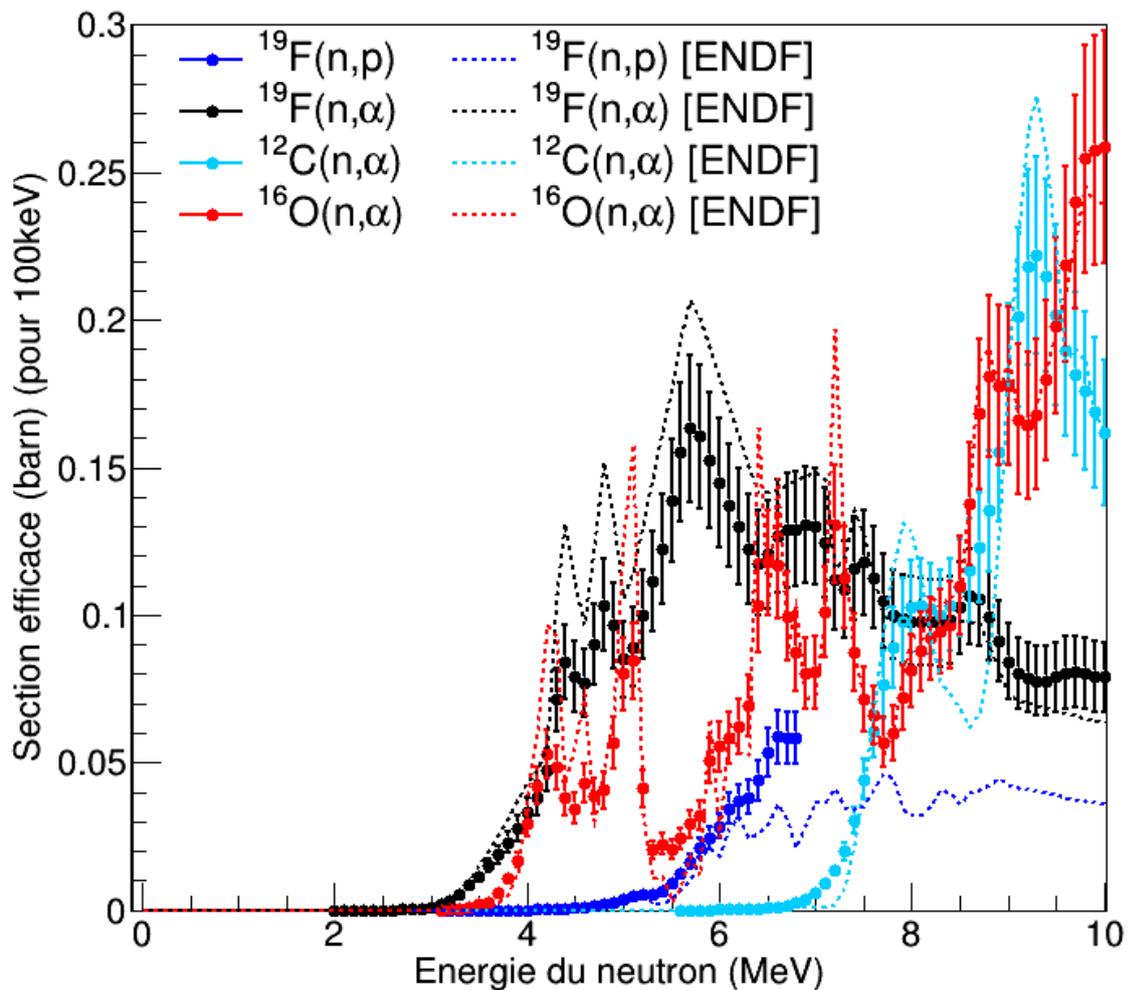


FIGURE 4.31 – Section efficace estimée des réactions simulées dans le mélange gazeux (97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ ) et les incertitudes associées. En pointillé, sont représentées les évaluations de ces trois réactions par ENDF/B-VII.1 (déterminées pour les mêmes intervalles en énergie).

Les résonances présentes dans la fonction d'excitation de la réaction  $^{16}\text{O}(\text{n},\alpha)^{13}\text{C}$  rendent difficiles l'appréciation de l'estimation de la section efficace à faible énergie.

Néanmoins, de 5 à 6,5 MeV l'estimation réalisée semble supérieure à l'évaluation faite par ENDF. A partir de 6,5 MeV, les résultats obtenus sont cohérents avec l'évaluation, aux incertitudes près. La réaction  $^{12}\text{C}(\text{n},\alpha)^9\text{Be}$  n'est pas discernable avec la réaction  $^{19}\text{F}(\text{n},\text{d})^{18}\text{O}$ . Néanmoins, cette dernière réaction n'est pas correctement détectée (comme vu dans la partie 4.1.1.1). Par conséquent, à haute énergie la section efficace estimée sur la réaction  $^{12}\text{C}(\text{n},\alpha)^9\text{Be}$  semble cohérente, aux incertitudes près, avec l'évaluation faite par ENDF sur cette énergie.

Sur les réactions  $^{19}\text{F}(\text{n},\alpha)^{16}\text{N}$  et  $^{16}\text{O}(\text{n},\alpha)^{13}\text{C}$ , les erreurs relatives sont estimées à 15% à haute énergie. Ces erreurs sont très importantes pour des énergies proches du seuil (environ 38% pour les réactions simulées dans du  $\text{CF}_4$ , entre 60% et 72% pour celles simulées dans le mélange gazeux). Toutes ces erreurs sont en partie statistiques et systématiques. Elles prennent en compte la détermination de l'énergie cinétique du neutron incident en prenant comme base de temps de vol le milieu de la chambre d'ionisation. C'est la principale limite de cette méthode.

### 4.3 Estimation du temps de manipulation

L'estimation du temps de manipulation (auprès de la ligne de faisceau de neutrons NFS) est importante.

Cette estimation a été faite pour la section efficace la plus basse atteinte<sup>1</sup> de la fonction d'excitation (de la bibliothèque ENDF/B-VII.1) de la réaction  $^{16}\text{O}(\text{n},\alpha)^{13}\text{C}$ , soit  $2,7799 \pm 0,0556$  mb pour une énergie de 5,51 MeV (voir la figure 1.1 dans la partie 1.2.2.1). A cette énergie, la section efficace de la réaction  $^{19}\text{F}(\text{n},\alpha)^{16}\text{N}$  est estimée à  $180,1429 \pm 18,0143$  mb, soit presque 65 fois plus élevée<sup>2</sup>.

Une nouvelle estimation de la section efficace a été faite par la dernière version d'ENDF (bibliothèque ENDF/B-VIII.B3). La section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(\text{n},\alpha)^{13}\text{C}$  a été réévaluée à 5,51 MeV à 4,1414 mb, soit un facteur d'environ 1,5 par rapport à l'ancienne estimation.

Le taux de réaction  $\tau$  est déterminé de la façon suivante :

$$\tau = \eta_{\text{cible}} \cdot \sigma \cdot \phi \quad (4.19)$$

avec  $\tau$  le taux de réaction (en  $\text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3}$ ),  $\sigma$  la section efficace (en b),  $\phi$  le flux de neutrons incidents (en neutrons. $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) et la densité d'atomes cibles  $\eta_{\text{cible}}$  dans la chambre (en atomes. $\text{cm}^{-3}$ ). est défini, dans l'approximation des gaz parfaits :

$$\eta_{\text{cible}} = \frac{\rho_{\text{cible}} \cdot N_A}{M_{\text{cible}}} \quad (4.20)$$

1. Les calculs du temps de manipulation sont réalisés pour le cas le plus pessimiste possible.

2. Les erreurs sur les sections efficaces sont données par le programme JANIS [139] : 10% sur la section efficace de la réaction  $^{19}\text{F}(\text{n},\alpha)^{16}\text{N}$  et 2% sur la réaction  $^{16}\text{O}(\text{n},\alpha)^{13}\text{C}$ .

avec  $\rho_{cible}$  et  $M_{cible}$  sont respectivement la masse volumique (en  $\text{g.cm}^{-3}$ ) et la masse molaire (en  $\text{g.mol}^{-1}$ ) des gaz étudiés.  $N_a$  est la constante d'Avogadro ( $6,022\,140\,857 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ).

A partir de cette densité, le nombre d'atomes cibles  $N_{cible}$  dans le volume utile  $V_{utile}$  est estimé de la façon suivante :

$$N_{cible} = \eta_{cible} \cdot V_{utile} \quad (4.21)$$

La masse volumique des deux gaz est calculée, dans cette partie, dans les conditions expérimentales attendues, soit une pression d'1 bar et à une température de 15 °C. La densité atomique définie par l'équation 4.20 est estimée à  $2,514 \times 10^{19} \text{ atomes.cm}^{-3}$ , dans ces conditions.

Le tableau 4.2 représente différentes caractéristiques des deux gaz (la masse molaire  $M_{cible}$ , la masse volumique  $\rho_{cible}$  et la densité d'atomes cibles  $\eta_{cible}$ ). Sont également représenté le volume utile estimé à 5,51 MeV (calculé à partir des résultats présentés en figure 4.9) pour chaque réaction d'intérêt et pour chaque gaz simulé, et le nombre  $N_{cible}$  d'atomes cibles ( $^{19}\text{F}$  et  $^{16}\text{O}$ ) pour chaque gaz dans le volume utile défini.

Gaz Réaction	CF <sub>4</sub> <sup>19</sup> F(n,α)	97% CF <sub>4</sub> + 3% CO <sub>2</sub>	
		<sup>19</sup> F(n,α)	<sup>16</sup> O(n,α)
$M_{cible}$ (g.mol <sup>-1</sup> )	88,0043 ± 0,0009	86,6845 ± 0,0016	
$\rho_{cible}$ (10 <sup>-3</sup> g.cm <sup>-3</sup> )	3,673 ± 0,013	3,618 ± 0,013	
$V_{utile}$ (cm <sup>3</sup> )	227,9 ± 18,2	228,0 ± 18,2	234,4 ± 18,8
$\eta_{cible}$ (10 <sup>19</sup> atomes.cm <sup>-3</sup> )	2,011 ± 0,007	1,974 ± 0,007	(3,046 ± 0,011) × 10 <sup>-2</sup>
$N_{cible}$ (10 <sup>21</sup> atomes)	4,57 ± 0,37	4,49 ± 0,36	(7,14 ± 0,57) × 10 <sup>-2</sup>

TABLEAU 4.2 – Caractéristiques des deux gaz étudiés (CF<sub>4</sub> et le mélange composé de 97% CF<sub>4</sub> et 3% CO<sub>2</sub>) pour les deux réactions  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  et  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ .

Expérimentalement, on peut estimer l'incertitude sur la pression à 1 mbar et celle sur la température à 1 °C. Les erreurs sur la masse molaire proviennent de la pureté des bouteilles de gaz [140]. La pureté du CF<sub>4</sub> est de 99,999% et celle sur le CO<sub>2</sub> de 99,9%, l'incertitude relative sur la masse molaire du CF<sub>4</sub> est donc estimée à 0,001% et sur le CO<sub>2</sub> de 0,1%.

A partir de ces conditions, la masse volumique de chaque gaz est estimée avec une erreur relative de 0,4%, ce qui implique également une erreur relative de 0,4% sur l'estimation de la densité atomique. L'incertitude du nombre de noyaux cibles est, par conséquent, dominée par celle sur le volume utile (8%).

A partir du tableau 4.2, le taux de réaction  $\tau$  (en réactions.cm<sup>-3</sup>.s<sup>-1</sup>) pour avoir 10 000 événements sur chaque réaction est estimé. Ce taux de réaction est ensuite converti en nombre de réactions par unité de temps dans le volume utile, pour permettre ainsi de déterminer un temps de manipulation par réaction (et par gaz) nécessaire pour avoir 10 000 événements.

Les taux de réaction et les temps de manipulation associés sont déterminés pour différentes intensités moyennes du faisceau d'ions et pour différentes distances entre le convertisseur et le détecteur.

Le tableau 4.3 représente le flux estimé (pour des neutrons de 5,51 MeV). L'utilisation du choper contrôle la période du faisceau d'ions, et le flux est maximal sans l'utilisation d'un choper (intensité moyenne estimée à 5 mA).

Intensité ( $\mu\text{A}$ )	Choper	Distance			
		5 m	10 m	15 m	20 m
10 $\mu\text{A}$	1/500	314 652	78 663	34 961	19 666
20 $\mu\text{A}$	1/250	629 304	157 326	69 923	39 331
30 $\mu\text{A}$	1/167	943 955	235 989	104 884	58 997
40 $\mu\text{A}$	1/125	1 258 607	314 652	139 845	78 663
50 $\mu\text{A}$	1/100	1 573 259	393 315	174 807	98 329
5 mA		157 325 905	39 331 476	17 480 656	9 832 869

TABLEAU 4.3 – Flux de neutron incident en ( $\text{neutrons.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) pour des neutrons de 5,51 MeV en fonction de la distance entre le convertisseur et le détecteur et en fonction de l'intensité moyenne du faisceau d'ions.

A partir des données des tableaux 4.2 et 4.3, le temps de manipulation pour avoir 10 000 événements à 5,51 MeV pour les deux réactions d'intérêt est estimé.

Dans le tableau 4.4 (en page 133) sont représentés les temps (en heure et en unité de temps UT) de manipulation estimé pour le projet SCALP pour la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ . Ces temps dépendent fortement de l'intensité moyenne du faisceau d'ions et de la section efficace de la réaction évaluée par ENDF.

A une distance entre le convertisseur et le détecteur à 5 m (objectif du projet SCALP), les temps de manipulations estimés (en unité de temps) sont compris entre  $0,75 \pm 0,06$  UT et  $5,56 \pm 0,46$  UT, temps de manipulation compatibles avec des expériences sur la ligne de faisceau NFS.

Pour une distance de 10 m, ces estimations sont comprises entre  $2,99 \pm 0,25$  UT et  $22,24 \pm 1,84$  UT, à 15 m entre  $6,72 \pm 0,56$  UT et  $50,05 \pm 4,15$  UT (soit plus de 16 jours de temps de faisceau), et à 20 m entre  $11,94 \pm 0,99$  UT et  $88,97 \pm 7,39$  UT (soit presque un mois de temps de faisceau). En fonction de l'intensité moyenne du faisceau d'ions (donc du choper utilisé), certaines distances sont inutilisables.

Le tableau 4.5 (en page 134) liste les estimations faites sur la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  pour les deux gaz étudiés. La section efficace de la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  étant bien plus importante que celle de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  à 5,51 MeV, et le nombre d'atomes cibles  $^{19}\text{F}$  plus important que le nombre d'atomes cibles  $^{16}\text{O}$ , les temps estimés sur la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  sont plus faibles : les temps estimés sont de l'ordre de la seconde (contrairement aux temps estimés pour la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ ). Les estimations maximales (à faible intensité et grande distance) sont de l'ordre de 600 s, soit 10 min.

Distance	Intensité ( $\mu\text{A}$ )	ENDF/B-VII.1		ENDF/B-VIII.B3	
		Temps ( h )	Temps (UT)	Temps ( h )	Temps (UT)
5 m	10	44,49 $\pm$ 3,68	5,56 $\pm$ 0,46	29,86 $\pm$ 2,47	3,73 $\pm$ 0,31
	20	22,24 $\pm$ 1,84	2,78 $\pm$ 0,23	14,93 $\pm$ 1,24	1,87 $\pm$ 0,15
	30	14,83 $\pm$ 1,23	1,85 $\pm$ 0,15	9,95 $\pm$ 0,82	1,24 $\pm$ 0,10
	40	11,12 $\pm$ 0,92	1,39 $\pm$ 0,12	7,47 $\pm$ 0,62	0,93 $\pm$ 0,08
	50	8,90 $\pm$ 0,74	1,11 $\pm$ 0,09	5,97 $\pm$ 0,49	0,75 $\pm$ 0,06
10 m	10	77,94 $\pm$ 14,74	22,24 $\pm$ 1,84	119,44 $\pm$ 9,89	14,93 $\pm$ 1,24
	20	88,97 $\pm$ 7,36	11,12 $\pm$ 0,92	59,72 $\pm$ 4,94	7,47 $\pm$ 0,62
	30	59,31 $\pm$ 4,91	7,41 $\pm$ 0,61	39,81 $\pm$ 3,30	4,98 $\pm$ 0,41
	40	44,49 $\pm$ 3,68	5,56 $\pm$ 0,46	29,86 $\pm$ 2,47	3,73 $\pm$ 0,31
	50	35,59 $\pm$ 2,95	4,45 $\pm$ 0,37	23,89 $\pm$ 1,98	2,99 $\pm$ 0,25
15 m	10	400,37 $\pm$ 33,20	50,05 $\pm$ 4,15	268,74 $\pm$ 22,28	33,59 $\pm$ 2,79
	20	200,18 $\pm$ 16,58	25,02 $\pm$ 2,07	134,37 $\pm$ 11,13	16,80 $\pm$ 1,39
	30	133,46 $\pm$ 11,05	16,68 $\pm$ 1,38	89,58 $\pm$ 7,42	11,20 $\pm$ 0,93
	40	100,09 $\pm$ 8,29	12,51 $\pm$ 1,04	67,19 $\pm$ 5,56	8,40 $\pm$ 0,70
	50	80,07 $\pm$ 6,63	10,01 $\pm$ 0,83	53,75 $\pm$ 4,45	6,72 $\pm$ 0,56
20 m	10	711,76 $\pm$ 59,11	88,97 $\pm$ 7,39	477,76 $\pm$ 39,68	59,72 $\pm$ 4,96
	20	355,88 $\pm$ 29,50	44,49 $\pm$ 3,69	238,88 $\pm$ 19,80	29,86 $\pm$ 2,48
	30	237,25 $\pm$ 19,65	29,66 $\pm$ 2,46	159,25 $\pm$ 13,19	19,91 $\pm$ 1,65
	40	177,94 $\pm$ 14,74	22,24 $\pm$ 1,84	119,44 $\pm$ 9,89	14,93 $\pm$ 1,24
	50	142,35 $\pm$ 11,79	17,79 $\pm$ 1,47	95,55 $\pm$ 7,91	11,94 $\pm$ 0,99

TABLEAU 4.4 – Temps de manipulation estimé en heure et en temps UT (1 UT = 8 h) pour avoir 10 000 événements à 5,51 MeV sur la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  pour les bibliothèques ENDF/B-VII.1 et ENDF/B-VIII.B3, pour plusieurs intensités moyennes du faisceau d'ions et pour plusieurs distances entre le convertisseur et le détecteur.

Les deux tableaux (4.4 et 4.5) démontrent que les temps de manipulations sont très importants pour avoir suffisamment de statistiques permettant de mesurer les sections efficaces des réactions d'intérêts, en particulier la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ .

Ils sont estimés à moins de 10 min pour la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$ , et sur plusieurs unités de temps de faisceau pour la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ .

Les meilleures estimations sont déterminées pour une distance entre le détecteur et la sortie du convertisseur de 5 m. Cette distance est celle utilisée par le programme de simulation SICSIMULATION pour l'estimation du flux de neutrons incidents. Si le détecteur se trouve à une distance plus importante, les précisions (sur le flux de neutrons incidents, sur l'estimation des sections efficaces et sur le temps de manipulation) seront dégradées.

Distance	Intensité ( $\mu\text{A}$ )	Temps estimé ( s )	
		$\text{CF}_4$	97% $\text{CF}_4$ + 3% $\text{CO}_2$
5 m	10	$38,62 \pm 4,95$	$39,33 \pm 5,04$
	20	$19,31 \pm 2,47$	$19,67 \pm 2,52$
	30	$12,87 \pm 1,65$	$13,11 \pm 1,68$
	40	$9,65 \pm 1,24$	$9,83 \pm 1,26$
	50	$7,72 \pm 0,99$	$7,87 \pm 1,01$
10 m	10	$154,46 \pm 19,81$	$157,33 \pm 20,17$
	20	$77,23 \pm 9,90$	$78,66 \pm 10,08$
	30	$51,49 \pm 6,60$	$52,44 \pm 6,72$
	40	$38,62 \pm 4,95$	$39,33 \pm 5,04$
	50	$30,89 \pm 3,96$	$31,47 \pm 4,03$
15 m	10	$347,54 \pm 44,59$	$353,98 \pm 45,41$
	20	$173,77 \pm 22,28$	$176,99 \pm 22,70$
	30	$115,85 \pm 14,85$	$117,99 \pm 15,13$
	40	$86,88 \pm 11,14$	$88,50 \pm 11,35$
	50	$69,51 \pm 8,91$	$70,80 \pm 9,08$
20 m	10	$617,84 \pm 79,32$	$629,31 \pm 80,79$
	20	$308,92 \pm 39,63$	$314,65 \pm 40,36$
	30	$205,95 \pm 26,41$	$209,77 \pm 26,90$
	40	$154,46 \pm 19,81$	$157,33 \pm 20,17$
	50	$123,57 \pm 15,84$	$125,86 \pm 16,14$

TABLEAU 4.5 – Temps de manipulation estimé en seconde pour avoir 10 000 événements à 5,51 MeV sur la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  sur les deux gaz de réaction, pour plusieurs intensités moyennes du faisceau d'ions et pour plusieurs distances entre le convertisseur et le détecteur.

## 4.4 Conclusion du chapitre

Ce chapitre a introduit au lecteur les résultats attendus sur les performances du dispositif SCALP. Ces résultats ont été présentés en étudiant, pour deux gaz ( $\text{CF}_4$  et le mélange gazeux composé de 97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ ), les sections efficaces des deux réactions d'intérêts  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  et  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ .

Avec la méthode prévue pour déterminer l'énergie cinétique des neutrons incidents et la fonction d'excitation de ces deux réactions pour des énergies inférieures à 10 MeV, les précisions sur la section efficace (estimée) sont mauvaises : de l'ordre de 15% pour des hautes énergies (proches de 10 MeV), des erreurs beaucoup plus importantes pour des énergies proches des seuils en énergies. La normalisation utilisée (0,098 b à 8 MeV pour la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$ ) permet de déterminer des sections efficaces cohérentes avec les évaluations des bases de données nucléaires. Par contre, les erreurs relatives restent relativement importantes.

La résolution relative en énergie a également été déterminée pour chaque gaz étudié. L'énergie est dégradée, et ces résolutions sont estimées entre 3,5% et 6,5% pour les énergies simulées dans du  $\text{CF}_4$ , et entre 3,8% et 9,2% dans le mélange composé de 97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ , respectivement à basse et à haute énergie.

Les temps de manipulation ont été estimés pour avoir une erreur statistique d'1% pour des neutrons d'énergie 5,51 MeV. En fonction des intensités des faisceaux d'ions, les temps estimés permettent d'espérer bénéficier d'un temps de faisceau, auprès de la ligne NFS, nécessaire pour faire baisser les erreurs sur les fonctions d'excitation.

Ces résultats sont déterminés en plaçant le détecteur à 5 m du convertisseur à la sortie de la ligne de faisceau de neutrons. Les incertitudes augmentent si cette distance augmente. En gardant cette distance entre le détecteur et le convertisseur, plusieurs axes de recherche pour améliorer les précisions peuvent être proposées.

Une première proposition est d'augmenter la longueur de la chambre (et par conséquent la longueur du volume utile) et installer une seconde (voire une troisième) couronne de photo-multiplicateurs pour peut-être de collecter plus de quantité de lumière. Le fait d'augmenter la longueur de la chambre permettrait également d'augmenter le volume utile. Il faudrait aussi perfectionner la méthode de la détermination de l'énergie cinétique du neutron incident, pour améliorer les précisions.



# Conclusion générale et perspective

La conception d'un dispositif apte à la mesure de la section efficace microscopique des réactions nucléaires induites par neutron s'insère dans un vaste projet international de recherche pour l'amélioration des données nucléaires sous l'égide de la NEA.

Ce travail a présenté le projet SCALP avec lequel on se propose de mesurer la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  du seuil jusqu'à une énergie de 10 MeV. Cette demande répond aux souhaits de différents groupes de recherche de la NEA d'améliorer les connaissances sur certaines réactions utilisées dans les réacteurs nucléaires. La thèse présentée dans ce manuscrit débute le projet SCALP par les études en recherche et développement sur les performances d'une chambre d'ionisation scintillante qui sera ensuite utilisée auprès de la ligne de faisceau de neutrons NFS pour mesurer la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ , et également de la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  qui prendra lieu (à cause du  $\text{CF}_4$  qui est utilisée pour la scintillation).

Le premier chapitre de ce manuscrit a indiqué au lecteur le contexte scientifique dans lequel s'introduit le projet SCALP. La mesure de la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ , avec une bonne précision, a un intérêt dans l'amélioration des données nucléaires spécifiques principalement aux réacteurs utilisant du combustible à base d'oxydes et de l'eau comme modérateur ou caloporteur. La section efficace de la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  a également un intérêt concernant les réacteurs à sels fluorés. Le projet CIELO a demandé à la communauté scientifique spécialisée dans les données nucléaires de lancer des projets de recherches permettant d'améliorer les précisions de la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  : actuellement d'au maximum 30%, l'objectif étant d'avoir une précision à mieux que 10%.

Par le second chapitre, le projet SCALP a été exposé. Il consiste en le développement expérimental d'une chambre d'ionisation scintillante permettant la détection des particules chargées issues de réactions induites par neutron. Cette chambre est optimisée pour l'étude de la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  pour des neutrons d'énergie maximale de 10 MeV. Le dispositif expérimental est prévu pour être utilisé après la ligne de faisceau NFS à SPIRAL2 à GANIL. Le mélange de gaz contenant les atomes d'oxygène cibles a été définie à partir d'expériences en laboratoire : il est composé de 97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ . Le programme du projet SCALP a été présenté : tout d'abord des expériences contenant du gaz  $\text{CF}_4$  pur seront menées pour confirmer (ou infirmer) les performances attendues. La section efficace de la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  sera mesurée. Après un retour d'expérience, les mesures de section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  sera mesurée.

Le programme de simulation utilisé, appelé SICSIMULATION, dans ce projet a été introduit dans le troisième chapitre. En utilisant le programme de simulation GEANT4 basé sur un code de type Monte Carlo, les performances et caractéristiques du dispositif expéri-

---

mental sont présentées. Pour des neutrons incidents dont l'énergie est inférieure à 10 MeV, les deux réactions d'intérêts sont discriminées. Pour chaque réaction à une énergie donnée et pour un gaz étudié donné, différents paramètres sont récupérés des simulations : le nombre moyen de photo-électrons émis par photo-cathode, le CRT (qui correspond à la résolution en temps du dispositif), le volume utile (paramètre nécessaire pour estimer le nombre de noyaux cibles et par conséquent la section efficace).

Le quatrième chapitre présente les résultats des simulations pour les réactions d'intérêts  $^{19}\text{F}(\text{n},\alpha)^{16}\text{N}$  et  $^{16}\text{O}(\text{n},\alpha)^{13}\text{C}$ . Pour des neutrons d'énergie comprises entre 0 et 10 MeV, les efficacités de réactions diminuent plus l'énergie cinétique de la particule incidente augmente et sont déterminées à au moins 91,5% pour les deux réactions d'intérêts. Le volume utile est compris entre 172 et 252 cm<sup>3</sup> pour la réaction  $^{19}\text{F}(\text{n},\alpha)^{16}\text{N}$  et de 187 et 254 cm<sup>3</sup> pour la réaction  $^{16}\text{O}(\text{n},\alpha)^{13}\text{C}$  dans le mélange gazeux composé de 97% de CF<sub>4</sub> et 3% de CO<sub>2</sub>. Pour un gaz CF<sub>4</sub> pur, le volume utile estimé pour la réaction  $^{19}\text{F}(\text{n},\alpha)^{16}\text{N}$  est proche de celui estimé dans le mélange gazeux. Le nombre de photo-électrons émis par photo-cathode augmente plus l'énergie du neutron incident augmente. Il est maximum de 42 photo-électrons émis pour le gaz pur. Par contre, avec le mélange gazeux, le nombre diminue drastiquement (moins de 20 photo-électrons émis). Les valeurs des CRT diminuent plus l'énergie cinétique du neutron incident augmente. Pour la réaction  $^{19}\text{F}(\text{n},\alpha)^{16}\text{N}$  ces valeurs sont estimées entre 330 et 845 ps dans du CF<sub>4</sub> et de 553 à 818 ps pour le mélange gazeux. Pour la réaction  $^{16}\text{O}(\text{n},\alpha)^{13}\text{C}$  ces valeurs sont comprises entre 548 et 786 ps. L'énergie cinétique des neutrons incidents ne peut pas être déterminée directement. C'est à partir de la détection des réactions nucléaires ayant lieu que l'énergie du neutron peut être déterminée. La base de vol se calculant à partir du milieu de la chambre d'ionisation, les résolutions relatives en énergies ne sont pas importantes : entre 3,5% et 6,5% pour les énergies simulées dans du CF<sub>4</sub>, et entre 3,8% et 9,2% dans le mélange composé de 97% de CF<sub>4</sub> et 3% de CO<sub>2</sub>, respectivement à basse et à haute énergie.

Les sections efficaces et leurs précisions ont également été déterminées. En utilisant une auto-normalisation (à partir de la fonction d'excitation de la réaction  $^{19}\text{F}(\text{n},\alpha)^{16}\text{N}$  à 8 MeV), les sections efficaces des réactions d'intérêts  $^{19}\text{F}(\text{n},\alpha)^{16}\text{N}$  et  $^{16}\text{O}(\text{n},\alpha)^{13}\text{C}$  ont été estimées, et comparées avec les évaluations de données nucléaires utilisées par le programme de simulation. Les précisions sur ces sections efficaces sont estimées à 15% pour des hautes énergies, de 38 à 72% pour des énergies proches du seuil des deux réactions. Ces résultats montrent que le dispositif expérimental doit être perfectionné pour diminuer ces incertitudes.

Ces performances devront être améliorées après les premiers retours d'expérience et avant les mesures auprès de la ligne de faisceau de neutrons. Le spectre énergétique des neutrons issus de cette installation est étendu (de 100 keV à 40 MeV). Ceci implique donc de nombreuses possibilités dans les améliorations du dispositif expérimental SCALP.

Le dispositif expérimental est optimisé pour fonctionner avec quatre photo-multiplicateurs et pour des neutrons d'énergie inférieures à 10 MeV. Au delà de cette énergie, les signaux issus des réactions  $^{19}\text{F}(\text{n},\alpha)^{16}\text{N}$  et  $^{16}\text{O}(\text{n},\alpha)^{13}\text{C}$  ne sont pas différentiables. L'ajout d'une deuxième couronne de quatre photo-multiplicateurs est une solution. A cause des angles solides, le fait d'avoir une seule couronne de quatre photo-multiplicateurs (dont le diamètre des fenêtres de quartz sont de 50 mm) ne permet pas d'avoir une longue chambre. L'ajout d'une autre couronne permettrait d'augmenter la longueur de la chambre tout en récupérant le maximum de photons lumineux grâce aux huit photo-multiplicateurs.

---

A contrario cette solution impliquerait un coût supplémentaire (achat de quatre autres photo-multiplicateurs).

L'utilisation du  $\text{CF}_4$  comme gaz de scintillation a été utilisé pour d'autres projets par les équipes de recherche du LPC. L'expérience du personnel du laboratoire dans l'utilisation de ce gaz pour des études de scintillation est donc intéressante. Néanmoins, le choix d'un autre gaz scintillant pourrait permettre d'améliorer les performances. Ceci impliquera par contre de nouvelles études de mélange de gaz en laboratoire, et très probablement une construction d'une autre chambre d'ionisation scintillante (ce qui augmentera le temps de recherche et développement du projet, ainsi que le coût de fabrication).

L'auto-normalisation a été choisie à partir de la valeur de la section efficace évaluée des bases de données nucléaires de la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  à 8 MeV. Les événements des réactions (n,p), (n,d) et (n,t) ne déposent pas correctement leurs énergies (sauf pour des énergies proches du seuil) : la réaction utilisée pour la normalisation doit être une réaction (n, $\alpha$ ). C'est pourquoi la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  est choisie. Le choix d'une autre réaction (si possible (n, $\alpha$ )) est problématique : la réaction  $^{12}\text{C}(n,\alpha)^9\text{Be}$  n'est pas discernable de la réaction  $^{19}\text{F}(n,d)^{18}\text{O}$ , et la normalisation ne peut pas utiliser la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  (dont l'estimation de la section efficace est le but du projet SCALP). Néanmoins, si la chambre est redimensionnée pour permettre la discrimination des deux réactions  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  et  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  jusqu'à 20 MeV, d'autres points de normalisation peuvent être utilisés.

Les résolutions en énergie peuvent être améliorées en utilisant une autre méthode pour la détermination de l'énergie cinétique des neutrons incidents. Ces derniers sont, dans ce projet, déterminés en prenant comme base de vol la distance entre la sortie du convertisseur (au bout de la ligne de faisceau de neutrons) et le milieu de la chambre d'ionisation (pas de localisation). Par conséquent, la détermination de l'énergie cinétique des neutrons incidents est dégradée. Ce qui implique de mauvaises résolutions en énergie.

**Ceci conclut le manuscrit de thèse présentant les études (en recherche et développement) de la construction de la chambre d'ionisation scintillante du projet SCALP et de la faisabilité des mesures expérimentales prévues. Dans l'état actuel du projet, la mesure de la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  est possible, mais les précisions attendues sont supérieures à celles demandées par la NEA. Le retour d'expérience après les tests en laboratoire et les premières mesures expérimentales permettront de définir d'autres axes de recherche pour améliorer le dispositif expérimental.**



# Annexe A

## Annexes du chapitre 1

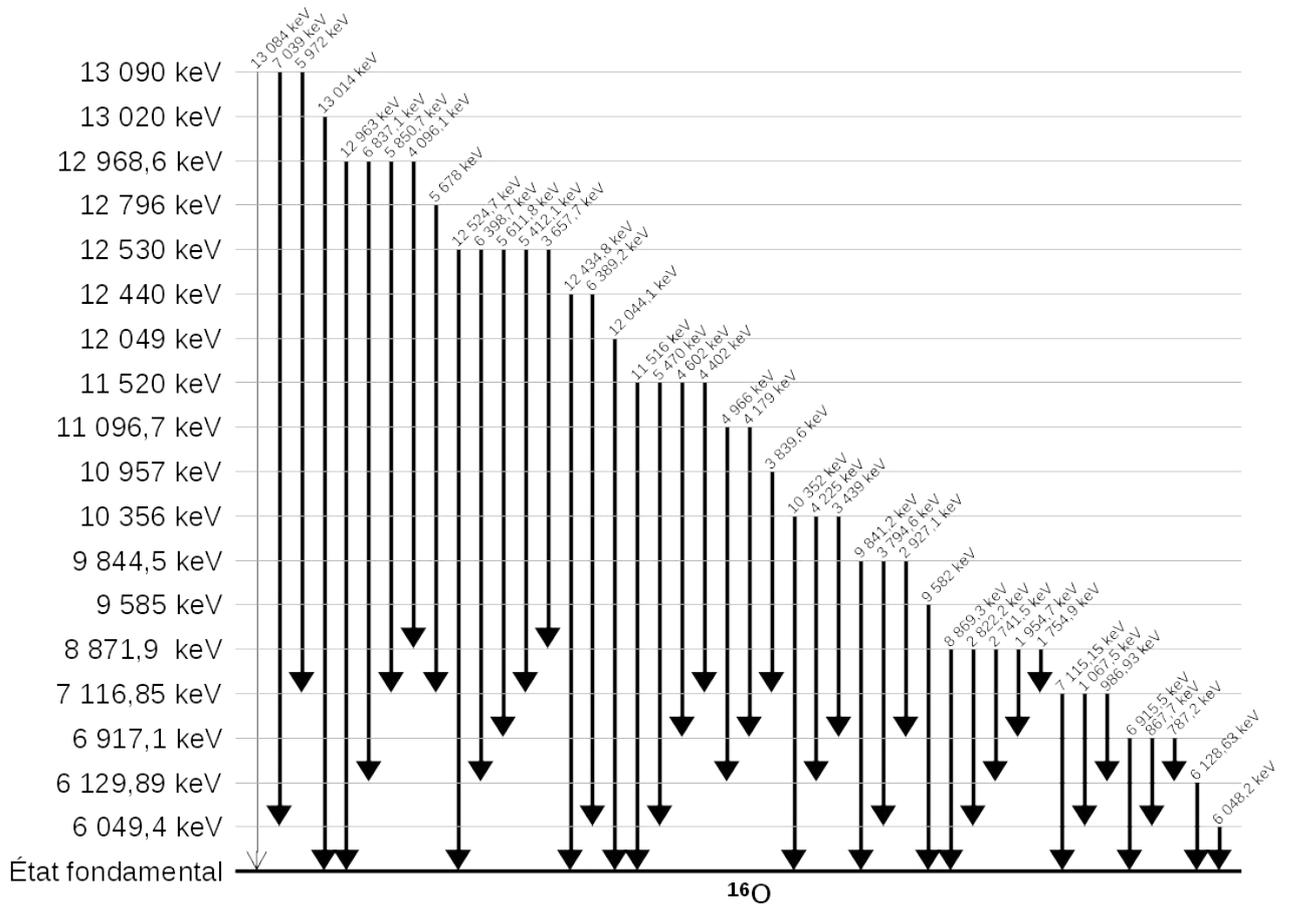


FIGURE A.1 – Schéma des principaux états excités du  $^{16}\text{O}$  et des photons  $\gamma$  émis lors de la désexcitation.

Énergie ( keV)	Énergie ( keV)	Énergie ( keV)	Énergie ( keV)	Énergie ( keV)
0,0 ± 0,0	4584,6 ± 3,0	5810,1 ± 0,4	6693,4 ± 0,6	9010,0 ± 0,0
656,02 ± 0,03	4591,72 ± 0,07	5936,13 ± 0,03	6766,1 ± 0,9	9200,0 ± 0,0
822,73 ± 0,03	4722,0 ± 12,0	5939,1 ± 0,1	6825,0 ± 5,0	9520,0 ± 0,0
983,59 ± 0,03	4731,2 ± 2,9	5951,0 ± 4,0	6856,7 ± 1,0	9650,0 ± 0,0
1056,848 ± 0,004	4744,0 ± 12,0	6007,0 ± 14,0	6905,0 ± 8,0	9830,0 ± 0,0
1309,19 ± 0,03	4764,8 ± 2,7	6017,78 ± 0,03	6936,0 ± 4,0	9850,0 ± 0,0
1823,8 ± 1,6	4892,76 ± 0,17	6044,98 ± 0,08	6967,8 ± 1,0	9886,0 ± 10,0
1843,8 ± 0,03	4899,4 ± 2,8	6065,0 ± 14,0	7067,0 ± 1,2	9900,0 ± 0,0
1970,83 ± 0,04	5041,5 ± 3,1	6079,0 ± 14,0	7080,0 ± 0,0	9929,0 ± 10,0
2043,98 ± 0,03	5066,8 ± 3,1	6095,0 ± 14,0	7166,0 ± 2,0	9981,0 ± 10,0
2194,3 ± 0,03	5130,0 ± 3,0	6111,0 ± 14,0	7232,0 ± 7,0	10024,0 ± 10,0
2864,86 ± 0,1	5226,1 ± 0,4	6136,0 ± 14,0	7283,0 ± 4,0	10100,0 ± 50,0
2966,11 ± 0,03	5255,0 ± 15,0	6154,0 ± 14,0	7319,0 ± 8,0	10228,0 ± 10,0
2968,0 ± 1,5	5282,79 ± 0,17	6189,0 ± 14,0	7370,0 ± 20,0	10480,0 ± 10,0
3171,69 ± 0,14	5319,17 ± 0,04	6213,0 ± 14,0	7420,0 ± 20,0	10641,0 ± 10,0
3488,41 ± 0,03	5346,1 ± 3,3	6251,0 ± 14,0	7495,0 ± 5,0	10807,0 ± 10,0
3526,31 ± 0,04	5352,0 ± 3,0	6287,0 ± 14,0	7655,0 ± 5,0	10990,0 ± 0,0
3586,54 ± 0,03	5407,0 ± 3,0	6299,1 ± 0,3	7734,0 ± 6,0	11045,0 ± 10,0
3589,8 ± 0,04	5452,1 ± 3,8	6335,0 ± 14,0	7843,0 ± 11,0	11130,0 ± 10,0
3669,0 ± 3,0	5457,2 ± 3,2	6355,0 ± 14,0	7985,0 ± 4,0	11244,0 ± 10,0
3680,17 ± 0,04	5465,89 ± 0,17	6391,0 ± 14,0	8050,0 ± 100,0	11287,0 ± 10,0
3761,0 ± 2,0	5555,34 ± 0,04	6413,0 ± 14,0	8062,0 ± 8,0	11490,0 ± 50,0
3965,07 ± 0,04	5574,0 ± 6,0	6444,0 ± 14,0	8113,0 ± 4,0	12000,0 ± 0,0
4082,17 ± 0,04	5588,0 ± 2,0	6458,0 ± 14,0	8147,0 ± 6,0	12200,0 ± 100,0
4199,3 ± 2,7	5623,13 ± 0,06	6481,0 ± 14,0	8268,0 ± 12,0	12400,0 ± 0,0
4208,1 ± 2,6	5645,0 ± 12,0	6509,0 ± 14,0	8349,0 ± 4,0	12700,0 ± 0,0
4277,09 ± 0,04	5661,0 ± 12,0	6519,0 ± 3,0	8421,0 ± 0,0	13200,0 ± 0,0
4312,0 ± 2,6	5710,0 ± 6,0	6578,0 ± 14,0	8500,0 ± 0,0	13700,0 ± 0,0
4371,47 ± 0,11	5725,0 ± 10,0	6627,0 ± 0,3	8720,0 ± 0,0	14000,0 ± 0,0
4509,0 ± 3,0	5764,9 ± 3,4	6642,6 ± 0,3	8770,0 ± 0,0	
4518,0 ± 4,0	5795,0 ± 14,0	6647,5 ± 0,4	8940,0 ± 0,0	

TABLEAU A.1 – États excités du noyau  $^{20}\text{F}$

Énergie ( keV)	Énergie ( keV)	Énergie ( keV)	Énergie ( keV)	Énergie ( keV)
0,0 ± 0,0	6926,5 ± 1,7	9318,0 ± 2,0	10975,0 ± 2,5	14240,0 ± 15,0
109,894 ± 0,005	6989,0 ± 3,0	9321,0 ± 1,1	10989,0 ± 2,5	14255,0 ± 15,0
197,143 ± 0,004	7114,0 ± 6,0	9329,0 ± 4,0	11072,0 ± 2,7	14330,0 ± 20,0
1345,67 ± 0,13	7166,2 ± 0,7	9509,0 ± 4,0	11188,0 ± 4,0	14352,0 ± 10,0
1458,7 ± 0,3	7262,0 ± 2,0	9527,0 ± 6,0	11273,0 ± 3,0	14460,0 ± 25,0
1554,038 ± 0,009	7364,0 ± 4,0	9536,4 ± 2,0	11286,0 ± 7,0	14460,0 ± 25,0
2779,849 ± 0,034	7539,6 ± 0,9	9566,0 ± 3,0	11350,0 ± 25,0	14700,0 ± 20,0
3908,17 ± 0,2	7560,0 ± 10,0	9575,0 ± 4,0	11450,0 ± 3,5	14720,0 ± 70,0
3998,7 ± 0,7	7587,0 ± 0,0	9586,0 ± 3,0	11478,0 ± 5,0	14740,0 ± 50,0
4032,5 ± 1,2	7660,6 ± 0,9	9642,0 ± 6,0	11502,0 ± 5,0	14780,0 ± 20,0
4377,7 ± 0,042	7702,0 ± 5,0	9654,0 ± 6,0	11540,0 ± 7,0	14920,0 ± 30,0
4549,9 ± 0,8	7740,0 ± 40,0	9667,5 ± 1,5	11569,0 ± 7,0	15000,0 ± 20,0
4556,1 ± 0,5	7900,0 ± 0,0	9710,0 ± 4,0	11603,0 ± 12,0	15360,0 ± 20,0
4648,0 ± 1,0	7929,0 ± 3,0	9820,0 ± 1,0	11653,0 ± 4,0	15400,0 ± 30,0
4682,5 ± 0,7	7937,0 ± 3,0	9834,0 ± 3,0	11840,0 ± 10,0	15560,0 ± 30,0
5106,6 ± 0,9	8014,0 ± 1,0	9874,0 ± 1,8	11930,0 ± 10,0	15770,0 ± 21,0
5337,0 ± 2,0	8084,0 ± 3,0	9887,0 ± 3,0	12040,0 ± 20,0	16090,0 ± 50,0
5418,0 ± 1,0	8137,7 ± 1,2	9895,0 ± 5,0	12136,0 ± 8,0	16200,0 ± 40,0
5463,5 ± 1,5	8160,0 ± 0,0	9926,0 ± 3,0	12222,0 ± 12,0	16230,0 ± 30,0
5500,7 ± 1,7	8199,0 ± 1,0	10088,0 ± 5,0	12522,0 ± 7,0	16280,0 ± 20,0
5535,0 ± 2,0	8254,3 ± 2,6	10137,0 ± 8,0	12577,0 ± 10,0	16450,0 ± 50,0
5621,0 ± 1,0	8288,0 ± 2,0	10162,0 ± 3,0	12580,0 ± 25,0	16800,0 ± 30,0
5938,0 ± 1,0	8310,0 ± 1,2	10232,0 ± 3,0	12780,0 ± 10,0	17050,0 ± 40,0
6070,0 ± 1,0	8370,0 ± 4,0	10254,0 ± 3,0	12860,0 ± 30,0	17160,0 ± 40,0
6088,0 ± 1,0	8583,5 ± 1,6	10308,0 ± 4,0	12940,0 ± 25,0	17450,0 ± 30,0
6100,0 ± 2,0	8591,9 ± 1,0	10365,0 ± 4,0	12980,0 ± 50,0	17650,0 ± 60,0
6160,6 ± 0,9	8629,0 ± 4,0	10411,0 ± 3,0	13068,0 ± 4,0	17930,0 ± 40,0
6255,0 ± 1,0	8650,0 ± 0,0	10469,0 ± 4,0	13090,0 ± 75,0	18030,0 ± 60,0
6282,0 ± 2,0	8793,2 ± 1,5	10488,0 ± 4,0	13170,0 ± 15,0	18920,0 ± 30,0
6330,0 ± 2,0	8864,0 ± 4,0	10496,3 ± 1,3	13245,0 ± 10,0	19070,0 ± 60,0
6429,0 ± 8,0	8926,7 ± 2,8	10521,0 ± 4,0	13270,0 ± 10,0	19830,0 ± 150,0
6496,7 ± 1,4	8953,0 ± 3,0	10542,3 ± 1,1	13317,0 ± 8,0	19890,0 ± 30,0
6500,0 ± 0,9	9030,0 ± 5,0	10555,0 ± 3,0	13360,0 ± 25,0	20810,0 ± 50,0
6527,5 ± 1,4	9099,7 ± 0,7	10564,7 ± 2,0	13532,0 ± 10,0	20930,0 ± 50,0
6554,0 ± 2,0	9101,0 ± 4,0	10581,0 ± 4,0	13732,0 ± 11,0	21050,0 ± 40,0
6592,0 ± 2,0	9167,0 ± 1,4	10614,3 ± 1,6	13878,0 ± 15,0	
6787,0 ± 2,0	9204,0 ± 7,0	10763,3 ± 2,5	14040,0 ± 20,0	
6838,4 ± 0,9	9267,0 ± 4,0	10859,7 ± 1,9	14100,0 ± 21,0	
6891,0 ± 4,0	9280,0 ± 5,0	10927,0 ± 8,0	14147,0 ± 20,0	

TABLEAU A.2 – États excités du noyau  $^{19}\text{F}$



# Annexe B

## Annexes du chapitre 2

Mélange gazeux CF <sub>4</sub> /He			Mélange gazeux CF <sub>4</sub> /CO <sub>2</sub>		
Pression ( mbar)	<npe>		Pression ( mbar)	<npe>	
	PM n° 1	PM n° 2		PM n° 1	PM n° 2
0	83,8 ± 1,7	104,8 ± 2,1	0	86,7 ± 1,7	104,5 ± 2,1
8,6	83,4 ± 1,7	98,1 ± 2,0	9,4	53,0 ± 1,1	63,3 ± 1,3
14	75,3 ± 1,5	91,3 ± 1,8	14,6	48,3 ± 1,0	58,1 ± 1,2
19,5	82,0 ± 1,6	96,7 ± 1,9	19,7	37,1 ± 0,7	44,3 ± 0,9
			24,8	39,1 ± 0,8	47,3 ± 0,9
29,6	75,4 ± 1,5	92,5 ± 1,9	29,8	37,4 ± 0,7	44,7 ± 0,9
			34,9	35,7 ± 0,7	43,1 ± 0,9
39,7	70,3 ± 1,4	84,7 ± 1,7	39,9	29,7 ± 0,6	35,7 ± 0,7
			44,9	30,7 ± 0,6	36,0 ± 0,7
49,8	60,1 ± 1,2	70,8 ± 1,4	49,9	30,6 ± 0,6	36,1 ± 0,7
			54,9	29,2 ± 0,6	34,8 ± 0,7
59,9	58,8 ± 1,2	70,6 ± 1,4	59,9	26,8 ± 0,5	31,6 ± 0,6
			64,9	26,9 ± 0,5	31,8 ± 0,6
69,9	60,8 ± 1,2	73,8 ± 1,5	69,9	25,4 ± 0,5	29,9 ± 0,6
74,9	56,1 ± 1,1	66,8 ± 1,3	74,9	24,6 ± 0,5	29,1 ± 0,6
79,9	61,6 ± 1,2	75,1 ± 1,5	79,9	23,7 ± 0,5	28,1 ± 0,6
			84,9	23,6 ± 0,5	27,8 ± 0,6
90	58,3 ± 1,2	72,0 ± 1,4	89,9	22,7 ± 0,5	27,4 ± 0,5
			94,9	21,9 ± 0,4	26,1 ± 0,5
100	57,3 ± 1,1	69,8 ± 1,4	99,9	19,7 ± 0,4	23,2 ± 0,5

TABLEAU B.1 – Nombre moyen de photo-électrons pour chaque mélange gazeux étudié. La colonne "Pression" se réfère à la pression absolue du gaz minoritaire (He et CO<sub>2</sub>).

Mélange gazeux	Courbe	Paramètres		
		[0]	[1]	$\chi^2/ndl$
CF <sub>4</sub> /He	Simulation	105,30 ± 0,24	5,03 ± 0,06	1,197 32/ 9
CF <sub>4</sub> /He	PMn° 1	84,49 ± 0,97	5,62 ± 0,28	
CF <sub>4</sub> /He	PMn° 2	101,85 ± 1,18	5,63 ± 0,29	
CF <sub>4</sub> /CO <sub>2</sub>	Simulation	105,43 ± 0,23	35,70 ± 0,19	
CF <sub>4</sub> /CO <sub>2</sub>	PMn° 1	63,46 ± 0,95	22,14 ± 0,65	
CF <sub>4</sub> /CO <sub>2</sub>	PMn° 2	76,83 ± 1,17	22,84 ± 0,67	

TABLEAU B.2 – Ajustement des courbes présentées dans les figures 2.7 et 2.8 à partir d’une fonction de la forme  $y = \frac{[0]}{1+[1].x}$ , où [0] et [1] correspondent respectivement à  $\langle npe_0 \rangle$  et  $K$  (voir l’équation 2.1). Les valeurs du  $\chi^2/ndl$  ne sont déterminées que pour les valeurs issues des simulations.

Pression ( mbar)		Masse volumique ( mg/cm <sup>-3</sup> )	Composition massique (%)		
CF <sub>4</sub>	<sup>3</sup> He		<sup>19</sup> F	natC	<sup>3</sup> He
1000	0	3, 7238	86, 3519	13, 6481	
990	10	3, 6882	86, 3122	13, 6419	0, 0459
980	20	3, 6527	86, 2718	13, 6355	0, 0927
970	30	3, 6171	86, 2306	13, 6290	0, 1405
960	40	3, 5816	86, 1885	13, 6223	0, 1891
950	50	3, 5461	86, 1456	13, 6156	0, 2388
940	60	3, 5105	86, 1019	13, 6086	0, 2895
930	70	3, 4750	86, 0572	13, 6016	0, 3412
920	80	3, 4394	86, 0117	13, 5944	0, 3939
910	90	3, 4039	85, 9652	13, 5870	0, 4478
900	100	3, 3683	85, 9177	13, 5795	0, 5028

TABLEAU B.3 – Constantes physiques utilisées par le programme SICSIMULATION pour chaque mélange gazeux.

Pression ( mbar)		Masse volumique ( mg/cm <sup>-3</sup> )	Composition massique (%)		
CF <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>		<sup>19</sup> F	natC	natO
1000	0	3,7238	86,3519	13,6481	
990	10	3,7052	85,9179	13,7167	0,3654
980	20	3,6865	85,4797	13,7860	0,7346
970	30	3,6679	85,0366	13,8560	1,1074
960	40	3,6493	84,5893	13,9266	1,4841
950	50	3,6307	84,1373	13,9981	1,8646
940	60	3,6121	83,6807	14,0702	2,2491
930	70	3,5935	83,2194	14,1431	2,6375
920	80	3,5749	82,7533	14,2167	3,0300
910	90	3,5562	82,2823	14,2911	3,4266
900	100	3,5376	81,8063	14,3663	3,8274

TABLEAU B.4 – Constantes physiques utilisées par le programme SICSIMULATION pour chaque mélange gazeux.

Fraction du gaz désactivateur	CF <sub>4</sub> /He			CF <sub>4</sub> /CO <sub>2</sub>		
	EXP	SIM	écart	EXP	SIM	écart
0	101,85	105,30	+ <b>3,39%</b>	76,83	105,43	+ <b>37,23%</b>
0,01	96,42	100,26	+ <b>3,98%</b>	62,54	77,69	+ <b>24,22%</b>
0,02	91,54	95,68	+ <b>4,51%</b>	52,74	61,51	+ <b>16,63%</b>
0,03	87,13	91,49	+ <b>5,00%</b>	45,59	50,91	+ <b>11,66%</b>
0,04	83,13	87,66	+ <b>5,45%</b>	40,15	43,42	+ <b>8,15%</b>
0,05	79,48	84,14	+ <b>5,87%</b>	35,87	37,86	+ <b>5,54%</b>
0,06	76,13	80,89	+ <b>6,25%</b>	32,41	33,56	+ <b>3,53%</b>
0,07	73,06	77,88	+ <b>6,60%</b>	29,56	30,13	+ <b>1,92%</b>
0,08	70,22	75,09	+ <b>6,93%</b>	27,18	27,34	+ <b>0,61%</b>
0,09	67,60	72,49	+ <b>7,23%</b>	25,14	25,02	- <b>0,47%</b>
0,1	65,16	70,06	+ <b>7,51%</b>	23,40	23,07	- <b>1,39%</b>

TABLEAU B.5 – Estimation des valeurs du nombre moyen de photo-électron (par le modèle de Stern-Volmer) pour différentes fraction de gaz désactivateur pour les deux gaz étudiés, à partir des données expérimentales (colonnes "EXP") et à partir des données issues des simulations (colonnes "SIM"). Les colonnes "écart" indiquent les écarts en pourcentage entre les estimations faites à partir des données expérimentales et les estimations faites à partir des données issues des simulations.

---

Réaction Paramètres	CF <sub>4</sub> /CO <sub>2</sub>		CF <sub>4</sub> /He	
	Simulation	Expérience	Simulation	Expérience
[0]	0,446591	0,445483	0,446165	0,446436
[1]	0,239881	0,170374	-0,00650916	-0,0514672
[2]	-0.00651184	0,831345	-0,000667147	0,513603

TABLEAU B.6 – Ajustement des courbes présentées dans la figure 2.9 avec une fonction polynomial de degré 2 de la forme  $y = [0] + [1]x + [2]x^2$ .

## Annexe C

### Annexes sur le chapitre 4

$En$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,p)$ ( mm)	$^{19}\text{F}(n,d)$ ( mm)	$^{19}\text{F}(n,t)$ ( mm)	$^{19}\text{F}(n,\alpha)$ ( mm)	$^{12}\text{C}(n,\alpha)$ ( mm)
1,8				$2,47 \times 10^{-2}$	
2				$-7,02 \times 10^{-4}$	
2,2				$7,49 \times 10^{-3}$	
2,4				$2,14 \times 10^{-2}$	
2,6				$4,88 \times 10^{-2}$	
2,8				$-2,60 \times 10^{-2}$	
3				$2,81 \times 10^{-2}$	
3,2				$7,18 \times 10^{-3}$	
3,4				$-1,35 \times 10^{-3}$	
3,6				$5,29 \times 10^{-3}$	
3,8				$7,39 \times 10^{-3}$	
4				$1,15 \times 10^{-2}$	
4,2				$2,30 \times 10^{-2}$	
4,4	$2,22 \times 10^{-2}$			$-2,29 \times 10^{-2}$	
4,6	$-1,60 \times 10^{-2}$			$-5,66 \times 10^{-3}$	
4,8	$8,14 \times 10^{-3}$			$1,60 \times 10^{-2}$	
5	$1,19 \times 10^{-2}$			$-8,51 \times 10^{-3}$	
5,2	$-2,62 \times 10^{-3}$			$4,86 \times 10^{-3}$	
5,4	$-7,68 \times 10^{-3}$			$7,78 \times 10^{-3}$	
5,6	$-1,44 \times 10^{-3}$			$-2,51 \times 10^{-2}$	
5,8	$-6,86 \times 10^{-3}$			$1,21 \times 10^{-2}$	
6	$-2,97 \times 10^{-3}$			$-1,50 \times 10^{-2}$	
6,2	$8,94 \times 10^{-3}$	$-2,72 \times 10^{-2}$		$3,11 \times 10^{-2}$	$2,69 \times 10^{-2}$
6,4	$6,55 \times 10^{-4}$	$8,85 \times 10^{-3}$		$-2,26 \times 10^{-2}$	$4,64 \times 10^{-3}$
6,6	$-1,79 \times 10^{-2}$	$7,86 \times 10^{-3}$		$-1,78 \times 10^{-2}$	$3,05 \times 10^{-2}$
6,8	$2,32 \times 10^{-2}$	$-2,18 \times 10^{-2}$		$-1,66 \times 10^{-2}$	$1,83 \times 10^{-4}$
7	$1,07 \times 10^{-3}$	$-3,77 \times 10^{-3}$		$-1,29 \times 10^{-2}$	$-2,26 \times 10^{-2}$
7,2	$7,42 \times 10^{-3}$	$2,06 \times 10^{-2}$		$1,02 \times 10^{-3}$	$2,00 \times 10^{-2}$
7,4	$-1,16 \times 10^{-2}$	$1,78 \times 10^{-2}$		$1,77 \times 10^{-2}$	$-2,70 \times 10^{-2}$
7,6	$5,06 \times 10^{-3}$	$1,65 \times 10^{-3}$		$4,00 \times 10^{-3}$	$-2,22 \times 10^{-2}$
7,8	$-2,18 \times 10^{-2}$	$1,93 \times 10^{-2}$		$-7,02 \times 10^{-3}$	$6,87 \times 10^{-3}$
8	$4,47 \times 10^{-2}$	$4,02 \times 10^{-2}$	$3,69 \times 10^{-3}$	$2,80 \times 10^{-2}$	$1,21 \times 10^{-2}$
8,2	$-1,62 \times 10^{-3}$	$-3,04 \times 10^{-2}$	$-1,51 \times 10^{-2}$	$2,44 \times 10^{-2}$	$2,14 \times 10^{-3}$
8,4	$1,42 \times 10^{-2}$	$-3,83 \times 10^{-3}$	$1,49 \times 10^{-2}$	$-1,71 \times 10^{-3}$	$-8,25 \times 10^{-3}$
8,6	$4,11 \times 10^{-3}$	$2,76 \times 10^{-4}$	$-2,25 \times 10^{-2}$	$-1,36 \times 10^{-2}$	$9,64 \times 10^{-3}$
8,8	$-2,04 \times 10^{-2}$	$-4,35 \times 10^{-3}$	$2,46 \times 10^{-2}$	$5,60 \times 10^{-2}$	$1,71 \times 10^{-2}$
9	$1,73 \times 10^{-2}$	$1,48 \times 10^{-2}$	$-9,00 \times 10^{-3}$	$1,69 \times 10^{-2}$	$-1,63 \times 10^{-2}$
9,2	$-5,97 \times 10^{-2}$	$1,04 \times 10^{-2}$	$2,30 \times 10^{-2}$	$2,54 \times 10^{-2}$	$-3,15 \times 10^{-3}$
9,4	$-2,74 \times 10^{-2}$	$8,03 \times 10^{-3}$	$1,51 \times 10^{-3}$	$2,38 \times 10^{-2}$	$1,20 \times 10^{-2}$
9,6	$1,11 \times 10^{-2}$	$3,25 \times 10^{-2}$	$-8,67 \times 10^{-3}$	$1,84 \times 10^{-2}$	$9,91 \times 10^{-3}$
9,8	$4,80 \times 10^{-2}$	$8,26 \times 10^{-3}$	$-9,67 \times 10^{-3}$	$-3,96 \times 10^{-2}$	$1,46 \times 10^{-2}$
10	$-4,67 \times 10^{-2}$	$1,91 \times 10^{-2}$	$3,79 \times 10^{-3}$	$6,93 \times 10^{-3}$	$1,28 \times 10^{-3}$

TABLEAU C.1 – Valeurs moyennes des coordonnées  $x_0$  pour les réactions simulés dans le  $\text{CF}_4$  pur.

$En$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,p)$ ( mm)	$^{19}\text{F}(n,d)$ ( mm)	$^{19}\text{F}(n,t)$ ( mm)	$^{19}\text{F}(n,\alpha)$ ( mm)	$^{12}\text{C}(n,\alpha)$ ( mm)	$^{16}\text{O}(n,\alpha)$ ( mm)
1,8				$3,59 \times 10^{-2}$		
2				$2,25 \times 10^{-3}$		
2,2				$-4,42 \times 10^{-3}$		
2,4				$2,54 \times 10^{-2}$		$9,71 \times 10^{-3}$
2,6				$6,23 \times 10^{-3}$		$3,13 \times 10^{-2}$
2,8				$-1,06 \times 10^{-2}$		$1,22 \times 10^{-2}$
3				$1,92 \times 10^{-3}$		$-9,38 \times 10^{-3}$
3,2				$1,07 \times 10^{-2}$		$9,04 \times 10^{-3}$
3,4				$2,89 \times 10^{-2}$		$3,19 \times 10^{-3}$
3,6				$-1,07 \times 10^{-2}$		$1,97 \times 10^{-2}$
3,8				$9,15 \times 10^{-3}$		$6,13 \times 10^{-3}$
4				$-3,08 \times 10^{-2}$		$6,58 \times 10^{-3}$
4,2				$7,19 \times 10^{-3}$		$-1,37 \times 10^{-2}$
4,4	$-3,56 \times 10^{-2}$			$1,02 \times 10^{-2}$		$-1,11 \times 10^{-2}$
4,6	$-3,35 \times 10^{-2}$			$3,24 \times 10^{-2}$		$-7,72 \times 10^{-3}$
4,8	$1,96 \times 10^{-2}$			$1,06 \times 10^{-2}$		$-5,43 \times 10^{-3}$
5	$-8,34 \times 10^{-3}$			$-9,05 \times 10^{-3}$		$3,15 \times 10^{-2}$
5,2	$-5,09 \times 10^{-3}$			$3,25 \times 10^{-2}$		$2,95 \times 10^{-2}$
5,4	$-2,01 \times 10^{-3}$			$-2,81 \times 10^{-2}$		$-3,51 \times 10^{-2}$
5,6	$8,63 \times 10^{-3}$			$-5,20 \times 10^{-3}$		$-2,48 \times 10^{-2}$
5,8	$2,03 \times 10^{-2}$			$1,04 \times 10^{-2}$		$-7,11 \times 10^{-3}$
6	$1,08 \times 10^{-2}$			$8,14 \times 10^{-3}$		$7,01 \times 10^{-3}$
6,2	$-2,17 \times 10^{-2}$	$1,98 \times 10^{-2}$		$-2,93 \times 10^{-3}$	$1,36 \times 10^{-2}$	$-1,01 \times 10^{-2}$
6,4	$-1,68 \times 10^{-2}$	$-1,01 \times 10^{-2}$		$2,52 \times 10^{-3}$	$-2,89 \times 10^{-2}$	$-9,65 \times 10^{-3}$
6,6	$-1,94 \times 10^{-2}$	$2,42 \times 10^{-2}$		$-9,28 \times 10^{-3}$	$2,12 \times 10^{-2}$	$-1,86 \times 10^{-2}$
6,8	$-3,61 \times 10^{-2}$	$9,10 \times 10^{-3}$		$1,71 \times 10^{-2}$	$1,68 \times 10^{-2}$	$2,33 \times 10^{-2}$
7	$2,24 \times 10^{-2}$	$7,03 \times 10^{-3}$		$5,35 \times 10^{-2}$	$-2,34 \times 10^{-2}$	$8,50 \times 10^{-3}$
7,2	$1,86 \times 10^{-2}$	$1,19 \times 10^{-2}$		$-1,03 \times 10^{-3}$	$-4,36 \times 10^{-2}$	$1,91 \times 10^{-2}$
7,4	$-9,92 \times 10^{-3}$	$8,43 \times 10^{-3}$		$1,45 \times 10^{-2}$	$5,79 \times 10^{-3}$	$-2,23 \times 10^{-3}$
7,6	$-2,49 \times 10^{-2}$	$-8,01 \times 10^{-3}$		$-1,30 \times 10^{-2}$	$3,14 \times 10^{-2}$	$2,50 \times 10^{-2}$
7,8	$-2,39 \times 10^{-2}$	$-2,42 \times 10^{-2}$		$-3,77 \times 10^{-3}$	$-3,27 \times 10^{-2}$	$1,11 \times 10^{-3}$
8	$-7,45 \times 10^{-3}$	$1,24 \times 10^{-2}$	$-2,91 \times 10^{-3}$	$3,21 \times 10^{-2}$	$-3,78 \times 10^{-3}$	$4,78 \times 10^{-3}$
8,2	$-1,57 \times 10^{-2}$	$2,05 \times 10^{-2}$	$2,91 \times 10^{-2}$	$9,72 \times 10^{-3}$	$1,70 \times 10^{-2}$	$4,24 \times 10^{-3}$
8,4	$-1,60 \times 10^{-2}$	$-2,59 \times 10^{-3}$	$-1,08 \times 10^{-2}$	$3,04 \times 10^{-2}$	$5,28 \times 10^{-3}$	$3,79 \times 10^{-2}$
8,6	$6,91 \times 10^{-2}$	$1,41 \times 10^{-2}$	$-1,60 \times 10^{-2}$	$-8,39 \times 10^{-3}$	$2,83 \times 10^{-2}$	$6,61 \times 10^{-3}$
8,8	$2,17 \times 10^{-2}$	$3,45 \times 10^{-2}$	$1,39 \times 10^{-2}$	$2,87 \times 10^{-2}$	$-4,86 \times 10^{-3}$	$-2,91 \times 10^{-3}$
9	$-4,89 \times 10^{-3}$	$-5,98 \times 10^{-3}$	$1,90 \times 10^{-2}$	$8,20 \times 10^{-4}$	$-5,95 \times 10^{-2}$	$-2,42 \times 10^{-2}$
9,2	$1,67 \times 10^{-2}$	$2,35 \times 10^{-2}$	$-5,84 \times 10^{-3}$	$2,01 \times 10^{-2}$	$2,91 \times 10^{-2}$	$-3,28 \times 10^{-2}$
9,4	$7,40 \times 10^{-3}$	$-1,21 \times 10^{-2}$	$2,17 \times 10^{-2}$	$5,86 \times 10^{-3}$	$-1,85 \times 10^{-2}$	$-8,16 \times 10^{-3}$
9,6	$-4,62 \times 10^{-2}$	$1,10 \times 10^{-2}$	$-1,66 \times 10^{-3}$	$-1,14 \times 10^{-2}$	$1,71 \times 10^{-2}$	$2,56 \times 10^{-2}$
9,8	$-2,97 \times 10^{-1}$	$-1,00 \times 10^{-2}$	$-6,04 \times 10^{-3}$	$4,31 \times 10^{-2}$	$-1,19 \times 10^{-2}$	$1,54 \times 10^{-2}$
10	$-7,47 \times 10^{-2}$	$2,25 \times 10^{-2}$	$-1,51 \times 10^{-2}$	$-2,63 \times 10^{-2}$	$5,67 \times 10^{-3}$	$-2,24 \times 10^{-2}$

 TABLEAU C.2 – Valeurs moyennes des coordonnées  $x_0$  pour les réactions simulés dans le mélange gazeux (97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ ).

$En$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,p)$ ( mm)	$^{19}\text{F}(n,d)$ ( mm)	$^{19}\text{F}(n,t)$ ( mm)	$^{19}\text{F}(n,\alpha)$ ( mm)	$^{12}\text{C}(n,\alpha)$ ( mm)
1,8				$4,24 \times 10^{-2}$	
2				$-7,68 \times 10^{-3}$	
2,2				$1,49 \times 10^{-4}$	
2,4				$4,53 \times 10^{-2}$	
2,6				$-3,46 \times 10^{-3}$	
2,8				$1,41 \times 10^{-2}$	
3				$1,00 \times 10^{-3}$	
3,2				$-5,81 \times 10^{-3}$	
3,4				$-2,47 \times 10^{-5}$	
3,6				$-8,29 \times 10^{-3}$	
3,8				$-1,80 \times 10^{-2}$	
4				$9,44 \times 10^{-3}$	
4,2				$2,87 \times 10^{-2}$	
4,4	$2,82 \times 10^{-2}$			$-1,27 \times 10^{-2}$	
4,6	$1,16 \times 10^{-2}$			$-3,01 \times 10^{-2}$	
4,8	$-3,02 \times 10^{-2}$			$-1,98 \times 10^{-2}$	
5	$2,96 \times 10^{-2}$			$1,18 \times 10^{-2}$	
5,2	$-2,67 \times 10^{-2}$			$2,48 \times 10^{-2}$	
5,4	$9,42 \times 10^{-3}$			$4,98 \times 10^{-3}$	
5,6	$4,08 \times 10^{-2}$			$-4,20 \times 10^{-2}$	
5,8	$-1,91 \times 10^{-2}$			$1,29 \times 10^{-2}$	
6	$9,83 \times 10^{-3}$			$-2,10 \times 10^{-2}$	
6,2	$-1,38 \times 10^{-2}$	$1,21 \times 10^{-2}$		$-1,59 \times 10^{-2}$	$1,81 \times 10^{-2}$
6,4	$-1,02 \times 10^{-2}$	$-7,25 \times 10^{-3}$		$-1,16 \times 10^{-2}$	$-1,34 \times 10^{-2}$
6,6	$-8,82 \times 10^{-3}$	$1,25 \times 10^{-2}$		$-2,44 \times 10^{-2}$	$1,45 \times 10^{-2}$
6,8	$-3,03 \times 10^{-2}$	$-1,46 \times 10^{-2}$		$2,57 \times 10^{-3}$	$2,74 \times 10^{-4}$
7	$7,10 \times 10^{-3}$	$5,97 \times 10^{-3}$		$4,43 \times 10^{-4}$	$2,62 \times 10^{-2}$
7,2	$-1,19 \times 10^{-3}$	$-1,37 \times 10^{-2}$		$2,43 \times 10^{-3}$	$3,36 \times 10^{-3}$
7,4	$2,71 \times 10^{-2}$	$-1,02 \times 10^{-2}$		$2,92 \times 10^{-2}$	$1,61 \times 10^{-2}$
7,6	$-3,74 \times 10^{-3}$	$6,94 \times 10^{-3}$		$9,43 \times 10^{-4}$	$-2,76 \times 10^{-2}$
7,8	$-1,01 \times 10^{-2}$	$-4,28 \times 10^{-2}$		$2,05 \times 10^{-2}$	$3,01 \times 10^{-2}$
8	$3,28 \times 10^{-2}$	$-1,24 \times 10^{-2}$	$1,46 \times 10^{-2}$	$3,79 \times 10^{-3}$	$2,01 \times 10^{-2}$
8,2	$-6,66 \times 10^{-2}$	$1,20 \times 10^{-2}$	$2,65 \times 10^{-2}$	$-1,37 \times 10^{-3}$	$-1,37 \times 10^{-2}$
8,4	$-1,86 \times 10^{-2}$	$-5,70 \times 10^{-2}$	$4,38 \times 10^{-3}$	$1,97 \times 10^{-2}$	$3,64 \times 10^{-3}$
8,6	$-2,61 \times 10^{-2}$	$-2,04 \times 10^{-2}$	$-1,55 \times 10^{-2}$	$7,75 \times 10^{-3}$	$-3,03 \times 10^{-2}$
8,8	$4,63 \times 10^{-2}$	$-4,22 \times 10^{-3}$	$1,42 \times 10^{-2}$	$-1,26 \times 10^{-2}$	$-9,75 \times 10^{-3}$
9	$3,74 \times 10^{-2}$	$-1,48 \times 10^{-2}$	$1,38 \times 10^{-2}$	$5,80 \times 10^{-3}$	$3,28 \times 10^{-2}$
9,2	$4,18 \times 10^{-2}$	$-4,85 \times 10^{-3}$	$1,27 \times 10^{-2}$	$-1,05 \times 10^{-2}$	$-1,88 \times 10^{-2}$
9,4	$1,21 \times 10^{-4}$	$-3,07 \times 10^{-3}$	$-4,65 \times 10^{-2}$	$-3,01 \times 10^{-2}$	$1,62 \times 10^{-2}$
9,6	$5,33 \times 10^{-2}$	$-8,67 \times 10^{-3}$	$5,92 \times 10^{-3}$	$2,79 \times 10^{-4}$	$-4,29 \times 10^{-3}$
9,8	$-2,15 \times 10^{-1}$	$-1,96 \times 10^{-2}$	$-2,56 \times 10^{-3}$	$-3,07 \times 10^{-2}$	$-2,09 \times 10^{-2}$
10	$1,40 \times 10^{-1}$	$-1,03 \times 10^{-2}$	$8,52 \times 10^{-3}$	$1,78 \times 10^{-2}$	$-1,48 \times 10^{-2}$

TABLEAU C.3 – Valeurs moyennes des coordonnées  $y_0$  pour les réactions simulés dans le  $\text{CF}_4$  pur.

$En$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,p)$ ( mm)	$^{19}\text{F}(n,d)$ ( mm)	$^{19}\text{F}(n,t)$ ( mm)	$^{19}\text{F}(n,\alpha)$ ( mm)	$^{12}\text{C}(n,\alpha)$ ( mm)	$^{16}\text{O}(n,\alpha)$ ( mm)
1,8				$2,63 \times 10^{-2}$		
2				$-8,91 \times 10^{-3}$		
2,2				$-8,58 \times 10^{-3}$		
2,4				$-6,76 \times 10^{-3}$		$2,57 \times 10^{-3}$
2,6				$-3,99 \times 10^{-3}$		$-4,69 \times 10^{-3}$
2,8				$2,40 \times 10^{-2}$		$2,12 \times 10^{-2}$
3				$-1,89 \times 10^{-2}$		$1,01 \times 10^{-2}$
3,2				$3,70 \times 10^{-2}$		$9,55 \times 10^{-3}$
3,4				$1,73 \times 10^{-3}$		$9,14 \times 10^{-3}$
3,6				$-1,16 \times 10^{-2}$		$2,61 \times 10^{-3}$
3,8				$-5,53 \times 10^{-3}$		$2,20 \times 10^{-3}$
4				$-3,38 \times 10^{-2}$		$2,60 \times 10^{-2}$
4,2				$-1,84 \times 10^{-3}$		$1,70 \times 10^{-2}$
4,4	$1,48 \times 10^{-2}$			$4,49 \times 10^{-3}$		$6,05 \times 10^{-3}$
4,6	$2,27 \times 10^{-2}$			$-6,18 \times 10^{-3}$		$2,69 \times 10^{-2}$
4,8	$9,89 \times 10^{-3}$			$3,55 \times 10^{-2}$		$-3,39 \times 10^{-3}$
5	$-2,53 \times 10^{-2}$			$-2,24 \times 10^{-2}$		$-3,90 \times 10^{-2}$
5,2	$-8,71 \times 10^{-3}$			$2,94 \times 10^{-2}$		$4,25 \times 10^{-3}$
5,4	$-2,65 \times 10^{-2}$			$3,56 \times 10^{-2}$		$1,97 \times 10^{-2}$
5,6	$1,98 \times 10^{-2}$			$2,32 \times 10^{-2}$		$9,56 \times 10^{-3}$
5,8	$7,30 \times 10^{-3}$			$1,55 \times 10^{-2}$		$-1,88 \times 10^{-2}$
6	$3,07 \times 10^{-2}$			$1,42 \times 10^{-2}$		$3,30 \times 10^{-2}$
6,2	$1,60 \times 10^{-2}$	$-2,01 \times 10^{-2}$		$1,08 \times 10^{-2}$	$-1,19 \times 10^{-2}$	$-3,22 \times 10^{-4}$
6,4	$-3,64 \times 10^{-3}$	$-2,46 \times 10^{-3}$		$-7,76 \times 10^{-3}$	$6,43 \times 10^{-3}$	$8,55 \times 10^{-3}$
6,6	$5,19 \times 10^{-3}$	$-2,13 \times 10^{-3}$		$9,05 \times 10^{-4}$	$-5,38 \times 10^{-3}$	$-4,21 \times 10^{-2}$
6,8	$1,16 \times 10^{-2}$	$7,71 \times 10^{-3}$		$-2,88 \times 10^{-2}$	$-3,32 \times 10^{-2}$	$5,98 \times 10^{-3}$
7	$-2,29 \times 10^{-2}$	$1,07 \times 10^{-2}$		$-2,90 \times 10^{-2}$	$1,13 \times 10^{-3}$	$-2,38 \times 10^{-2}$
7,2	$-2,36 \times 10^{-2}$	$-5,87 \times 10^{-3}$		$2,85 \times 10^{-2}$	$4,20 \times 10^{-3}$	$3,68 \times 10^{-2}$
7,4	$-1,58 \times 10^{-3}$	$-6,48 \times 10^{-4}$		$3,77 \times 10^{-3}$	$4,58 \times 10^{-3}$	$-1,04 \times 10^{-2}$
7,6	$-3,76 \times 10^{-2}$	$5,23 \times 10^{-3}$		$-2,69 \times 10^{-2}$	$-3,62 \times 10^{-2}$	$7,01 \times 10^{-3}$
7,8	$-1,51 \times 10^{-2}$	$-1,21 \times 10^{-2}$		$6,41 \times 10^{-3}$	$1,71 \times 10^{-2}$	$2,37 \times 10^{-2}$
8	$6,75 \times 10^{-3}$	$5,18 \times 10^{-3}$	$-5,17 \times 10^{-3}$	$-8,34 \times 10^{-3}$	$-9,74 \times 10^{-3}$	$2,97 \times 10^{-3}$
8,2	$3,46 \times 10^{-3}$	$-1,64 \times 10^{-2}$	$1,13 \times 10^{-2}$	$-1,21 \times 10^{-2}$	$3,10 \times 10^{-2}$	$-4,06 \times 10^{-3}$
8,4	$3,22 \times 10^{-2}$	$-2,67 \times 10^{-2}$	$1,97 \times 10^{-2}$	$-4,42 \times 10^{-3}$	$1,11 \times 10^{-3}$	$1,11 \times 10^{-2}$
8,6	$7,02 \times 10^{-2}$	$1,02 \times 10^{-2}$	$-2,97 \times 10^{-3}$	$1,50 \times 10^{-2}$	$2,64 \times 10^{-2}$	$2,53 \times 10^{-2}$
8,8	$-7,91 \times 10^{-2}$	$2,11 \times 10^{-2}$	$-1,12 \times 10^{-2}$	$2,19 \times 10^{-2}$	$-3,98 \times 10^{-3}$	$-2,97 \times 10^{-2}$
9	$-9,43 \times 10^{-3}$	$6,57 \times 10^{-5}$	$6,31 \times 10^{-2}$	$2,19 \times 10^{-3}$	$-1,95 \times 10^{-2}$	$-4,71 \times 10^{-3}$
9,2	$6,19 \times 10^{-2}$	$-1,83 \times 10^{-2}$	$4,45 \times 10^{-3}$	$4,91 \times 10^{-3}$	$-1,44 \times 10^{-2}$	$3,32 \times 10^{-2}$
9,4	$-3,24 \times 10^{-2}$	$3,52 \times 10^{-2}$	$-6,15 \times 10^{-3}$	$2,36 \times 10^{-2}$	$-1,40 \times 10^{-2}$	$-2,49 \times 10^{-2}$
9,6	$-9,37 \times 10^{-2}$	$2,36 \times 10^{-2}$	$-2,43 \times 10^{-2}$	$1,64 \times 10^{-2}$	$1,35 \times 10^{-2}$	$-1,15 \times 10^{-2}$
9,8	$-5,16 \times 10^{-2}$	$8,56 \times 10^{-3}$	$1,69 \times 10^{-2}$	$3,29 \times 10^{-2}$	$-3,15 \times 10^{-2}$	$-1,34 \times 10^{-2}$
10	$-1,78 \times 10^{-1}$	$-2,78 \times 10^{-2}$	$8,63 \times 10^{-3}$	$2,22 \times 10^{-2}$	$-3,89 \times 10^{-3}$	$4,93 \times 10^{-3}$

TABLEAU C.4 – Valeurs moyennes des coordonnées  $y_0$  pour les réactions simulés dans le mélange gazeux (97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ ).

$En$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,p)$ ( mm)	$^{19}\text{F}(n,d)$ ( mm)	$^{19}\text{F}(n,t)$ ( mm)	$^{19}\text{F}(n,\alpha)$ ( mm)	$^{12}\text{C}(n,\alpha)$ ( mm)
1,8				-43,36	
2				-43,46	
2,2				-43,65	
2,4				-43,76	
2,6				-43,92	
2,8				-43,93	
3				-43,98	
3,2				-44,20	
3,4				-44,29	
3,6				-44,23	
3,8				-44,30	
4				-44,39	
4,2				-44,49	
4,4	-43,52			-44,54	
4,6	-43,57			-44,54	
4,8	-43,89			-44,62	
5	-44,19			-44,72	
5,2	-44,50			-44,85	
5,4	-44,63			-44,84	
5,6	-44,86			-45,03	
5,8	-45,09			-45,03	
6	-45,40			-45,10	
6,2	-45,72	-43,69		-45,23	-43,55
6,4	-45,92	-43,78		-45,17	-44,02
6,6	-46,10	-44,06		-45,43	-44,11
6,8	-46,29	-44,25		-45,40	-44,17
7	-46,56	-44,51		-45,47	-44,43
7,2	-46,62	-44,79		-45,54	-44,40
7,4	-46,67	-45,01		-45,61	-44,51
7,6	-46,63	-45,24		-45,68	-44,71
7,8	-46,31	-45,42		-45,76	-44,72
8	-45,81	-45,83	-43,44	-45,75	-44,78
8,2	-44,82	-45,96	-43,97	-46,04	-44,87
8,4	-43,01	-46,16	-44,17	-45,95	-45,06
8,6	-40,27	-46,47	-44,35	-46,09	-45,12
8,8	-36,74	-46,69	-44,68	-46,14	-45,13
9	-31,13	-46,82	-44,83	-46,26	-45,26
9,2	-23,73	-47,07	-44,99	-46,23	-45,27
9,4	-15,76	-47,33	-45,26	-46,33	-45,47
9,6	-8,73	-47,46	-45,47	-46,44	-45,58
9,8	-3,63	-47,62	-45,59	-46,46	-45,71
10	0,41	-47,71	-45,96	-46,57	-45,73

TABLEAU C.5 – Valeurs moyennes des coordonnées  $z_0$  pour les réactions simulés dans le  $\text{CF}_4$  pur.

$En$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,p)$ ( mm)	$^{19}\text{F}(n,d)$ ( mm)	$^{19}\text{F}(n,t)$ ( mm)	$^{19}\text{F}(n,\alpha)$ ( mm)	$^{12}\text{C}(n,\alpha)$ ( mm)	$^{16}\text{O}(n,\alpha)$ ( mm)
1,8				-43,34		
2				-43,45		
2,2				-43,49		
2,4				-43,54		-42,68
2,6				-43,65		-43,38
2,8				-43,71		-43,58
3				-43,82		-43,55
3,2				-43,90		-43,68
3,4				-43,92		-43,72
3,6				-44,05		-43,92
3,8				-44,13		-43,98
4				-44,16		-43,95
4,2				-44,24		-44,14
4,4	-43,41			-44,29		-44,21
4,6	-43,51			-44,39		-44,22
4,8	-43,75			-44,48		-44,23
5	-44,02			-44,51		-44,41
5,2	-44,23			-44,55		-44,54
5,4	-44,41			-44,65		-44,54
5,6	-44,73			-44,77		-44,55
5,8	-45,02			-44,72		-44,65
6	-45,20			-44,92		-44,73
6,2	-45,56	-43,45		-44,98	-43,70	-44,87
6,4	-45,71	-43,61		-45,03	-43,66	-44,93
6,6	-45,91	-43,83		-45,10	-43,97	-44,95
6,8	-46,07	-44,13		-45,11	-43,88	-45,03
7	-46,27	-44,31		-45,16	-44,19	-45,11
7,2	-46,44	-44,58		-45,24	-44,22	-45,18
7,4	-46,43	-44,78		-45,40	-44,29	-45,28
7,6	-46,41	-44,98		-45,36	-44,43	-45,42
7,8	-46,05	-45,33		-45,48	-44,40	-45,49
8	-45,29	-45,51	-43,56	-45,68	-44,63	-45,46
8,2	-44,39	-45,76	-43,71	-45,66	-44,70	-45,59
8,4	-42,68	-46,01	-43,89	-45,76	-44,77	-45,79
8,6	-39,89	-46,28	-44,21	-45,77	-44,81	-45,75
8,8	-35,83	-46,39	-44,42	-45,90	-44,87	-45,91
9	-29,83	-46,61	-44,62	-45,94	-44,89	-46,00
9,2	-22,08	-46,76	-44,81	-46,09	-45,15	-46,01
9,4	-13,91	-47,11	-45,02	-46,08	-45,25	-46,18
9,6	-7,50	-47,20	-45,27	-46,17	-45,24	-46,15
9,8	-2,61	-47,34	-45,44	-46,36	-45,43	-46,36
10	0,98	-47,59	-45,73	-46,45	-45,43	-46,35

TABLEAU C.6 – Valeurs moyennes des coordonnées  $z_0$  pour les réactions simulés dans le mélange gazeux (97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ ).

$En$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,p)$ (%)	$^{19}\text{F}(n,d)$ (%)	$^{19}\text{F}(n,t)$ (%)	$^{19}\text{F}(n,\alpha)$ (%)	$^{12}\text{C}(n,\alpha)$ (%)
1,8				99,61 ± 0,20	
2				99,44 ± 0,20	
2,2				99,30 ± 0,20	
2,4				99,19 ± 0,20	
2,6				99,07 ± 0,20	
2,8				98,93 ± 0,20	
3				98,84 ± 0,20	
3,2				98,72 ± 0,20	
3,4				98,61 ± 0,20	
3,6				98,48 ± 0,20	
3,8				98,33 ± 0,20	
4				98,22 ± 0,20	
4,2				98,05 ± 0,20	
4,4	99,52 ± 0,20			97,92 ± 0,20	
4,6	99,08 ± 0,20			97,76 ± 0,20	
4,8	98,52 ± 0,20			97,62 ± 0,20	
5	97,81 ± 0,20			97,43 ± 0,20	
5,2	96,94 ± 0,20			97,29 ± 0,20	
5,4	96,01 ± 0,19			97,10 ± 0,20	
5,6	94,92 ± 0,19			96,89 ± 0,20	
5,8	93,78 ± 0,19			96,74 ± 0,20	
6	92,50 ± 0,19			96,53 ± 0,20	
6,2	91,09 ± 0,19	99,46 ± 0,20		96,34 ± 0,19	99,34 ± 0,20
6,4	89,59 ± 0,18	99,08 ± 0,20		96,10 ± 0,19	99,13 ± 0,20
6,6	88,05 ± 0,18	98,68 ± 0,20		95,92 ± 0,19	99,03 ± 0,20
6,8	86,41 ± 0,18	98,24 ± 0,20		95,68 ± 0,19	98,89 ± 0,20
7	84,28 ± 0,18	97,74 ± 0,20		95,49 ± 0,19	98,82 ± 0,20
7,2	81,03 ± 0,17	97,12 ± 0,20		95,20 ± 0,19	98,67 ± 0,20
7,4	76,16 ± 0,16	96,47 ± 0,20		95,05 ± 0,19	98,59 ± 0,20
7,6	69,76 ± 0,15	95,77 ± 0,19		94,77 ± 0,19	98,42 ± 0,20
7,8	62,22 ± 0,14	95,01 ± 0,19		94,54 ± 0,19	98,34 ± 0,20
8	53,59 ± 0,13	94,14 ± 0,19	99,46 ± 0,20	94,26 ± 0,19	98,19 ± 0,20
8,2	44,33 ± 0,11	93,23 ± 0,19	99,08 ± 0,20	94,09 ± 0,19	98,11 ± 0,20
8,4	34,80 ± 0,10	92,37 ± 0,19	98,78 ± 0,20	93,81 ± 0,19	97,94 ± 0,20
8,6	26,16 ± 0,08	91,46 ± 0,19	98,37 ± 0,20	93,53 ± 0,19	97,82 ± 0,20
8,8	18,97 ± 0,07	90,34 ± 0,19	97,95 ± 0,20	93,22 ± 0,19	97,69 ± 0,20
9	13,40 ± 0,06	89,28 ± 0,18	97,50 ± 0,20	92,93 ± 0,19	97,51 ± 0,20
9,2	9,39 ± 0,05	88,11 ± 0,18	97,01 ± 0,20	92,69 ± 0,19	97,40 ± 0,20
9,4	6,68 ± 0,04	86,94 ± 0,18	96,50 ± 0,20	92,45 ± 0,19	97,21 ± 0,20
9,6	4,89 ± 0,03	85,75 ± 0,18	95,99 ± 0,19	92,23 ± 0,19	97,01 ± 0,20
9,8	3,54 ± 0,03	84,24 ± 0,18	95,32 ± 0,19	91,82 ± 0,19	96,91 ± 0,20
10	2,59 ± 0,02	82,08 ± 0,17	94,77 ± 0,19	91,53 ± 0,19	96,71 ± 0,20

TABLEAU C.7 – Pourcentage d'événements considérés comme bons pour les réactions simulés dans le  $\text{CF}_4$  pur.

$En$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,p)$ (%)	$^{19}\text{F}(n,d)$ (%)	$^{19}\text{F}(n,t)$ (%)	$^{19}\text{F}(n,\alpha)$ (%)	$^{12}\text{C}(n,\alpha)$ (%)	$^{16}\text{O}(n,\alpha)$ (%)
1,8				99,64 ± 0,20		
2				99,44 ± 0,20		
2,2				99,32 ± 0,20		
2,4				99,19 ± 0,20		99,71 ± 0,20
2,6				99,08 ± 0,20		99,50 ± 0,20
2,8				98,94 ± 0,20		99,35 ± 0,20
3				98,85 ± 0,20		99,21 ± 0,20
3,2				98,75 ± 0,20		99,11 ± 0,20
3,4				98,60 ± 0,20		99,01 ± 0,20
3,6				98,46 ± 0,20		98,86 ± 0,20
3,8				98,32 ± 0,20		98,75 ± 0,20
4				98,20 ± 0,20		98,63 ± 0,20
4,2				98,06 ± 0,20		98,54 ± 0,20
4,4	99,52 ± 0,20			97,91 ± 0,20		98,43 ± 0,20
4,6	99,09 ± 0,20			97,77 ± 0,20		98,25 ± 0,20
4,8	98,52 ± 0,20			97,57 ± 0,20		98,13 ± 0,20
5	97,75 ± 0,20			97,43 ± 0,20		98,00 ± 0,20
5,2	96,95 ± 0,20			97,25 ± 0,20		97,82 ± 0,20
5,4	95,98 ± 0,19			97,06 ± 0,20		97,69 ± 0,20
5,6	94,88 ± 0,19			96,86 ± 0,20		97,54 ± 0,20
5,8	93,69 ± 0,19			96,71 ± 0,20		97,37 ± 0,20
6	92,40 ± 0,19			96,51 ± 0,20		97,20 ± 0,20
6,2	91,08 ± 0,19	99,45 ± 0,20		96,23 ± 0,19	99,34 ± 0,20	97,05 ± 0,20
6,4	89,47 ± 0,18	99,08 ± 0,20		96,11 ± 0,19	99,15 ± 0,20	96,87 ± 0,20
6,6	87,86 ± 0,18	98,68 ± 0,20		95,85 ± 0,19	99,02 ± 0,20	96,66 ± 0,20
6,8	86,19 ± 0,18	98,19 ± 0,20		95,63 ± 0,19	98,92 ± 0,20	96,52 ± 0,20
7	84,10 ± 0,18	97,70 ± 0,20		95,37 ± 0,19	98,79 ± 0,20	96,27 ± 0,19
7,2	80,49 ± 0,17	97,11 ± 0,20		95,19 ± 0,19	98,67 ± 0,20	96,11 ± 0,19
7,4	75,51 ± 0,16	96,45 ± 0,20		94,94 ± 0,19	98,58 ± 0,20	95,88 ± 0,19
7,6	68,92 ± 0,15	95,66 ± 0,19		94,71 ± 0,19	98,43 ± 0,20	95,73 ± 0,19
7,8	61,16 ± 0,14	94,95 ± 0,19		94,43 ± 0,19	98,32 ± 0,20	95,50 ± 0,19
8	52,32 ± 0,13	94,06 ± 0,19	99,44 ± 0,20	94,22 ± 0,19	98,20 ± 0,20	95,26 ± 0,19
8,2	42,87 ± 0,11	93,13 ± 0,19	99,08 ± 0,20	93,97 ± 0,19	98,05 ± 0,20	95,03 ± 0,19
8,4	33,42 ± 0,09	92,22 ± 0,19	98,71 ± 0,20	93,67 ± 0,19	97,95 ± 0,20	94,78 ± 0,19
8,6	24,80 ± 0,08	91,30 ± 0,19	98,33 ± 0,20	93,45 ± 0,19	97,80 ± 0,20	94,62 ± 0,19
8,8	18,01 ± 0,07	90,18 ± 0,19	97,96 ± 0,20	93,17 ± 0,19	97,64 ± 0,20	94,35 ± 0,19
9	12,59 ± 0,05	89,10 ± 0,18	97,54 ± 0,20	92,92 ± 0,19	97,51 ± 0,20	94,12 ± 0,19
9,2	8,82 ± 0,04	87,98 ± 0,18	97,04 ± 0,20	92,57 ± 0,19	97,33 ± 0,20	93,84 ± 0,19
9,4	6,29 ± 0,04	86,80 ± 0,18	96,55 ± 0,20	92,37 ± 0,19	97,18 ± 0,20	93,62 ± 0,19
9,6	4,60 ± 0,03	85,55 ± 0,18	95,88 ± 0,19	92,11 ± 0,19	97,05 ± 0,20	93,34 ± 0,19
9,8	3,40 ± 0,03	83,91 ± 0,18	95,35 ± 0,19	91,79 ± 0,19	96,85 ± 0,20	93,02 ± 0,19
10	2,47 ± 0,02	81,72 ± 0,17	94,74 ± 0,19	91,50 ± 0,19	96,67 ± 0,20	92,83 ± 0,19

TABLEAU C.8 – Pourcentage d'événements considérés comme bons pour les réactions simulés dans le mélange gazeux (97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ ).

$E_n$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,p)$ ( mm)	$^{19}\text{F}(n,d)$ ( mm)	$^{19}\text{F}(n,t)$ ( mm)	$^{19}\text{F}(n,\alpha)$ ( mm)	$^{12}\text{C}(n,\alpha)$ ( mm)
1,8				128,5 ± 0,1	
2				127,8 ± 0,1	
2,2				127,2 ± 0,1	
2,4				126,7 ± 0,2	
2,6				126,2 ± 0,1	
2,8				125,7 ± 0,1	
3				125,2 ± 0,1	
3,2				124,7 ± 0,2	
3,4				124,1 ± 0,2	
3,6				123,5 ± 0,2	
3,8				122,8 ± 0,2	
4				122,2 ± 0,3	
4,2				121,4 ± 0,2	
4,4	128,0 ± 0,3			120,7 ± 0,2	
4,6	126,1 ± 0,4			119,9 ± 0,3	
4,8	122,9 ± 0,2			119,1 ± 0,2	
5	119,3 ± 0,2			118,3 ± 0,1	
5,2	114,9 ± 0,2			117,4 ± 0,2	
5,4	110,1 ± 0,2			116,5 ± 0,3	
5,6	104,7 ± 0,2			115,7 ± 0,2	
5,8	98,3 ± 0,3			114,8 ± 0,4	
6	91,8 ± 0,8			113,8 ± 0,4	
6,2	83,8 ± 0,4	127,8 ± 0,2		112,9 ± 0,3	128,8 ± 0,2
6,4	77,1 ± 0,4	126,3 ± 0,2		111,7 ± 0,4	128,0 ± 0,1
6,6	68,8 ± 0,5	124,0 ± 0,3		110,5 ± 0,4	127,6 ± 0,1
6,8	59,0 ± 0,7	122,0 ± 0,2		109,5 ± 0,4	127,3 ± 0,2
7		119,3 ± 0,1		108,7 ± 0,5	126,9 ± 0,1
7,2		116,5 ± 0,4		107,3 ± 0,4	126,3 ± 0,1
7,4		113,0 ± 0,1		106,3 ± 0,4	125,7 ± 0,2
7,6		109,1 ± 0,4		104,9 ± 0,2	125,3 ± 0,2
7,8		105,5 ± 0,5		103,6 ± 0,4	124,7 ± 0,3
8		101,0 ± 0,4	128,2 ± 0,2	102,6 ± 0,4	124,1 ± 0,2
8,2		96,0 ± 0,5	126,7 ± 0,2	101,4 ± 0,6	123,4 ± 0,1
8,4		91,8 ± 0,4	125,0 ± 0,3	100,1 ± 0,2	122,9 ± 0,2
8,6		86,7 ± 0,6	123,1 ± 0,3	98,3 ± 0,5	122,2 ± 0,2
8,8		81,4 ± 0,4	121,2 ± 0,4	97,3 ± 0,3	121,7 ± 0,3
9		75,2 ± 0,4	118,9 ± 0,2	95,7 ± 0,4	120,9 ± 0,2
9,2		69,8 ± 0,6	116,5 ± 0,3	94,3 ± 0,9	120,3 ± 0,3
9,4		63,8 ± 1,0	113,8 ± 0,4	93,2 ± 0,4	119,5 ± 0,1
9,6		58,1 ± 0,7	110,8 ± 0,2	91,8 ± 0,5	118,8 ± 0,2
9,8			108,3 ± 0,5	90,0 ± 0,5	118,1 ± 0,3
10			104,5 ± 0,5	88,4 ± 0,3	117,2 ± 0,4

TABLEAU C.9 – Longueur utile pour les réactions simulés dans le  $\text{CF}_4$  pur.

$En$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,p)$ ( mm)	$^{19}\text{F}(n,d)$ ( mm)	$^{19}\text{F}(n,t)$ ( mm)	$^{19}\text{F}(n,\alpha)$ ( mm)	$^{12}\text{C}(n,\alpha)$ ( mm)	$^{16}\text{O}(n,\alpha)$ ( mm)
1,8				128,4 ± 0,1		
2				127,8 ± 0,1		
2,2				127,2 ± 0,1		
2,4				126,8 ± 0,1		129,2 ± 0,1
2,6				126,2 ± 0,1		128,4 ± 0,1
2,8				125,7 ± 0,1		127,7 ± 0,1
3				125,1 ± 0,1		127,2 ± 0,1
3,2				124,7 ± 0,3		126,7 ± 0,1
3,4				123,9 ± 0,1		126,2 ± 0,1
3,6				123,4 ± 0,2		125,7 ± 0,1
3,8				122,7 ± 0,1		125,2 ± 0,2
4				122,0 ± 0,2		124,6 ± 0,1
4,2				121,4 ± 0,2		124,0 ± 0,1
4,4	128,0 ± 0,2			120,6 ± 0,2		123,7 ± 0,4
4,6	125,9 ± 0,3			119,8 ± 0,3		122,8 ± 0,2
4,8	122,8 ± 0,2			119,1 ± 0,2		122,2 ± 0,2
5	119,5 ± 0,4			118,1 ± 0,2		121,4 ± 0,1
5,2	114,9 ± 0,4			117,3 ± 0,3		120,9 ± 0,3
5,4	109,6 ± 0,1			116,6 ± 0,3		120,0 ± 0,2
5,6	104,1 ± 0,5			115,7 ± 0,3		119,4 ± 0,2
5,8	97,7 ± 0,3			114,6 ± 0,4		118,4 ± 0,1
6	89,1 ± 0,3			113,7 ± 0,4		117,5 ± 0,4
6,2	83,5 ± 0,3	128,1 ± 0,1		112,5 ± 0,3	128,9 ± 0,1	116,9 ± 0,3
6,4	76,1 ± 0,5	126,2 ± 0,2		111,6 ± 0,4	128,3 ± 0,1	115,7 ± 0,3
6,6	66,5 ± 0,3	124,1 ± 0,1		110,3 ± 0,4	127,7 ± 0,1	115,0 ± 0,3
6,8	59,6 ± 1,4	121,8 ± 0,2		109,4 ± 0,4	127,3 ± 0,1	114,2 ± 0,4
7		119,2 ± 0,3		108,4 ± 0,4	126,8 ± 0,3	113,1 ± 0,2
7,2		116,3 ± 0,4		107,3 ± 0,4	126,3 ± 0,2	112,1 ± 0,4
7,4		112,8 ± 0,3		105,9 ± 0,3	125,8 ± 0,2	111,1 ± 0,2
7,6		109,0 ± 0,4		104,7 ± 0,4	125,1 ± 0,2	110,2 ± 0,4
7,8		105,2 ± 0,4		103,3 ± 0,4	124,7 ± 0,1	109,0 ± 0,2
8		100,5 ± 0,3	128,5 ± 0,3	102,1 ± 0,4	124,1 ± 0,1	108,1 ± 0,4
8,2		95,7 ± 0,4	126,7 ± 0,1	101,0 ± 0,5	123,5 ± 0,1	106,6 ± 0,5
8,4		91,4 ± 0,2	124,8 ± 0,3	99,9 ± 0,3	122,9 ± 0,2	105,5 ± 0,4
8,6		86,3 ± 0,7	122,9 ± 0,4	98,3 ± 0,2	122,2 ± 0,3	104,4 ± 0,4
8,8		80,5 ± 0,4	120,7 ± 0,4	96,9 ± 0,4	121,6 ± 0,3	103,4 ± 0,4
9		75,1 ± 0,4	118,7 ± 0,4	95,6 ± 0,4	121,1 ± 0,4	102,0 ± 0,5
9,2		69,0 ± 0,6	116,2 ± 0,3	94,0 ± 0,4	120,2 ± 0,2	100,7 ± 0,4
9,4		62,5 ± 0,4	113,6 ± 0,3	92,6 ± 0,6	119,4 ± 0,3	99,2 ± 0,4
9,6		57,2 ± 1,2	110,4 ± 0,8	91,0 ± 0,4	118,6 ± 0,2	98,3 ± 0,4
9,8			107,6 ± 0,4	89,7 ± 0,4	118,1 ± 0,2	96,8 ± 0,5
10			104,2 ± 0,3	87,6 ± 0,6	117,0 ± 0,7	95,4 ± 0,9

TABLEAU C.10 – Longueur utile pour les réactions simulés dans le mélange gazeux (97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ ).

$En$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,p)$ ( $\text{cm}^3$ )	$^{19}\text{F}(n,d)$ ( $\text{cm}^3$ )	$^{19}\text{F}(n,t)$ ( $\text{cm}^3$ )	$^{19}\text{F}(n,\alpha)$ ( $\text{cm}^3$ )	$^{12}\text{C}(n,\alpha)$ ( $\text{cm}^3$ )
1,8				252,3 ± 20,2	
2,0				250,9 ± 20,1	
2,2				249,8 ± 20,0	
2,4				248,8 ± 19,9	
2,6				247,8 ± 19,8	
2,8				246,8 ± 19,7	
3,0				245,8 ± 19,7	
3,2				244,8 ± 19,6	
3,4				243,7 ± 19,5	
3,6				242,5 ± 19,4	
3,8				241,1 ± 19,3	
4,0				239,9 ± 19,2	
4,2				238,4 ± 19,1	
4,4	251,3 ± 20,1			237,0 ± 19,0	
4,6	247,6 ± 19,8			235,4 ± 18,8	
4,8	241,3 ± 19,3			233,9 ± 18,7	
5,0	234,2 ± 18,7			232,3 ± 18,6	
5,2	225,6 ± 18,1			230,5 ± 18,4	
5,4	216,2 ± 17,3			228,7 ± 18,3	
5,6	205,6 ± 16,5			227,2 ± 18,2	
5,8	193,0 ± 15,5			225,4 ± 18,0	
6,0	180,2 ± 14,5			223,4 ± 17,9	
6,2	164,5 ± 13,2	250,9 ± 20,1		221,7 ± 17,7	252,9 ± 20,2
6,4	151,4 ± 12,1	248,0 ± 19,8		219,3 ± 17,6	251,3 ± 20,1
6,6	135,1 ± 10,9	243,5 ± 19,5		217,0 ± 17,4	250,5 ± 20,0
6,8	115,8 ± 9,4	239,5 ± 19,2		215,0 ± 17,2	250,0 ± 20,0
7,0		234,2 ± 18,7		213,4 ± 17,1	249,2 ± 19,9
7,2		228,7 ± 18,3		210,7 ± 16,9	248,0 ± 19,8
7,4		221,9 ± 17,8		208,7 ± 16,7	246,8 ± 19,7
7,6		214,2 ± 17,2		206,0 ± 16,5	246,0 ± 19,7
7,8		207,1 ± 16,6		203,4 ± 16,3	244,8 ± 19,6
8,0		198,3 ± 15,9	251,7 ± 20,1	201,5 ± 16,1	243,7 ± 19,5
8,2		188,5 ± 15,1	248,8 ± 19,9	199,1 ± 16,0	242,3 ± 19,4
8,4		180,2 ± 14,4	245,4 ± 19,6	196,5 ± 15,7	241,3 ± 19,3
8,6		170,2 ± 13,7	241,7 ± 19,3	193,0 ± 15,5	239,9 ± 19,2
8,8		159,8 ± 12,8	238,0 ± 19,1	191,0 ± 15,3	239,0 ± 19,1
9,0		147,7 ± 11,8	233,5 ± 18,7	187,9 ± 15,0	237,4 ± 19,0
9,2		137,1 ± 11,0	228,7 ± 18,3	185,2 ± 14,9	236,2 ± 18,9
9,4		125,3 ± 10,2	223,4 ± 17,9	183,0 ± 14,7	234,6 ± 18,8
9,6		114,1 ± 9,2	217,6 ± 17,4	180,2 ± 14,5	233,3 ± 18,7
9,8			212,6 ± 17,0	176,7 ± 14,2	231,9 ± 18,6
10,0			205,2 ± 16,4	173,6 ± 13,9	230,1 ± 18,4

TABLEAU C.11 – Volume utile pour les réactions simulés dans le  $\text{CF}_4$  pur.

$En$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,p)$ ( $\text{cm}^3$ )	$^{19}\text{F}(n,d)$ ( $\text{cm}^3$ )	$^{19}\text{F}(n,t)$ ( $\text{cm}^3$ )	$^{19}\text{F}(n,\alpha)$ ( $\text{cm}^3$ )	$^{12}\text{C}(n,\alpha)$ ( $\text{cm}^3$ )	$^{16}\text{O}(n,\alpha)$ ( $\text{cm}^3$ )
1,8				252,1 ± 20,2		
2,0				250,9 ± 20,1		
2,2				249,8 ± 20,0		
2,4				249,0 ± 19,9		253,7 ± 20,3
2,6				247,8 ± 19,8		252,1 ± 20,2
2,8				246,8 ± 19,7		250,7 ± 20,1
3,0				245,6 ± 19,7		249,8 ± 20,0
3,2				244,8 ± 19,6		248,8 ± 19,9
3,4				243,3 ± 19,5		247,8 ± 19,8
3,6				242,3 ± 19,4		246,8 ± 19,7
3,8				240,9 ± 19,3		245,8 ± 19,7
4,0				239,5 ± 19,2		244,7 ± 19,6
4,2				238,4 ± 19,1		243,5 ± 19,5
4,4	251,3 ± 20,1			236,8 ± 18,9		242,9 ± 19,5
4,6	247,2 ± 19,8			235,2 ± 18,8		241,1 ± 19,3
4,8	241,1 ± 19,3			233,9 ± 18,7		239,9 ± 19,2
5,0	234,6 ± 18,8			231,9 ± 18,6		238,4 ± 19,1
5,2	225,6 ± 18,1			230,3 ± 18,4		237,4 ± 19,0
5,4	215,2 ± 17,2			228,9 ± 18,3		235,6 ± 18,9
5,6	204,4 ± 16,4			227,2 ± 18,2		234,4 ± 18,8
5,8	191,8 ± 15,4			225,0 ± 18,0		232,5 ± 18,6
6,0	174,9 ± 14,0			223,2 ± 17,9		230,7 ± 18,5
6,2	164,0 ± 13,1	251,5 ± 20,1		220,9 ± 17,7	253,1 ± 20,2	229,5 ± 18,4
6,4	149,4 ± 12,0	247,8 ± 19,8		219,1 ± 17,5	251,9 ± 20,2	227,2 ± 18,2
6,6	130,6 ± 10,5	243,7 ± 19,5		216,6 ± 17,3	250,7 ± 20,1	225,8 ± 18,1
6,8	117,0 ± 9,8	239,2 ± 19,1		214,8 ± 17,2	250,0 ± 20,0	224,2 ± 18,0
7,0		234,0 ± 18,7		212,8 ± 17,0	249,0 ± 19,9	222,1 ± 17,8
7,2		228,4 ± 18,3		210,7 ± 16,9	248,0 ± 19,8	220,1 ± 17,6
7,4		221,5 ± 17,7		207,9 ± 16,6	247,0 ± 19,8	218,1 ± 17,5
7,6		214,0 ± 17,1		205,6 ± 16,5	245,6 ± 19,7	216,4 ± 17,3
7,8		206,6 ± 16,5		202,8 ± 16,2	244,8 ± 19,6	214,0 ± 17,1
8,0		197,3 ± 15,8	252,3 ± 20,2	200,5 ± 16,1	243,7 ± 19,5	212,3 ± 17,0
8,2		187,9 ± 15,0	248,8 ± 19,9	198,3 ± 15,9	242,5 ± 19,4	209,3 ± 16,8
8,4		179,5 ± 14,4	245,0 ± 19,6	196,2 ± 15,7	241,3 ± 19,3	207,1 ± 16,6
8,6		169,5 ± 13,6	241,3 ± 19,3	193,0 ± 15,4	239,9 ± 19,2	205,0 ± 16,4
8,8		158,1 ± 12,7	237,0 ± 19,0	190,3 ± 15,2	238,8 ± 19,1	203,0 ± 16,3
9,0		147,5 ± 11,8	233,1 ± 18,7	187,7 ± 15,0	237,8 ± 19,0	200,3 ± 16,1
9,2		135,5 ± 10,9	228,2 ± 18,3	184,6 ± 14,8	236,0 ± 18,9	197,7 ± 15,8
9,4		122,7 ± 9,9	223,1 ± 17,9	181,8 ± 14,6	234,4 ± 18,8	194,8 ± 15,6
9,6		112,3 ± 9,3	216,8 ± 17,4	178,7 ± 14,3	232,9 ± 18,6	193,0 ± 15,5
9,8			211,3 ± 16,9	176,1 ± 14,1	231,9 ± 18,6	190,1 ± 15,2
10,0			204,6 ± 16,4	172,0 ± 13,8	229,7 ± 18,4	187,3 ± 15,1

TABLEAU C.12 – Volume utile pour les réactions simulés dans le mélange gazeux (97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ ).

$En$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,p)$	$^{19}\text{F}(n,d)$	$^{19}\text{F}(n,t)$	$^{19}\text{F}(n,\alpha)$	$^{12}\text{C}(n,\alpha)$
1,8				1,48 ± 0,73	
2				2,44 ± 0,98	
2,2				3,36 ± 1,21	
2,4				4,27 ± 1,42	
2,6				5,18 ± 1,62	
2,8				6,09 ± 1,82	
3				6,99 ± 2,01	
3,2				7,88 ± 2,20	
3,4				8,78 ± 2,39	
3,6				9,69 ± 2,59	
3,8				10,60 ± 2,78	
4				11,50 ± 2,96	
4,2				12,44 ± 3,16	
4,4	1,84 ± 0,83			13,38 ± 3,35	
4,6	2,75 ± 1,06			14,34 ± 3,54	
4,8	3,67 ± 1,29			15,30 ± 3,73	
5	4,65 ± 1,51			16,26 ± 3,93	
5,2	5,66 ± 1,72			17,23 ± 4,13	
5,4	6,69 ± 1,95			18,23 ± 4,34	
5,6	7,72 ± 2,18			19,20 ± 4,53	
5,8	8,77 ± 2,42			20,21 ± 4,75	
6	9,82 ± 2,68			21,20 ± 4,94	
6,2	10,91 ± 2,98	2,17 ± 0,92		22,19 ± 5,15	2,57 ± 1,01
6,4	12,01 ± 3,31	3,07 ± 1,14		23,21 ± 5,35	3,48 ± 1,23
6,6	13,14 ± 3,71	3,96 ± 1,35		24,18 ± 5,56	4,39 ± 1,44
6,8	14,29 ± 4,19	4,87 ± 1,56		25,20 ± 5,77	5,31 ± 1,65
7	15,45 ± 4,72	5,77 ± 1,76		26,20 ± 5,98	6,21 ± 1,85
7,2	16,64 ± 5,22	6,71 ± 1,96		27,21 ± 6,19	7,11 ± 2,04
7,4	17,76 ± 5,64	7,67 ± 2,17		28,22 ± 6,41	8,00 ± 2,23
7,6	18,88 ± 6,01	8,67 ± 2,38		29,23 ± 6,62	8,90 ± 2,42
7,8	19,98 ± 6,35	9,69 ± 2,60		30,25 ± 6,85	9,80 ± 2,61
8	21,02 ± 6,66	10,71 ± 2,83	2,23 ± 0,94	31,26 ± 7,05	10,71 ± 2,80
8,2	22,07 ± 6,90	11,76 ± 3,06	3,13 ± 1,16	32,22 ± 7,27	11,63 ± 2,98
8,4	23,06 ± 7,08	12,82 ± 3,32	4,03 ± 1,37	33,31 ± 7,50	12,53 ± 3,17
8,6	23,89 ± 7,03	13,88 ± 3,60	4,93 ± 1,57	34,31 ± 7,74	13,46 ± 3,36
8,8	24,59 ± 6,89	14,96 ± 3,89	5,82 ± 1,77	35,36 ± 7,98	14,40 ± 3,55
9	25,31 ± 6,68	16,07 ± 4,22	6,73 ± 1,96	36,36 ± 8,22	15,34 ± 3,74
9,2	25,95 ± 6,34	17,18 ± 4,59	7,64 ± 2,16	37,40 ± 8,45	16,28 ± 3,93
9,4	26,48 ± 5,93	18,31 ± 5,01	8,56 ± 2,35	38,42 ± 8,70	17,22 ± 4,13
9,6	26,93 ± 5,62	19,47 ± 5,49	9,51 ± 2,56	39,46 ± 8,96	18,19 ± 4,32
9,8	27,26 ± 5,28	20,64 ± 5,99	10,47 ± 2,76	40,54 ± 9,22	19,12 ± 4,51
10	27,43 ± 5,00	21,78 ± 6,45	11,44 ± 2,97	41,55 ± 9,48	20,09 ± 4,71

TABLEAU C.13 – Nombre moyen de photo-électrons pour les réactions simulés dans le  $\text{CF}_4$  pur.

$En$ (MeV)	$^{19}\text{F}(n,p)$	$^{19}\text{F}(n,d)$	$^{19}\text{F}(n,t)$	$^{19}\text{F}(n,\alpha)$	$^{12}\text{C}(n,\alpha)$	$^{16}\text{O}(n,\alpha)$
1,8				$0,73 \pm 0,49$		
2				$1,23 \pm 0,65$		
2,2				$1,71 \pm 0,79$		
2,4				$2,17 \pm 0,91$		$0,51 \pm 0,39$
2,6				$2,62 \pm 1,02$		$1,01 \pm 0,58$
2,8				$3,07 \pm 1,13$		$1,49 \pm 0,73$
3				$3,51 \pm 1,24$		$1,96 \pm 0,86$
3,2				$3,95 \pm 1,34$		$2,42 \pm 0,97$
3,4				$4,40 \pm 1,44$		$2,87 \pm 1,09$
3,6				$4,84 \pm 1,54$		$3,31 \pm 1,19$
3,8				$5,28 \pm 1,64$		$3,75 \pm 1,29$
4				$5,73 \pm 1,74$		$4,19 \pm 1,40$
4,2				$6,19 \pm 1,83$		$4,63 \pm 1,50$
4,4	$0,96 \pm 0,57$			$6,66 \pm 1,93$		$5,08 \pm 1,59$
4,6	$1,42 \pm 0,71$			$7,12 \pm 2,03$		$5,52 \pm 1,69$
4,8	$1,88 \pm 0,84$			$7,59 \pm 2,13$		$5,98 \pm 1,79$
5	$2,35 \pm 0,96$			$8,06 \pm 2,23$		$6,43 \pm 1,88$
5,2	$2,83 \pm 1,08$			$8,53 \pm 2,33$		$6,88 \pm 1,98$
5,4	$3,32 \pm 1,19$			$9,00 \pm 2,42$		$7,35 \pm 2,08$
5,6	$3,79 \pm 1,30$			$9,47 \pm 2,52$		$7,82 \pm 2,18$
5,8	$4,28 \pm 1,42$			$9,95 \pm 2,62$		$8,28 \pm 2,28$
6	$4,76 \pm 1,55$			$10,42 \pm 2,72$		$8,75 \pm 2,37$
6,2	$5,26 \pm 1,69$	$1,12 \pm 0,62$		$10,89 \pm 2,82$	$1,28 \pm 0,67$	$9,22 \pm 2,47$
6,4	$5,77 \pm 1,85$	$1,57 \pm 0,76$		$11,35 \pm 2,91$	$1,76 \pm 0,80$	$9,68 \pm 2,56$
6,6	$6,29 \pm 2,03$	$2,01 \pm 0,88$		$11,83 \pm 3,02$	$2,21 \pm 0,92$	$10,16 \pm 2,67$
6,8	$6,82 \pm 2,25$	$2,45 \pm 0,99$		$12,30 \pm 3,12$	$2,67 \pm 1,04$	$10,63 \pm 2,76$
7	$7,36 \pm 2,50$	$2,89 \pm 1,10$		$12,76 \pm 3,21$	$3,11 \pm 1,15$	$11,10 \pm 2,86$
7,2	$7,89 \pm 2,72$	$3,36 \pm 1,21$		$13,24 \pm 3,32$	$3,56 \pm 1,25$	$11,56 \pm 2,96$
7,4	$8,41 \pm 2,91$	$3,83 \pm 1,31$		$13,70 \pm 3,41$	$4,00 \pm 1,35$	$12,03 \pm 3,05$
7,6	$8,92 \pm 3,08$	$4,31 \pm 1,43$		$14,18 \pm 3,52$	$4,44 \pm 1,45$	$12,50 \pm 3,15$
7,8	$9,42 \pm 3,24$	$4,80 \pm 1,54$		$14,64 \pm 3,61$	$4,88 \pm 1,55$	$12,97 \pm 3,25$
8	$9,91 \pm 3,37$	$5,29 \pm 1,65$	$1,16 \pm 0,64$	$15,11 \pm 3,72$	$5,32 \pm 1,65$	$13,43 \pm 3,35$
8,2	$10,37 \pm 3,48$	$5,78 \pm 1,77$	$1,61 \pm 0,77$	$15,58 \pm 3,83$	$5,77 \pm 1,74$	$13,90 \pm 3,45$
8,4	$10,80 \pm 3,55$	$6,28 \pm 1,89$	$2,05 \pm 0,89$	$16,05 \pm 3,93$	$6,22 \pm 1,84$	$14,37 \pm 3,55$
8,6	$11,16 \pm 3,52$	$6,78 \pm 2,03$	$2,48 \pm 1,00$	$16,53 \pm 4,04$	$6,68 \pm 1,94$	$14,84 \pm 3,65$
8,8	$11,48 \pm 3,45$	$7,29 \pm 2,16$	$2,91 \pm 1,10$	$17,00 \pm 4,14$	$7,13 \pm 2,03$	$15,30 \pm 3,75$
9	$11,80 \pm 3,33$	$7,80 \pm 2,32$	$3,35 \pm 1,21$	$17,48 \pm 4,26$	$7,59 \pm 2,13$	$15,77 \pm 3,85$
9,2	$12,10 \pm 3,19$	$8,32 \pm 2,49$	$3,79 \pm 1,31$	$17,95 \pm 4,37$	$8,04 \pm 2,23$	$16,24 \pm 3,95$
9,4	$12,33 \pm 3,03$	$8,84 \pm 2,69$	$4,24 \pm 1,41$	$18,43 \pm 4,49$	$8,50 \pm 2,32$	$16,70 \pm 4,06$
9,6	$12,49 \pm 2,87$	$9,38 \pm 2,91$	$4,70 \pm 1,52$	$18,90 \pm 4,60$	$8,96 \pm 2,42$	$17,19 \pm 4,17$
9,8	$12,58 \pm 2,76$	$9,92 \pm 3,14$	$5,16 \pm 1,62$	$19,36 \pm 4,72$	$9,42 \pm 2,51$	$17,64 \pm 4,27$
10	$12,63 \pm 2,64$	$10,45 \pm 3,36$	$5,64 \pm 1,73$	$19,85 \pm 4,85$	$9,88 \pm 2,61$	$18,13 \pm 4,38$

TABLEAU C.14 – Nombre moyen de photo-électrons pour les réactions simulés dans le mélange gazeux (97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ ).

$En$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,p)$	$^{19}\text{F}(n,d)$	$^{19}\text{F}(n,t)$	$^{19}\text{F}(n,\alpha)$	$^{12}\text{C}(n,\alpha)$
1,8				$3,18 \pm 1,41$	
2				$4,60 \pm 1,93$	
2,2				$5,94 \pm 2,41$	
2,4				$7,25 \pm 2,87$	
2,6				$8,53 \pm 3,33$	
2,8				$9,80 \pm 3,78$	
3				$11,06 \pm 4,22$	
3,2				$12,30 \pm 4,67$	
3,4				$13,55 \pm 5,11$	
3,6				$14,83 \pm 5,56$	
3,8				$16,08 \pm 6,01$	
4				$17,33 \pm 6,45$	
4,2				$18,63 \pm 6,91$	
4,4	$3,72 \pm 1,64$			$19,92 \pm 7,38$	
4,6	$5,06 \pm 2,12$			$21,24 \pm 7,84$	
4,8	$6,40 \pm 2,60$			$22,56 \pm 8,30$	
5	$7,79 \pm 3,07$			$23,90 \pm 8,78$	
5,2	$9,23 \pm 3,56$			$25,23 \pm 9,26$	
5,4	$10,70 \pm 4,08$			$26,62 \pm 9,76$	
5,6	$12,19 \pm 4,61$			$27,96 \pm 10,22$	
5,8	$13,74 \pm 5,21$			$29,38 \pm 10,75$	
6	$15,34 \pm 5,87$			$30,75 \pm 11,24$	
6,2	$17,08 \pm 6,68$	$4,20 \pm 1,81$		$32,13 \pm 11,75$	$4,80 \pm 2,00$
6,4	$18,91 \pm 7,66$	$5,52 \pm 2,29$		$33,55 \pm 12,23$	$6,11 \pm 2,47$
6,6	$20,92 \pm 8,84$	$6,81 \pm 2,74$		$34,91 \pm 12,75$	$7,41 \pm 2,93$
6,8	$23,14 \pm 10,36$	$8,09 \pm 3,20$		$36,34 \pm 13,27$	$8,71 \pm 3,39$
7	$25,47 \pm 12,03$	$9,37 \pm 3,65$		$37,76 \pm 13,80$	$9,97 \pm 3,84$
7,2	$27,85 \pm 13,48$	$10,70 \pm 4,11$		$39,18 \pm 14,32$	$11,22 \pm 4,28$
7,4	$30,00 \pm 14,55$	$12,06 \pm 4,59$		$40,61 \pm 14,87$	$12,47 \pm 4,72$
7,6	$32,12 \pm 15,41$	$13,46 \pm 5,08$		$42,04 \pm 15,39$	$13,71 \pm 5,16$
7,8	$34,14 \pm 16,23$	$14,93 \pm 5,61$		$43,51 \pm 15,97$	$14,96 \pm 5,62$
8	$36,01 \pm 17,00$	$16,42 \pm 6,16$	$4,31 \pm 1,85$	$44,93 \pm 16,48$	$16,23 \pm 6,06$
8,2	$37,72 \pm 17,56$	$17,95 \pm 6,76$	$5,62 \pm 2,32$	$46,30 \pm 17,07$	$17,49 \pm 6,50$
8,4	$39,19 \pm 17,97$	$19,56 \pm 7,42$	$6,90 \pm 2,77$	$47,91 \pm 17,63$	$18,74 \pm 6,94$
8,6	$39,94 \pm 17,70$	$21,21 \pm 8,17$	$8,18 \pm 3,23$	$49,39 \pm 18,25$	$20,02 \pm 7,40$
8,8	$40,39 \pm 17,01$	$22,92 \pm 8,99$	$9,44 \pm 3,66$	$50,89 \pm 18,86$	$21,33 \pm 7,86$
9	$40,78 \pm 16,10$	$24,75 \pm 9,93$	$10,71 \pm 4,11$	$52,40 \pm 19,54$	$22,62 \pm 8,31$
9,2	$40,85 \pm 14,61$	$26,67 \pm 11,01$	$11,99 \pm 4,56$	$53,92 \pm 20,13$	$23,90 \pm 8,77$
9,4	$40,63 \pm 12,88$	$28,71 \pm 12,29$	$13,28 \pm 5,02$	$55,44 \pm 20,79$	$25,20 \pm 9,23$
9,6	$40,53 \pm 11,48$	$30,92 \pm 13,83$	$14,63 \pm 5,49$	$57,01 \pm 21,48$	$26,55 \pm 9,71$
9,8	$40,20 \pm 10,04$	$33,20 \pm 15,36$	$15,99 \pm 5,98$	$58,65 \pm 22,18$	$27,82 \pm 10,18$
10	$39,81 \pm 8,81$	$35,42 \pm 16,71$	$17,37 \pm 6,48$	$60,20 \pm 22,88$	$29,15 \pm 10,63$

TABLEAU C.15 – Nombre moyen de photo-électrons (pour le photo-multiplicateur recevant le plus de lumières) pour les réactions simulés dans le  $\text{CF}_4$  pur.

$En$ (MeV)	$^{19}\text{F}(n,p)$	$^{19}\text{F}(n,d)$	$^{19}\text{F}(n,t)$	$^{19}\text{F}(n,\alpha)$	$^{12}\text{C}(n,\alpha)$	$^{16}\text{O}(n,\alpha)$
1,8				$1,97 \pm 0,93$		
2				$2,79 \pm 1,26$		
2,2				$3,52 \pm 1,53$		
2,4				$4,21 \pm 1,78$		$1,57 \pm 0,73$
2,6				$4,87 \pm 2,01$		$2,42 \pm 1,11$
2,8				$5,52 \pm 2,24$		$3,19 \pm 1,40$
3				$6,17 \pm 2,48$		$3,90 \pm 1,66$
3,2				$6,80 \pm 2,70$		$4,57 \pm 1,91$
3,4				$7,43 \pm 2,92$		$5,24 \pm 2,14$
3,6				$8,05 \pm 3,14$		$5,88 \pm 2,38$
3,8				$8,68 \pm 3,37$		$6,50 \pm 2,59$
4				$9,32 \pm 3,58$		$7,14 \pm 2,82$
4,2				$9,95 \pm 3,81$		$7,76 \pm 3,04$
4,4	$2,34 \pm 1,11$			$10,61 \pm 4,03$		$8,39 \pm 3,26$
4,6	$3,07 \pm 1,39$			$11,25 \pm 4,26$		$9,01 \pm 3,47$
4,8	$3,77 \pm 1,64$			$11,92 \pm 4,48$		$9,65 \pm 3,70$
5	$4,49 \pm 1,88$			$12,58 \pm 4,72$		$10,29 \pm 3,92$
5,2	$5,20 \pm 2,12$			$13,23 \pm 4,94$		$10,93 \pm 4,15$
5,4	$5,91 \pm 2,36$			$13,89 \pm 5,16$		$11,58 \pm 4,37$
5,6	$6,62 \pm 2,61$			$14,55 \pm 5,39$		$12,23 \pm 4,60$
5,8	$7,35 \pm 2,88$			$15,22 \pm 5,63$		$12,88 \pm 4,82$
6	$8,10 \pm 3,20$			$15,87 \pm 5,88$		$13,53 \pm 5,04$
6,2	$8,91 \pm 3,56$	$2,61 \pm 1,21$		$16,54 \pm 6,10$	$2,87 \pm 1,28$	$14,19 \pm 5,26$
6,4	$9,77 \pm 4,00$	$3,31 \pm 1,48$		$17,18 \pm 6,32$	$3,60 \pm 1,56$	$14,82 \pm 5,49$
6,6	$10,72 \pm 4,56$	$3,98 \pm 1,72$		$17,86 \pm 6,57$	$4,27 \pm 1,80$	$15,51 \pm 5,73$
6,8	$11,73 \pm 5,25$	$4,62 \pm 1,95$		$18,54 \pm 6,81$	$4,95 \pm 2,04$	$16,16 \pm 5,96$
7	$12,81 \pm 6,01$	$5,28 \pm 2,19$		$19,18 \pm 7,04$	$5,59 \pm 2,27$	$16,81 \pm 6,18$
7,2	$13,88 \pm 6,67$	$5,95 \pm 2,42$		$19,87 \pm 7,30$	$6,23 \pm 2,51$	$17,47 \pm 6,42$
7,4	$14,86 \pm 7,13$	$6,63 \pm 2,64$		$20,52 \pm 7,53$	$6,86 \pm 2,72$	$18,14 \pm 6,64$
7,6	$15,81 \pm 7,55$	$7,34 \pm 2,89$		$21,21 \pm 7,78$	$7,49 \pm 2,95$	$18,78 \pm 6,89$
7,8	$16,73 \pm 7,93$	$8,05 \pm 3,15$		$21,87 \pm 8,02$	$8,12 \pm 3,16$	$19,44 \pm 7,12$
8	$17,60 \pm 8,24$	$8,77 \pm 3,42$	$2,67 \pm 1,23$	$22,54 \pm 8,30$	$8,74 \pm 3,39$	$20,11 \pm 7,35$
8,2	$18,34 \pm 8,50$	$9,51 \pm 3,69$	$3,36 \pm 1,49$	$23,23 \pm 8,55$	$9,37 \pm 3,60$	$20,76 \pm 7,60$
8,4	$18,94 \pm 8,64$	$10,27 \pm 4,00$	$4,03 \pm 1,74$	$23,91 \pm 8,82$	$10,00 \pm 3,82$	$21,43 \pm 7,84$
8,6	$19,25 \pm 8,43$	$11,06 \pm 4,34$	$4,67 \pm 1,97$	$24,61 \pm 9,10$	$10,64 \pm 4,04$	$22,11 \pm 8,08$
8,8	$19,43 \pm 8,14$	$11,87 \pm 4,71$	$5,30 \pm 2,20$	$25,30 \pm 9,37$	$11,26 \pm 4,25$	$22,77 \pm 8,35$
9	$19,56 \pm 7,57$	$12,73 \pm 5,15$	$5,93 \pm 2,42$	$26,03 \pm 9,66$	$11,91 \pm 4,48$	$23,44 \pm 8,59$
9,2	$19,60 \pm 6,95$	$13,64 \pm 5,66$	$6,57 \pm 2,65$	$26,72 \pm 9,96$	$12,54 \pm 4,70$	$24,12 \pm 8,86$
9,4	$19,55 \pm 6,21$	$14,58 \pm 6,27$	$7,22 \pm 2,87$	$27,46 \pm 10,26$	$13,19 \pm 4,94$	$24,80 \pm 9,12$
9,6	$19,37 \pm 5,50$	$15,63 \pm 6,98$	$7,88 \pm 3,11$	$28,16 \pm 10,55$	$13,82 \pm 5,13$	$25,52 \pm 9,39$
9,8	$19,23 \pm 4,98$	$16,69 \pm 7,67$	$8,55 \pm 3,33$	$28,87 \pm 10,91$	$14,46 \pm 5,37$	$26,17 \pm 9,66$
10	$19,01 \pm 4,45$	$17,72 \pm 8,31$	$9,24 \pm 3,58$	$29,63 \pm 11,25$	$15,10 \pm 5,59$	$26,89 \pm 9,93$

TABLEAU C.16 – Nombre moyen de photo-électrons (pour le photo-multiplicateur recevant le plus de lumières) pour les réactions simulés dans le mélange gazeux (97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ ).

$En$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,p)$ ( ns)	$^{19}\text{F}(n,d)$ ( ns)	$^{19}\text{F}(n,t)$ ( ns)	$^{19}\text{F}(n,\alpha)$ ( ns)	$^{12}\text{C}(n,\alpha)$ ( ns)
1,8				0,845	
2				0,893	
2,2				0,892	
2,4				0,849	
2,6				0,793	
2,8				0,737	
3				0,688	
3,2				0,646	
3,4				0,608	
3,6				0,578	
3,8				0,549	
4				0,526	
4,2				0,504	
4,4	0,863			0,484	
4,6	0,898			0,467	
4,8	0,879			0,451	
5	0,832			0,437	
5,2	0,783			0,425	
5,4	0,742			0,414	
5,6	0,715			0,403	
5,8	0,695			0,395	
6	0,686			0,387	
6,2	0,684	0,885		0,380	0,897
6,4	0,686	0,901		0,374	0,891
6,6	0,690	0,872		0,369	0,846
6,8	0,694	0,824		0,363	0,787
7	0,702	0,779		0,359	0,732
7,2	0,707	0,737		0,355	0,683
7,4	0,714	0,706		0,351	0,640
7,6	0,720	0,681		0,349	0,606
7,8	0,725	0,664		0,346	0,573
8	0,727	0,654	0,890	0,344	0,546
8,2	0,728	0,646	0,903	0,341	0,523
8,4	0,723	0,642	0,877	0,338	0,500
8,6	0,709	0,640	0,829	0,337	0,480
8,8	0,688	0,640	0,780	0,336	0,462
9	0,668	0,640	0,739	0,334	0,447
9,2	0,644	0,641	0,705	0,333	0,431
9,4	0,625	0,641	0,680	0,332	0,419
9,6	0,611	0,643	0,658	0,331	0,407
9,8	0,601	0,645	0,644	0,330	0,397
10	0,594	0,645	0,634	0,330	0,388

TABLEAU C.17 – Valeur moyenne des CRT (Coïncidence Resolving Time) pour les réactions simulés dans le  $\text{CF}_4$  pur.

$En$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,p)$ ( ns)	$^{19}\text{F}(n,d)$ ( ns)	$^{19}\text{F}(n,t)$ ( ns)	$^{19}\text{F}(n,\alpha)$ ( ns)	$^{12}\text{C}(n,\alpha)$ ( ns)	$^{16}\text{O}(n,\alpha)$ ( ns)
1,8				0,818		
2				0,871		
2,2				0,917		
2,4				0,956		0,786
2,6				0,991		0,850
2,8				1,005		0,901
3				0,999		0,942
3,2				0,987		0,974
3,4				0,964		0,997
3,6				0,936		1,007
3,8				0,909		0,998
4				0,878		0,970
4,2				0,849		0,950
4,4	0,839			0,822		0,921
4,6	0,890			0,795		0,890
4,8	0,936			0,768		0,859
5	0,984			0,748		0,834
5,2	1,024			0,728		0,806
5,4	1,055			0,709		0,779
5,6	1,082			0,691		0,757
5,8	1,093			0,677		0,736
6	1,104			0,664		0,714
6,2	1,121	0,860		0,651	0,877	0,696
6,4	1,131	0,912		0,639	0,929	0,682
6,6	1,153	0,954		0,628	0,963	0,666
6,8	1,172	1,000		0,618	0,989	0,652
7	1,191	1,027		0,610	1,004	0,641
7,2	1,209	1,048		0,603	1,004	0,630
7,4	1,228	1,058		0,597	0,987	0,619
7,6	1,246	1,060		0,590	0,963	0,610
7,8	1,261	1,058		0,585	0,936	0,601
8	1,271	1,059	0,864	0,581	0,902	0,594
8,2	1,269	1,055	0,919	0,575	0,876	0,588
8,4	1,280	1,055	0,969	0,571	0,847	0,581
8,6	1,251	1,062	1,007	0,568	0,819	0,576
8,8	1,216	1,066	1,036	0,565	0,792	0,569
9	1,196	1,072	1,054	0,563	0,768	0,566
9,2	1,140	1,075	1,062	0,561	0,745	0,561
9,4	1,133	1,083	1,056	0,558	0,722	0,558
9,6	1,121	1,093	1,052	0,556	0,706	0,554
9,8	1,102	1,100	1,041	0,555	0,688	0,551
10	1,120	1,107	1,040	0,553	0,669	0,548

TABLEAU C.18 – Valeur moyenne des CRT (Coïncidence Resolving Time) pour les réactions simulés dans le mélange gazeux (97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ ).

$E_n$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,p)$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,d)$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,t)$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,\alpha)$ ( MeV)	$^{12}\text{C}(n,\alpha)$ ( MeV)
1,8				0,275 ± 0,000	
2				0,475 ± 0,000	
2,2				0,675 ± 0,001	
2,4				0,875 ± 0,001	
2,6				1,075 ± 0,001	
2,8				1,275 ± 0,002	
3				1,475 ± 0,002	
3,2				1,675 ± 0,002	
3,4				1,875 ± 0,003	
3,6				2,075 ± 0,003	
3,8				2,275 ± 0,003	
4				2,475 ± 0,004	
4,2				2,675 ± 0,004	
4,4	0,360 ± 0,000			2,875 ± 0,005	
4,6	0,560 ± 0,001			3,075 ± 0,005	
4,8	0,760 ± 0,001			3,275 ± 0,005	
5	0,960 ± 0,001			3,475 ± 0,006	
5,2	1,160 ± 0,001			3,675 ± 0,006	
5,4	1,360 ± 0,002			3,875 ± 0,007	
5,6	1,560 ± 0,002			4,075 ± 0,007	
5,8	1,760 ± 0,003			4,275 ± 0,008	
6	1,960 ± 0,003			4,475 ± 0,008	
6,2	2,160 ± 0,003	0,429 ± 0,000		4,675 ± 0,009	0,500 ± 0,000
6,4	2,360 ± 0,004	0,629 ± 0,001		4,875 ± 0,009	0,700 ± 0,001
6,6	2,560 ± 0,004	0,829 ± 0,001		5,075 ± 0,010	0,900 ± 0,001
6,8	2,760 ± 0,005	1,029 ± 0,001		5,275 ± 0,010	1,100 ± 0,001
7	2,960 ± 0,007	1,229 ± 0,002		5,475 ± 0,011	1,299 ± 0,002
7,2	3,160 ± 0,009	1,429 ± 0,002		5,675 ± 0,011	1,499 ± 0,002
7,4	3,359 ± 0,012	1,629 ± 0,002		5,875 ± 0,012	1,699 ± 0,002
7,6	3,559 ± 0,014	1,829 ± 0,003		6,075 ± 0,012	1,899 ± 0,003
7,8	3,758 ± 0,017	2,029 ± 0,003		6,274 ± 0,013	2,099 ± 0,003
8	3,957 ± 0,021	2,229 ± 0,004	0,443 ± 0,001	6,474 ± 0,014	2,299 ± 0,004
8,2	4,156 ± 0,024	2,429 ± 0,004	0,643 ± 0,001	6,674 ± 0,015	2,499 ± 0,004
8,4	4,355 ± 0,028	2,629 ± 0,005	0,843 ± 0,001	6,874 ± 0,015	2,699 ± 0,005
8,6	4,553 ± 0,032	2,829 ± 0,005	1,043 ± 0,001	7,074 ± 0,015	2,899 ± 0,005
8,8	4,752 ± 0,036	3,029 ± 0,006	1,243 ± 0,002	7,274 ± 0,016	3,099 ± 0,005
9	4,951 ± 0,038	3,229 ± 0,007	1,443 ± 0,002	7,474 ± 0,017	3,299 ± 0,006
9,2	5,150 ± 0,041	3,429 ± 0,007	1,643 ± 0,003	7,674 ± 0,018	3,499 ± 0,006
9,4	5,350 ± 0,042	3,629 ± 0,008	1,843 ± 0,003	7,874 ± 0,018	3,699 ± 0,007
9,6	5,549 ± 0,046	3,829 ± 0,009	2,043 ± 0,004	8,074 ± 0,019	3,899 ± 0,008
9,8	5,748 ± 0,048	4,029 ± 0,010	2,243 ± 0,004	8,274 ± 0,020	4,099 ± 0,008
10	5,946 ± 0,052	4,228 ± 0,013	2,443 ± 0,005	8,474 ± 0,020	4,299 ± 0,008

TABLEAU C.19 – Énergie déposée dans le volume utile pour les réactions simulés dans le  $\text{CF}_4$  pur.

$En$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,p)$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,d)$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,t)$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,\alpha)$ ( MeV)	$^{12}\text{C}(n,\alpha)$ ( MeV)	$^{16}\text{O}(n,\alpha)$ ( MeV)
1,8				0,275 ± 0,000		
2				0,475 ± 0,000		
2,2				0,675 ± 0,001		
2,4				0,875 ± 0,001		0,184 ± 0,000
2,6				1,075 ± 0,001		0,384 ± 0,000
2,8				1,275 ± 0,002		0,584 ± 0,001
3				1,475 ± 0,002		0,784 ± 0,001
3,2				1,675 ± 0,002		0,984 ± 0,001
3,4				1,875 ± 0,002		1,184 ± 0,001
3,6				2,075 ± 0,003		1,384 ± 0,002
3,8				2,275 ± 0,003		1,584 ± 0,002
4				2,475 ± 0,004		1,784 ± 0,002
4,2				2,675 ± 0,004		1,984 ± 0,003
4,4	0,360 ± 0,000			2,875 ± 0,005		2,184 ± 0,003
4,6	0,560 ± 0,001			3,075 ± 0,005		2,384 ± 0,004
4,8	0,760 ± 0,001			3,275 ± 0,005		2,584 ± 0,004
5	0,960 ± 0,001			3,475 ± 0,006		2,784 ± 0,004
5,2	1,160 ± 0,001			3,675 ± 0,006		2,984 ± 0,005
5,4	1,360 ± 0,002			3,875 ± 0,007		3,184 ± 0,005
5,6	1,560 ± 0,002			4,075 ± 0,007		3,384 ± 0,006
5,8	1,760 ± 0,002			4,275 ± 0,008		3,584 ± 0,006
6	1,960 ± 0,003			4,475 ± 0,008		3,784 ± 0,007
6,2	2,160 ± 0,004	0,429 ± 0,000		4,675 ± 0,009	0,500 ± 0,000	3,984 ± 0,007
6,4	2,360 ± 0,004	0,629 ± 0,001		4,875 ± 0,009	0,700 ± 0,001	4,184 ± 0,008
6,6	2,560 ± 0,004	0,829 ± 0,001		5,075 ± 0,010	0,900 ± 0,001	4,384 ± 0,008
6,8	2,760 ± 0,005	1,029 ± 0,001		5,275 ± 0,010	1,100 ± 0,001	4,584 ± 0,009
7	2,960 ± 0,007	1,229 ± 0,002		5,475 ± 0,011	1,299 ± 0,002	4,784 ± 0,009
7,2	3,160 ± 0,009	1,429 ± 0,002		5,675 ± 0,012	1,499 ± 0,002	4,984 ± 0,010
7,4	3,359 ± 0,012	1,629 ± 0,003		5,875 ± 0,012	1,699 ± 0,002	5,184 ± 0,010
7,6	3,559 ± 0,015	1,829 ± 0,003		6,075 ± 0,013	1,899 ± 0,003	5,384 ± 0,011
7,8	3,758 ± 0,018	2,029 ± 0,003		6,274 ± 0,013	2,099 ± 0,003	5,584 ± 0,011
8	3,957 ± 0,021	2,229 ± 0,004	0,443 ± 0,001	6,474 ± 0,014	2,299 ± 0,004	5,784 ± 0,012
8,2	4,156 ± 0,025	2,429 ± 0,004	0,643 ± 0,001	6,674 ± 0,015	2,499 ± 0,004	5,984 ± 0,013
8,4	4,354 ± 0,029	2,629 ± 0,005	0,843 ± 0,001	6,874 ± 0,015	2,699 ± 0,005	6,183 ± 0,013
8,6	4,553 ± 0,033	2,829 ± 0,005	1,043 ± 0,002	7,074 ± 0,016	2,899 ± 0,005	6,383 ± 0,014
8,8	4,752 ± 0,036	3,029 ± 0,006	1,243 ± 0,002	7,274 ± 0,016	3,099 ± 0,005	6,583 ± 0,014
9	4,951 ± 0,039	3,229 ± 0,006	1,443 ± 0,002	7,474 ± 0,017	3,299 ± 0,006	6,783 ± 0,015
9,2	5,150 ± 0,042	3,429 ± 0,007	1,643 ± 0,003	7,674 ± 0,017	3,499 ± 0,006	6,983 ± 0,015
9,4	5,350 ± 0,043	3,629 ± 0,008	1,843 ± 0,003	7,874 ± 0,018	3,699 ± 0,007	7,183 ± 0,016
9,6	5,549 ± 0,045	3,829 ± 0,009	2,043 ± 0,004	8,074 ± 0,019	3,899 ± 0,007	7,383 ± 0,016
9,8	5,747 ± 0,049	4,028 ± 0,011	2,243 ± 0,004	8,274 ± 0,019	4,099 ± 0,008	7,583 ± 0,017
10	5,945 ± 0,054	4,228 ± 0,014	2,443 ± 0,004	8,474 ± 0,020	4,299 ± 0,008	7,783 ± 0,018

TABLEAU C.20 – Énergie déposée dans le volume utile pour les réactions simulés dans le mélange gazeux (97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ ).

$En$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,p)$ ( ns)	$^{19}\text{F}(n,d)$ ( ns)	$^{19}\text{F}(n,t)$ ( ns)	$^{19}\text{F}(n,\alpha)$ ( ns)	$^{12}\text{C}(n,\alpha)$ ( ns)
1,8				265,77 ± 1,96	
2				252,13 ± 1,85	
2,2				240,38 ± 1,77	
2,4				230,15 ± 1,69	
2,6				221,11 ± 1,63	
2,8				213,07 ± 1,57	
3				205,84 ± 1,51	
3,2				199,29 ± 1,46	
3,4				193,34 ± 1,42	
3,6				187,90 ± 1,38	
3,8				182,88 ± 1,34	
4				178,25 ± 1,31	
4,2				173,95 ± 1,27	
4,4	169,98 ± 1,25			169,95 ± 1,24	
4,6	166,24 ± 1,22			166,21 ± 1,21	
4,8	162,73 ± 1,19			162,71 ± 1,19	
5	159,44 ± 1,16			159,42 ± 1,16	
5,2	156,33 ± 1,13			156,32 ± 1,14	
5,4	153,40 ± 1,10			153,40 ± 1,12	
5,6	150,63 ± 1,07			150,63 ± 1,09	
5,8	148,01 ± 1,04			148,01 ± 1,07	
6	145,51 ± 1,02			145,52 ± 1,05	
6,2	143,13 ± 0,99	143,19 ± 1,05		143,15 ± 1,03	143,20 ± 1,05
6,4	140,87 ± 0,97	140,93 ± 1,03		140,89 ± 1,02	140,93 ± 1,03
6,6	138,72 ± 0,95	138,77 ± 1,02		138,74 ± 1,00	138,77 ± 1,02
6,8	136,66 ± 0,93	136,71 ± 1,00		136,68 ± 0,98	136,72 ± 1,00
7	134,68 ± 0,92	134,74 ± 0,98		134,71 ± 0,97	134,74 ± 0,99
7,2	132,80 ± 0,90	132,85 ± 0,96		132,83 ± 0,95	132,86 ± 0,97
7,4	130,99 ± 0,89	131,03 ± 0,94		131,02 ± 0,94	131,05 ± 0,96
7,6	129,26 ± 0,88	129,29 ± 0,93		129,28 ± 0,92	129,31 ± 0,95
7,8	127,60 ± 0,87	127,62 ± 0,91		127,61 ± 0,91	127,64 ± 0,94
8	126,00 ± 0,87	126,00 ± 0,89	126,06 ± 0,93	126,01 ± 0,90	126,03 ± 0,92
8,2	124,48 ± 0,87	124,45 ± 0,88	124,50 ± 0,91	124,45 ± 0,89	124,48 ± 0,91
8,4	123,04 ± 0,87	122,96 ± 0,86	123,01 ± 0,90	122,96 ± 0,87	122,99 ± 0,90
8,6	121,67 ± 0,88	121,51 ± 0,85	121,57 ± 0,89	121,52 ± 0,86	121,55 ± 0,89
8,8	120,36 ± 0,88	120,12 ± 0,83	120,17 ± 0,87	120,13 ± 0,85	120,16 ± 0,88
9	119,15 ± 0,86	118,77 ± 0,82	118,82 ± 0,86	118,79 ± 0,84	118,81 ± 0,87
9,2	118,02 ± 0,79	117,47 ± 0,81	117,52 ± 0,85	117,49 ± 0,83	117,51 ± 0,86
9,4	116,95 ± 0,65	116,21 ± 0,80	116,26 ± 0,84	116,23 ± 0,82	116,25 ± 0,85
9,6	115,89 ± 0,49	114,99 ± 0,79	115,03 ± 0,82	115,01 ± 0,81	115,03 ± 0,83
9,8	114,82 ± 0,36	113,80 ± 0,78	113,85 ± 0,81	113,83 ± 0,80	113,85 ± 0,83
10	113,75 ± 0,28	112,66 ± 0,77	112,70 ± 0,80	112,68 ± 0,79	112,70 ± 0,82

TABLEAU C.21 – Temps de vol estimé pour les réactions simulés dans le CF<sub>4</sub> pur.

$En$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,p)$ ( ns)	$^{19}\text{F}(n,d)$ ( ns)	$^{19}\text{F}(n,t)$ ( ns)	$^{19}\text{F}(n,\alpha)$ ( ns)	$^{12}\text{C}(n,\alpha)$ ( ns)	$^{16}\text{O}(n,\alpha)$ ( ns)
1,8				265,77 ± 1,95		
2				252,13 ± 1,85		
2,2				240,39 ± 1,76		
2,4				230,16 ± 1,69		230,20 ± 1,68
2,6				221,12 ± 1,62		221,13 ± 1,62
2,8				213,08 ± 1,56		213,08 ± 1,56
3				205,85 ± 1,51		205,86 ± 1,51
3,2				199,31 ± 1,46		199,32 ± 1,46
3,4				193,35 ± 1,41		193,36 ± 1,42
3,6				187,90 ± 1,37		187,91 ± 1,38
3,8				182,89 ± 1,34		182,89 ± 1,34
4				178,26 ± 1,30		178,26 ± 1,30
4,2				173,96 ± 1,27		173,96 ± 1,27
4,4	169,99 ± 1,25			169,96 ± 1,24		169,96 ± 1,24
4,6	166,25 ± 1,22			166,22 ± 1,21		166,22 ± 1,21
4,8	162,74 ± 1,19			162,71 ± 1,18		162,72 ± 1,19
5	159,44 ± 1,15			159,43 ± 1,16		159,43 ± 1,16
5,2	156,34 ± 1,12			156,33 ± 1,13		156,33 ± 1,14
5,4	153,41 ± 1,09			153,40 ± 1,11		153,41 ± 1,12
5,6	150,64 ± 1,07			150,64 ± 1,09		150,64 ± 1,09
5,8	148,01 ± 1,04			148,02 ± 1,07		148,02 ± 1,07
6	145,51 ± 1,01			145,52 ± 1,05		145,53 ± 1,06
6,2	143,14 ± 0,99	143,20 ± 1,05		143,15 ± 1,03	143,19 ± 1,05	143,16 ± 1,04
6,4	140,88 ± 0,97	140,94 ± 1,03		140,90 ± 1,01	140,94 ± 1,03	140,90 ± 1,02
6,6	138,72 ± 0,95	138,78 ± 1,01		138,75 ± 1,00	138,78 ± 1,02	138,75 ± 1,00
6,8	136,66 ± 0,93	136,72 ± 0,99		136,69 ± 0,98	136,72 ± 1,00	136,69 ± 0,99
7	134,69 ± 0,91	134,74 ± 0,98		134,72 ± 0,97	134,75 ± 0,99	134,72 ± 0,97
7,2	132,80 ± 0,90	132,85 ± 0,96		132,84 ± 0,95	132,86 ± 0,97	132,84 ± 0,96
7,4	131,00 ± 0,89	131,04 ± 0,94		131,02 ± 0,93	131,05 ± 0,96	131,03 ± 0,94
7,6	129,26 ± 0,88	129,30 ± 0,92		129,29 ± 0,92	129,31 ± 0,94	129,29 ± 0,93
7,8	127,60 ± 0,87	127,62 ± 0,90		127,62 ± 0,91	127,65 ± 0,93	127,62 ± 0,91
8	126,02 ± 0,87	126,01 ± 0,89	126,06 ± 0,93	126,01 ± 0,89	126,03 ± 0,92	126,01 ± 0,90
8,2	124,49 ± 0,87	124,46 ± 0,87	124,51 ± 0,91	124,46 ± 0,88	124,49 ± 0,91	124,46 ± 0,89
8,4	123,05 ± 0,88	122,96 ± 0,86	123,01 ± 0,90	122,97 ± 0,87	122,99 ± 0,90	122,97 ± 0,88
8,6	121,67 ± 0,88	121,52 ± 0,84	121,57 ± 0,88	121,53 ± 0,86	121,55 ± 0,88	121,53 ± 0,86
8,8	120,38 ± 0,88	120,13 ± 0,83	120,17 ± 0,87	120,14 ± 0,85	120,16 ± 0,87	120,14 ± 0,85
9	119,18 ± 0,86	118,78 ± 0,82	118,83 ± 0,86	118,79 ± 0,84	118,82 ± 0,86	118,79 ± 0,84
9,2	118,06 ± 0,77	117,48 ± 0,80	117,52 ± 0,85	117,49 ± 0,83	117,52 ± 0,85	117,49 ± 0,83
9,4	116,99 ± 0,62	116,21 ± 0,79	116,26 ± 0,83	116,24 ± 0,82	116,26 ± 0,84	116,23 ± 0,82
9,6	115,92 ± 0,47	114,99 ± 0,78	115,04 ± 0,82	115,02 ± 0,81	115,04 ± 0,83	115,02 ± 0,81
9,8	114,84 ± 0,35	113,81 ± 0,77	113,85 ± 0,81	113,83 ± 0,80	113,85 ± 0,82	113,83 ± 0,80
10	113,77 ± 0,27	112,66 ± 0,76	112,70 ± 0,80	112,69 ± 0,79	112,71 ± 0,81	112,69 ± 0,79

TABLEAU C.22 – Temps de vol estimé pour les réactions simulés dans le mélange gazeux (97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ ).

$En$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,p)$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,d)$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,t)$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,\alpha)$ ( MeV)	$^{12}\text{C}(n,\alpha)$ ( MeV)
1,8				$0,17 \pm 0,06$	
2				$0,32 \pm 0,09$	
2,2				$0,47 \pm 0,12$	
2,4				$0,63 \pm 0,14$	
2,6				$0,78 \pm 0,16$	
2,8				$0,94 \pm 0,18$	
3				$1,09 \pm 0,21$	
3,2				$1,24 \pm 0,23$	
3,4				$1,40 \pm 0,25$	
3,6				$1,55 \pm 0,27$	
3,8				$1,70 \pm 0,29$	
4				$1,86 \pm 0,31$	
4,2				$2,01 \pm 0,33$	
4,4	$0,14 \pm 0,04$			$2,17 \pm 0,35$	
4,6	$0,32 \pm 0,07$			$2,32 \pm 0,37$	
4,8	$0,50 \pm 0,09$			$2,47 \pm 0,39$	
5	$0,68 \pm 0,11$			$2,63 \pm 0,41$	
5,2	$0,87 \pm 0,12$			$2,78 \pm 0,43$	
5,4	$1,05 \pm 0,14$			$2,93 \pm 0,45$	
5,6	$1,23 \pm 0,15$			$3,09 \pm 0,47$	
5,8	$1,41 \pm 0,16$			$3,24 \pm 0,49$	
6	$1,59 \pm 0,18$			$3,39 \pm 0,52$	
6,2	$1,77 \pm 0,19$	$0,14 \pm 0,07$		$3,55 \pm 0,54$	$0,16 \pm 0,05$
6,4	$1,95 \pm 0,20$	$0,31 \pm 0,11$		$3,70 \pm 0,56$	$0,29 \pm 0,17$
6,6	$2,12 \pm 0,21$	$0,48 \pm 0,14$		$3,85 \pm 0,57$	$0,43 \pm 0,24$
6,8	$2,30 \pm 0,22$	$0,65 \pm 0,17$		$4,01 \pm 0,59$	$0,56 \pm 0,29$
7	$2,48 \pm 0,23$	$0,82 \pm 0,19$		$4,16 \pm 0,61$	$0,69 \pm 0,34$
7,2	$2,66 \pm 0,24$	$0,99 \pm 0,21$		$4,31 \pm 0,63$	$0,82 \pm 0,38$
7,4	$2,83 \pm 0,26$	$1,16 \pm 0,24$		$4,46 \pm 0,65$	$0,95 \pm 0,43$
7,6	$3,01 \pm 0,27$	$1,34 \pm 0,26$		$4,62 \pm 0,67$	$1,09 \pm 0,47$
7,8	$3,18 \pm 0,28$	$1,51 \pm 0,28$		$4,77 \pm 0,69$	$1,22 \pm 0,50$
8	$3,34 \pm 0,30$	$1,68 \pm 0,29$	$0,09 \pm 0,05$	$4,93 \pm 0,71$	$1,35 \pm 0,54$
8,2	$3,50 \pm 0,32$	$1,85 \pm 0,31$	$0,26 \pm 0,13$	$5,08 \pm 0,73$	$1,48 \pm 0,58$
8,4	$3,65 \pm 0,34$	$2,02 \pm 0,33$	$0,42 \pm 0,17$	$5,23 \pm 0,75$	$1,61 \pm 0,61$
8,6	$3,79 \pm 0,36$	$2,19 \pm 0,35$	$0,58 \pm 0,21$	$5,38 \pm 0,77$	$1,75 \pm 0,65$
8,8	$3,91 \pm 0,38$	$2,36 \pm 0,36$	$0,74 \pm 0,25$	$5,54 \pm 0,79$	$1,88 \pm 0,68$
9	$4,02 \pm 0,37$	$2,52 \pm 0,38$	$0,91 \pm 0,28$	$5,69 \pm 0,81$	$2,01 \pm 0,72$
9,2	$4,11 \pm 0,34$	$2,69 \pm 0,39$	$1,07 \pm 0,30$	$5,84 \pm 0,83$	$2,14 \pm 0,75$
9,4	$4,19 \pm 0,27$	$2,86 \pm 0,41$	$1,23 \pm 0,33$	$5,99 \pm 0,85$	$2,28 \pm 0,78$
9,6	$4,30 \pm 0,17$	$3,03 \pm 0,42$	$1,39 \pm 0,36$	$6,14 \pm 0,87$	$2,41 \pm 0,81$
9,8	$4,43 \pm 0,11$	$3,20 \pm 0,44$	$1,55 \pm 0,38$	$6,30 \pm 0,89$	$2,54 \pm 0,84$
10	$4,58 \pm 0,07$	$3,36 \pm 0,45$	$1,71 \pm 0,40$	$6,45 \pm 0,91$	$2,67 \pm 0,87$

TABLEAU C.23 – Énergie des particules émises (proton, deuteron, triton, alpha) pour les réactions simulés dans le  $\text{CF}_4$  pur.

$En$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,p)$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,d)$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,t)$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,\alpha)$ ( MeV)	$^{12}\text{C}(n,\alpha)$ ( MeV)	$^{16}\text{O}(n,\alpha)$ ( MeV)
1,8				0,17 ± 0,06		
2				0,32 ± 0,09		
2,2				0,47 ± 0,12		
2,4				0,63 ± 0,14		0,07 ± 0,04
2,6				0,78 ± 0,16		0,21 ± 0,09
2,8				0,94 ± 0,18		0,36 ± 0,13
3				1,09 ± 0,21		0,51 ± 0,16
3,2				1,24 ± 0,23		0,65 ± 0,19
3,4				1,40 ± 0,25		0,80 ± 0,22
3,6				1,55 ± 0,27		0,94 ± 0,24
3,8				1,70 ± 0,29		1,09 ± 0,27
4				1,86 ± 0,31		1,24 ± 0,30
4,2				2,01 ± 0,33		1,38 ± 0,32
4,4	0,14 ± 0,04			2,17 ± 0,35		1,53 ± 0,35
4,6	0,32 ± 0,07			2,32 ± 0,37		1,68 ± 0,37
4,8	0,50 ± 0,09			2,47 ± 0,39		1,82 ± 0,40
5	0,68 ± 0,11			2,63 ± 0,41		1,97 ± 0,42
5,2	0,87 ± 0,12			2,78 ± 0,43		2,12 ± 0,44
5,4	1,05 ± 0,14			2,93 ± 0,45		2,26 ± 0,47
5,6	1,23 ± 0,15			3,09 ± 0,47		2,41 ± 0,49
5,8	1,41 ± 0,16			3,24 ± 0,49		2,56 ± 0,51
6	1,59 ± 0,18			3,39 ± 0,52		2,70 ± 0,54
6,2	1,77 ± 0,19	0,14 ± 0,07		3,55 ± 0,53	0,16 ± 0,05	2,85 ± 0,56
6,4	1,95 ± 0,20	0,31 ± 0,11		3,70 ± 0,56	0,29 ± 0,17	2,99 ± 0,59
6,6	2,12 ± 0,21	0,48 ± 0,14		3,85 ± 0,57	0,43 ± 0,24	3,14 ± 0,61
6,8	2,30 ± 0,22	0,65 ± 0,17		4,01 ± 0,59	0,56 ± 0,29	3,28 ± 0,63
7	2,48 ± 0,23	0,82 ± 0,19		4,16 ± 0,61	0,69 ± 0,34	3,43 ± 0,65
7,2	2,66 ± 0,24	0,99 ± 0,21		4,31 ± 0,63	0,82 ± 0,38	3,57 ± 0,68
7,4	2,84 ± 0,26	1,16 ± 0,24		4,46 ± 0,65	0,95 ± 0,43	3,72 ± 0,70
7,6	3,01 ± 0,27	1,34 ± 0,26		4,62 ± 0,67	1,09 ± 0,47	3,87 ± 0,72
7,8	3,18 ± 0,29	1,51 ± 0,27		4,77 ± 0,69	1,22 ± 0,50	4,01 ± 0,75
8	3,34 ± 0,30	1,68 ± 0,29	0,09 ± 0,05	4,93 ± 0,71	1,35 ± 0,54	4,16 ± 0,77
8,2	3,50 ± 0,32	1,85 ± 0,31	0,26 ± 0,13	5,08 ± 0,73	1,48 ± 0,58	4,30 ± 0,79
8,4	3,65 ± 0,34	2,02 ± 0,33	0,42 ± 0,17	5,23 ± 0,75	1,61 ± 0,61	4,45 ± 0,82
8,6	3,79 ± 0,36	2,19 ± 0,35	0,58 ± 0,21	5,38 ± 0,77	1,75 ± 0,65	4,59 ± 0,84
8,8	3,91 ± 0,38	2,36 ± 0,36	0,74 ± 0,24	5,54 ± 0,79	1,88 ± 0,68	4,74 ± 0,86
9	4,01 ± 0,37	2,53 ± 0,38	0,90 ± 0,28	5,69 ± 0,81	2,01 ± 0,72	4,88 ± 0,88
9,2	4,09 ± 0,33	2,69 ± 0,39	1,07 ± 0,30	5,84 ± 0,83	2,14 ± 0,75	5,03 ± 0,90
9,4	4,18 ± 0,25	2,86 ± 0,41	1,23 ± 0,33	5,99 ± 0,85	2,28 ± 0,78	5,17 ± 0,93
9,6	4,29 ± 0,16	3,03 ± 0,42	1,39 ± 0,36	6,14 ± 0,87	2,41 ± 0,81	5,32 ± 0,95
9,8	4,43 ± 0,10	3,20 ± 0,44	1,55 ± 0,38	6,30 ± 0,89	2,54 ± 0,84	5,46 ± 0,97
10	4,58 ± 0,07	3,36 ± 0,45	1,71 ± 0,40	6,45 ± 0,91	2,67 ± 0,87	5,61 ± 1,00

TABLEAU C.24 – Énergie des particules émises (proton, deuteron, triton, alpha) pour les réactions simulés dans le mélange gazeux (97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ ).

$En$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,p)$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,d)$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,t)$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,\alpha)$ ( MeV)	$^{12}\text{C}(n,\alpha)$ ( MeV)
1,8				$0,11 \pm 0,06$	
2				$0,16 \pm 0,09$	
2,2				$0,20 \pm 0,12$	
2,4				$0,25 \pm 0,14$	
2,6				$0,29 \pm 0,16$	
2,8				$0,34 \pm 0,18$	
3				$0,39 \pm 0,21$	
3,2				$0,43 \pm 0,23$	
3,4				$0,48 \pm 0,25$	
3,6				$0,52 \pm 0,27$	
3,8				$0,57 \pm 0,29$	
4				$0,62 \pm 0,31$	
4,2				$0,66 \pm 0,33$	
4,4	$0,22 \pm 0,04$			$0,71 \pm 0,35$	
4,6	$0,24 \pm 0,07$			$0,76 \pm 0,37$	
4,8	$0,26 \pm 0,09$			$0,80 \pm 0,39$	
5	$0,28 \pm 0,11$			$0,85 \pm 0,41$	
5,2	$0,30 \pm 0,12$			$0,89 \pm 0,43$	
5,4	$0,32 \pm 0,14$			$0,94 \pm 0,45$	
5,6	$0,33 \pm 0,15$			$0,99 \pm 0,47$	
5,8	$0,36 \pm 0,16$			$1,04 \pm 0,49$	
6	$0,37 \pm 0,18$			$1,08 \pm 0,52$	
6,2	$0,39 \pm 0,19$	$0,29 \pm 0,07$		$1,13 \pm 0,54$	$0,34 \pm 0,05$
6,4	$0,42 \pm 0,20$	$0,32 \pm 0,11$		$1,17 \pm 0,56$	$0,41 \pm 0,17$
6,6	$0,44 \pm 0,21$	$0,35 \pm 0,14$		$1,22 \pm 0,57$	$0,47 \pm 0,24$
6,8	$0,46 \pm 0,22$	$0,38 \pm 0,17$		$1,27 \pm 0,59$	$0,54 \pm 0,29$
7	$0,48 \pm 0,23$	$0,41 \pm 0,19$		$1,32 \pm 0,61$	$0,61 \pm 0,34$
7,2	$0,50 \pm 0,24$	$0,44 \pm 0,21$		$1,36 \pm 0,63$	$0,68 \pm 0,38$
7,4	$0,53 \pm 0,26$	$0,47 \pm 0,24$		$1,41 \pm 0,65$	$0,75 \pm 0,43$
7,6	$0,55 \pm 0,27$	$0,49 \pm 0,26$		$1,46 \pm 0,67$	$0,81 \pm 0,47$
7,8	$0,58 \pm 0,28$	$0,52 \pm 0,28$		$1,50 \pm 0,69$	$0,88 \pm 0,50$
8	$0,62 \pm 0,30$	$0,55 \pm 0,29$	$0,35 \pm 0,05$	$1,55 \pm 0,71$	$0,95 \pm 0,54$
8,2	$0,66 \pm 0,32$	$0,58 \pm 0,31$	$0,39 \pm 0,13$	$1,60 \pm 0,73$	$1,02 \pm 0,58$
8,4	$0,71 \pm 0,34$	$0,61 \pm 0,33$	$0,42 \pm 0,17$	$1,65 \pm 0,75$	$1,09 \pm 0,61$
8,6	$0,77 \pm 0,36$	$0,64 \pm 0,35$	$0,46 \pm 0,21$	$1,69 \pm 0,77$	$1,15 \pm 0,65$
8,8	$0,85 \pm 0,38$	$0,67 \pm 0,36$	$0,50 \pm 0,25$	$1,74 \pm 0,79$	$1,22 \pm 0,68$
9	$0,94 \pm 0,37$	$0,71 \pm 0,38$	$0,54 \pm 0,28$	$1,79 \pm 0,81$	$1,29 \pm 0,72$
9,2	$1,05 \pm 0,34$	$0,74 \pm 0,39$	$0,58 \pm 0,30$	$1,83 \pm 0,83$	$1,36 \pm 0,75$
9,4	$1,17 \pm 0,27$	$0,77 \pm 0,41$	$0,62 \pm 0,33$	$1,88 \pm 0,85$	$1,42 \pm 0,78$
9,6	$1,26 \pm 0,17$	$0,80 \pm 0,42$	$0,65 \pm 0,36$	$1,93 \pm 0,87$	$1,49 \pm 0,81$
9,8	$1,33 \pm 0,11$	$0,83 \pm 0,44$	$0,69 \pm 0,38$	$1,98 \pm 0,89$	$1,56 \pm 0,84$
10	$1,38 \pm 0,07$	$0,87 \pm 0,45$	$0,73 \pm 0,40$	$2,03 \pm 0,91$	$1,63 \pm 0,87$

TABLEAU C.25 – Énergie du noyau résiduel pour les réactions simulés dans le  $\text{CF}_4$  pur.

$En$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,p)$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,d)$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,t)$ ( MeV)	$^{19}\text{F}(n,\alpha)$ ( MeV)	$^{12}\text{C}(n,\alpha)$ ( MeV)	$^{16}\text{O}(n,\alpha)$ ( MeV)
1,8				0,11 ± 0,06		
2				0,16 ± 0,09		
2,2				0,20 ± 0,12		
2,4				0,25 ± 0,14		0,12 ± 0,04
2,6				0,29 ± 0,16		0,17 ± 0,09
2,8				0,34 ± 0,18		0,23 ± 0,13
3				0,39 ± 0,21		0,28 ± 0,16
3,2				0,43 ± 0,23		0,33 ± 0,19
3,4				0,48 ± 0,25		0,39 ± 0,22
3,6				0,52 ± 0,27		0,44 ± 0,24
3,8				0,57 ± 0,29		0,49 ± 0,27
4				0,62 ± 0,31		0,55 ± 0,30
4,2				0,66 ± 0,33		0,60 ± 0,32
4,4	0,22 ± 0,04			0,71 ± 0,35		0,65 ± 0,35
4,6	0,24 ± 0,07			0,76 ± 0,37		0,71 ± 0,37
4,8	0,26 ± 0,09			0,80 ± 0,39		0,76 ± 0,40
5	0,28 ± 0,11			0,85 ± 0,41		0,82 ± 0,42
5,2	0,30 ± 0,12			0,89 ± 0,43		0,87 ± 0,44
5,4	0,32 ± 0,14			0,94 ± 0,45		0,92 ± 0,47
5,6	0,33 ± 0,15			0,99 ± 0,47		0,98 ± 0,49
5,8	0,36 ± 0,16			1,04 ± 0,49		1,03 ± 0,51
6	0,38 ± 0,18			1,08 ± 0,52		1,08 ± 0,54
6,2	0,39 ± 0,19	0,29 ± 0,07		1,13 ± 0,53	0,34 ± 0,05	1,14 ± 0,56
6,4	0,41 ± 0,20	0,32 ± 0,11		1,18 ± 0,56	0,41 ± 0,17	1,19 ± 0,59
6,6	0,44 ± 0,21	0,35 ± 0,14		1,22 ± 0,57	0,47 ± 0,24	1,25 ± 0,61
6,8	0,46 ± 0,22	0,38 ± 0,17		1,27 ± 0,59	0,54 ± 0,29	1,30 ± 0,63
7	0,48 ± 0,23	0,41 ± 0,19		1,32 ± 0,61	0,61 ± 0,34	1,35 ± 0,65
7,2	0,50 ± 0,24	0,44 ± 0,21		1,36 ± 0,63	0,68 ± 0,38	1,41 ± 0,68
7,4	0,53 ± 0,26	0,47 ± 0,24		1,41 ± 0,65	0,74 ± 0,43	1,46 ± 0,70
7,6	0,55 ± 0,27	0,49 ± 0,26		1,46 ± 0,67	0,81 ± 0,47	1,51 ± 0,72
7,8	0,58 ± 0,29	0,52 ± 0,27		1,50 ± 0,69	0,88 ± 0,50	1,57 ± 0,75
8	0,62 ± 0,30	0,55 ± 0,29	0,35 ± 0,05	1,55 ± 0,71	0,95 ± 0,54	1,63 ± 0,77
8,2	0,66 ± 0,32	0,58 ± 0,31	0,39 ± 0,13	1,60 ± 0,73	1,02 ± 0,58	1,68 ± 0,79
8,4	0,71 ± 0,34	0,61 ± 0,33	0,42 ± 0,17	1,65 ± 0,75	1,08 ± 0,61	1,73 ± 0,82
8,6	0,77 ± 0,36	0,64 ± 0,35	0,46 ± 0,21	1,69 ± 0,77	1,15 ± 0,65	1,79 ± 0,84
8,8	0,85 ± 0,38	0,67 ± 0,36	0,50 ± 0,24	1,74 ± 0,79	1,22 ± 0,68	1,84 ± 0,86
9	0,95 ± 0,37	0,70 ± 0,38	0,54 ± 0,28	1,79 ± 0,81	1,29 ± 0,72	1,90 ± 0,88
9,2	1,07 ± 0,33	0,74 ± 0,39	0,58 ± 0,30	1,83 ± 0,83	1,36 ± 0,75	1,95 ± 0,90
9,4	1,18 ± 0,25	0,77 ± 0,41	0,62 ± 0,33	1,88 ± 0,85	1,42 ± 0,78	2,01 ± 0,93
9,6	1,27 ± 0,16	0,80 ± 0,42	0,65 ± 0,36	1,93 ± 0,87	1,49 ± 0,81	2,07 ± 0,95
9,8	1,33 ± 0,10	0,83 ± 0,44	0,69 ± 0,38	1,98 ± 0,89	1,56 ± 0,84	2,12 ± 0,97
10	1,38 ± 0,07	0,87 ± 0,45	0,73 ± 0,40	2,03 ± 0,91	1,63 ± 0,87	2,17 ± 1,00

TABLEAU C.26 – Énergie du noyau résiduel pour les réactions simulés dans le mélange gazeux (97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ ).

E ( MeV)	$\sigma$ ( MeV)	<i>FWHM</i> ( MeV)	$\frac{\Delta(E)}{E}$ ( MeV)	E ( MeV)	$\sigma$ ( MeV)	<i>FWHM</i> ( MeV)	$\frac{\Delta(E)}{E}$ ( MeV)
2,50	0,07	0,16	6,46	6,30	0,10	0,23	3,63
2,60	0,06	0,15	5,69	6,40	0,10	0,23	3,62
2,70	0,07	0,16	5,83	6,50	0,10	0,23	3,61
2,80	0,07	0,16	5,89	6,60	0,10	0,24	3,60
2,90	0,07	0,17	5,96	6,70	0,10	0,24	3,57
3,00	0,07	0,16	5,47	6,80	0,10	0,24	3,54
3,10	0,07	0,17	5,52	6,90	0,10	0,25	3,56
3,20	0,07	0,17	5,34	7,00	0,11	0,25	3,56
3,30	0,07	0,17	5,27	7,10	0,11	0,25	3,57
3,40	0,07	0,17	5,12	7,20	0,11	0,26	3,58
3,50	0,07	0,17	4,98	7,30	0,11	0,26	3,57
3,60	0,08	0,18	4,92	7,40	0,11	0,27	3,59
3,70	0,08	0,18	4,79	7,50	0,12	0,27	3,62
3,80	0,08	0,18	4,70	7,60	0,12	0,28	3,67
3,90	0,08	0,18	4,56	7,70	0,12	0,28	3,70
4,00	0,08	0,18	4,51	7,80	0,12	0,29	3,69
4,10	0,08	0,18	4,41	7,90	0,12	0,29	3,66
4,20	0,08	0,18	4,32	8,00	0,12	0,29	3,64
4,30	0,08	0,18	4,27	8,10	0,12	0,29	3,63
4,40	0,08	0,18	4,20	8,20	0,13	0,30	3,63
4,50	0,08	0,19	4,16	8,30	0,13	0,30	3,63
4,60	0,08	0,19	4,09	8,40	0,13	0,30	3,60
4,70	0,08	0,19	4,02	8,50	0,13	0,30	3,58
4,80	0,08	0,19	3,98	8,60	0,13	0,31	3,57
4,90	0,08	0,19	3,93	8,70	0,13	0,31	3,56
5,00	0,09	0,20	4,01	8,80	0,13	0,31	3,57
5,10	0,09	0,20	3,97	8,90	0,14	0,32	3,58
5,20	0,09	0,20	3,86	9,00	0,14	0,32	3,57
5,30	0,08	0,20	3,77	9,10	0,14	0,32	3,56
5,40	0,09	0,20	3,75	9,20	0,14	0,33	3,55
5,50	0,09	0,21	3,73	9,30	0,14	0,33	3,54
5,60	0,09	0,21	3,72	9,40	0,14	0,33	3,53
5,70	0,09	0,21	3,72	9,50	0,14	0,33	3,51
5,80	0,09	0,22	3,72	9,60	0,14	0,34	3,50
5,90	0,09	0,22	3,69	9,70	0,14	0,34	3,50
6,00	0,09	0,22	3,68	9,80	0,15	0,34	3,49
6,10	0,10	0,23	3,70	9,90	0,15	0,34	3,48
6,20	0,10	0,23	3,66	10,00	0,15	0,35	3,48

TABLEAU C.27 – Résolution relative en énergie du dispositif expérimental (en utilisant pour la détermination de l'énergie cinétique du neutron incident l'équation 4.12) pour les événements simulés dans le  $\text{CF}_4$ .  $\sigma$  est l'écart-type de la distribution des différences entre les énergies déterminées par les équations 4.11 et 4.12, *FWHM* la largeur à mi-hauteur, et  $\frac{\Delta(E)}{E}$  la résolution relative estimée.

E ( MeV)	$\sigma$ ( MeV)	<i>FWHM</i> ( MeV)	$\frac{\Delta(E)}{E}$ ( MeV)	E ( MeV)	$\sigma$ ( MeV)	<i>FWHM</i> ( MeV)	$\frac{\Delta(E)}{E}$ ( MeV)
2,50	0,10	0,23	9,21	6,30	0,13	0,30	4,69
2,60	0,10	0,24	9,35	6,40	0,13	0,30	4,63
2,70	0,10	0,24	8,95	6,50	0,13	0,30	4,59
2,80	0,11	0,25	9,10	6,60	0,13	0,30	4,53
2,90	0,11	0,25	8,77	6,70	0,13	0,30	4,42
3,00	0,11	0,26	8,62	6,80	0,13	0,30	4,37
3,10	0,11	0,27	8,62	6,90	0,13	0,30	4,37
3,20	0,11	0,27	8,44	7,00	0,13	0,30	4,33
3,30	0,12	0,27	8,22	7,10	0,13	0,31	4,32
3,40	0,12	0,28	8,10	7,20	0,13	0,31	4,32
3,50	0,12	0,28	7,95	7,30	0,13	0,31	4,25
3,60	0,12	0,28	7,81	7,40	0,13	0,31	4,24
3,70	0,12	0,28	7,63	7,50	0,14	0,32	4,28
3,80	0,12	0,28	7,49	7,60	0,14	0,33	4,35
3,90	0,12	0,28	7,30	7,70	0,14	0,34	4,39
4,00	0,12	0,29	7,16	7,80	0,14	0,34	4,35
4,10	0,12	0,29	7,05	7,90	0,14	0,34	4,30
4,20	0,12	0,29	6,86	8,00	0,14	0,34	4,26
4,30	0,12	0,29	6,70	8,10	0,14	0,34	4,20
4,40	0,12	0,29	6,58	8,20	0,15	0,34	4,18
4,50	0,12	0,29	6,43	8,30	0,15	0,34	4,14
4,60	0,12	0,29	6,27	8,40	0,15	0,34	4,08
4,70	0,12	0,29	6,14	8,50	0,15	0,34	4,03
4,80	0,12	0,29	6,00	8,60	0,15	0,34	4,00
4,90	0,12	0,29	5,91	8,70	0,15	0,35	3,98
5,00	0,12	0,29	5,86	8,80	0,15	0,35	4,00
5,10	0,12	0,29	5,72	8,90	0,15	0,36	4,02
5,20	0,12	0,29	5,54	9,00	0,15	0,36	4,03
5,30	0,12	0,29	5,40	9,10	0,16	0,37	4,02
5,40	0,12	0,29	5,30	9,20	0,16	0,37	4,00
5,50	0,12	0,29	5,23	9,30	0,16	0,37	3,98
5,60	0,12	0,29	5,14	9,40	0,16	0,37	3,94
5,70	0,12	0,29	5,07	9,50	0,16	0,37	3,91
5,80	0,12	0,29	5,04	9,60	0,16	0,37	3,88
5,90	0,12	0,29	4,94	9,70	0,16	0,38	3,88
6,00	0,12	0,29	4,88	9,80	0,16	0,38	3,85
6,10	0,13	0,30	4,86	9,90	0,16	0,38	3,84
6,20	0,13	0,29	4,76	10,00	0,16	0,38	3,82

TABLEAU C.28 – Résolution relative en énergie du dispositif expérimental (en utilisant pour la détermination de l'énergie cinétique du neutron incident l'équation 4.12) pour les événements simulés dans le mélange gazeux composé de 97% de  $CF_4$  et 3% de  $CO_2$ .  $\sigma$  est l'écart-type de la distribution des différences entre les énergies déterminées par les équations 4.11 et 4.12, *FWHM* la largeur à mi-hauteur, et  $\frac{\Delta(E)}{E}$  la résolution relative estimée.

Paramètres	$\langle npe \rangle \gg 5$	$\langle npe \rangle \gg 10$	$\langle npe \rangle \gg 15$
$\chi^2/ndf$	46,169/66	732,118/62	903,539/56
[0]	$39,83 \pm 11,10$	$-70,06 \pm 8,17$	$273,83 \pm 14,69$
[1]	$-61,93 \pm 18,21$	$107,54 \pm 13,59$	$-437,94 \pm 23,18$
[2]	$40,03 \pm 12,96$	$-69,64 \pm 9,82$	$304,14 \pm 15,99$
[3]	$-14,27 \pm 5,26$	$24,92 \pm 4,05$	$-120,29 \pm 6,33$
[4]	$3,15 \pm 1,34$	$-5,43 \pm 1,05$	$29,86 \pm 1,58$
[5]	$-0,45 \pm 0,22$	$0,75 \pm 0,18$	$-4,83 \pm 0,26$
[6]	$(4,17 \pm 2,44) \times 10^{-2}$	$(-6,59 \pm 1,97) \times 10^{-2}$	$(50,89 \pm 2,79) \times 10^{-2}$
[7]	$(-2,44 \pm 1,68) \times 10^{-3}$	$(3,52 \pm 1,37) \times 10^{-3}$	$(-33,81 \pm 1,90) \times 10^{-3}$
[8]	$(8,16 \pm 6,60) \times 10^{-5}$	$(-10,34 \pm 5,47) \times 10^{-5}$	$(128,69 \pm 7,41) \times 10^{-5}$
[9]	$(-1,198 \pm 1,14) \times 10^{-6}$	$(1,24 \pm 0,95) \times 10^{-6}$	$(-21,40 \pm 1,27) \times 10^{-6}$

Paramètres	$\langle npe \rangle \gg 20$	$\langle npe \rangle \gg 25$	$\langle npe \rangle \gg 30$
$\chi^2/ndf$	922,026/47	716,056/36	543,251/32
[0]	$59,22 \pm 17,17$	$-498,49 \pm 79,34$	$14,63 \pm 14,89$
[1]	$-64,81 \pm 23,35$	$494,22 \pm 80,00$	$-14,94 \pm 11,70$
[2]	$27,32 \pm 14,11$	$-200,72 \pm 34,09$	$5,95 \pm 3,81$
[3]	$-4,85 \pm 4,98$	$40,65 \pm 8,02$	$-1,20 \pm 0,66$
[4]	$-0,05 \pm 1,13$	$-3,35 \pm 1,21$	$0,13 \pm 0,06$
[5]	$0,18 \pm 0,17$	$-0,24 \pm 0,16$	$(-7,22 \pm 3,27) \times 10^{-3}$
[6]	$(-3,38 \pm 1,76) \times 10^{-2}$	$(8,70 \pm 1,85) \times 10^{-2}$	$(1,62 +/ - 0,69) \times 10^{-4}$
[7]	$(3,05 \pm 1,15) \times 10^{-3}$	$(-8,88 \pm 1,46) \times 10^{-3}$	
[8]	$(-14,05 \pm 0,44) \times 10^{-5}$	$(42,96 \pm 0,64) - 5$	
[9]	$(2,65 \pm 0,74) \times 10^{-6}$	$(-8,36 \pm 1,17) \times 10^{-6}$	

TABLEAU C.29 – Paramètres des ajustements des courbes d'efficacité lumineuse (réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  dans le  $\text{CF}_4$ ) par une fonction polynomiale de la forme :  $[0] + [1]x + [2]x^2 + [3]x^3 + [4]x^4 + [5]x^5 + [6]x^6 + [7]x^7 + [8]x^8 + [9]x^9$ .

Paramètres	$\langle npe \rangle \gg 5$	$\langle npe \rangle \gg 10$ $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$	$\langle npe \rangle \gg 15$
$\chi^2/ndf$	307,792/66	459,524/47	313,611/34
[0]	$17,71 \pm 4,67$	$38,05 \pm 24,98$	$70,48 \pm 17,48$
[1]	$-35,20 \pm 8,08$	$-48,12 \pm 33,71$	$-42,45 \pm 15,84$
[2]	$29,94 \pm 6,06$	$26,46 \pm 20,10$	$3,84 \pm 6,64$
[3]	$-14,23 \pm 2,59$	$-8,32 \pm 6,97$	$3,33 \pm 1,80$
[4]	$4,15 \pm 0,69$	$1,66 \pm 1,55$	$-1,28 \pm 0,34$
[5]	$-0,77 \pm 0,12$	$-0,22 \pm 0,23$	$0,21 \pm 0,04$
[6]	$(9,13 \pm 1,37) \times 10^{-2}$	$(1,99 \pm 2,25) \times 10^{-2}$	$(-1,90 \pm 0,34) \times 10^{-2}$
[7]	$(-6,70 \pm 0,98) \times 10^{-3}$	$(-1,19 \pm 1,43) \times 10^{-3}$	$(0,90 \pm 0,15) \times 10^{-3}$
[8]	$(27,78 \pm 4,01) \times 10^{-5}$	$(4,31 \pm 5,25) \times 10^{-5}$	$(-1,76 \pm 0,29) \times 10^{-5}$
[9]	$(-4,97 \pm 0,71) \times 10^{-6}$	$(-7,20 \pm 8,57) \times 10^{-7}$	
	$^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$		
$\chi^2/ndf$	155,437/53	85,350/39	30,583/28
[0]	$249,77 \pm 146,99$	$-342,23 \pm 380,18$	$188,29 \pm 160,10$
[1]	$-313,95 \pm 211,23$	$424,80 \pm 425,81$	$-140,86 \pm 120,68$
[2]	$166,30 \pm 133,50$	$-226,76 \pm 207,54$	$43,65 \pm 37,75$
[3]	$-47,86 \pm 48,74$	$68,08 \pm 57,50$	$-7,17 \pm 6,27$
[4]	$7,96 \pm 11,34$	$-12,58 \pm 9,91$	$0,66 \pm 0,58$
[5]	$-0,72 \pm 1,74$	$1,47 \pm 1,09$	$-0,03 \pm 0,03$
[6]	$(2,34 \pm 17,73) \times 10^{-2}$	$(-10,52 \pm 7,41) \times 10^{-2}$	$(6,41 \pm 5,92) \times 10^{-4}$
[7]	$(1,60 \pm 11,50) \times 10^{-3}$	$(4,26 \pm 2,88) \times 10^{-3}$	
[8]	$(-16,78 \pm 43,15) \times 10^{-5}$	$(-7,43 \pm 4,86) \times 10^{-5}$	
[9]	$(4,38 \pm 7,14) \times 10^{-6}$		

TABLEAU C.30 – Paramètres des ajustements des courbes d'efficacité lumineuse (réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  et  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  dans le mélange gazeux composé de 97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ ) par une fonction polynomiale de la forme :  $[0] + [1]x + [2]x^2 + [3]x^3 + [4]x^4 + [5]x^5 + [6]x^6 + [7]x^7 + [8]x^8 + [9]x^9$ .

$E$ ( MeV)	$\sigma$ ( mb)	$E$ ( MeV)	$\sigma$ ( mb)
2,1	$(2,96 \pm 2,99) \times 10^{-4}$	6,10	$141,20 \pm 21,34$
2,2	$(3,00 \pm 3,03) \times 10^{-4}$	6,20	$132,95 \pm 20,09$
2,3	$(3,04 \pm 3,07) \times 10^{-4}$	6,30	$124,66 \pm 18,84$
2,4	$(2,46 \pm 0,95) \times 10^{-3}$	6,40	$118,47 \pm 17,91$
2,5	$(1,56 \pm 0,32) \times 10^{-2}$	6,50	$119,83 \pm 18,11$
2,6	$(4,14 \pm 0,72) \times 10^{-2}$	6,60	$126,75 \pm 19,16$
2,7	$(7,52 \pm 1,24) \times 10^{-2}$	6,70	$129,62 \pm 19,59$
2,8	$(1,71 \pm 0,27) \times 10^{-1}$	6,80	$131,62 \pm 19,89$
2,9	$(2,55 \pm 0,40) \times 10^{-1}$	6,90	$131,45 \pm 19,87$
3	$(5,08 \pm 0,78) \times 10^{-1}$	7,00	$132,00 \pm 19,95$
3,1	$1,03 \pm 0,16$	7,10	$128,04 \pm 19,35$
3,2	$1,83 \pm 0,28$	7,20	$114,86 \pm 17,36$
3,3	$3,62 \pm 0,55$	7,30	$107,70 \pm 16,28$
3,4	$6,24 \pm 0,94$	7,40	$114,63 \pm 17,33$
3,5	$9,31 \pm 1,41$	7,50	$119,45 \pm 18,05$
3,6	$12,56 \pm 1,90$	7,60	$115,27 \pm 17,42$
3,7	$16,09 \pm 2,43$	7,70	$106,31 \pm 16,07$
3,8	$19,93 \pm 3,01$	7,80	$100,02 \pm 15,12$
3,9	$24,03 \pm 3,63$	7,90	$98,25 \pm 14,85$
4	$28,53 \pm 4,31$	8,00	$98,00 \pm 14,81$
4,1	$31,77 \pm 4,80$	8,10	$97,49 \pm 14,74$
4,2	$38,60 \pm 5,83$	8,20	$97,35 \pm 14,71$
4,3	$66,85 \pm 10,10$	8,30	$96,82 \pm 14,63$
4,4	$87,09 \pm 13,16$	8,40	$97,42 \pm 14,72$
4,5	$80,09 \pm 12,11$	8,50	$101,47 \pm 15,34$
4,6	$73,85 \pm 11,16$	8,60	$105,92 \pm 16,01$
4,7	$87,41 \pm 13,21$	8,70	$107,08 \pm 16,19$
4,8	$106,62 \pm 16,12$	8,80	$101,69 \pm 15,37$
4,9	$100,11 \pm 15,13$	8,90	$93,46 \pm 14,13$
5	$83,52 \pm 12,63$	9,00	$85,30 \pm 12,89$
5,1	$83,84 \pm 12,67$	9,10	$80,57 \pm 12,18$
5,2	$95,16 \pm 14,38$	9,20	$78,24 \pm 11,83$
5,3	$106,83 \pm 16,15$	9,30	$77,15 \pm 11,66$
5,4	$119,18 \pm 18,01$	9,40	$76,70 \pm 11,59$
5,5	$136,25 \pm 20,59$	9,50	$77,82 \pm 11,76$
5,6	$156,44 \pm 23,65$	9,60	$79,64 \pm 12,04$
5,7	$167,67 \pm 25,34$	9,70	$80,78 \pm 12,21$
5,8	$166,95 \pm 25,23$	9,80	$80,33 \pm 12,14$
5,9	$158,62 \pm 23,97$	9,90	$79,54 \pm 12,02$
6	$150,45 \pm 22,74$	10,00	$79,51 \pm 12,02$

TABLEAU C.31 – Section efficace estimée (par intervalle d'énergie de 100 keV) de la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  dans le  $\text{CF}_4$  pur.  $E$  est l'énergie du neutron incident, et  $\sigma$  la section efficace.

$E$ ( MeV)	$\sigma$ ( mb)	$E$ ( MeV)	$\sigma$ ( mb)
2,0	$(6,18 \pm 4,47) \times 10^{-4}$	6,1	$137,34 \pm 20,76$
2,1	$(1,88 \pm 0,82) \times 10^{-3}$	6,2	$130,22 \pm 19,68$
2,2	$(2,22 \pm 0,90) \times 10^{-3}$	6,3	$122,29 \pm 18,48$
2,3	$(7,72 \pm 1,96) \times 10^{-3}$	6,4	$117,56 \pm 17,77$
2,4	$(2,18 \pm 0,42) \times 10^{-2}$	6,5	$120,51 \pm 18,22$
2,5	$(5,48 \pm 0,93) \times 10^{-3}$	6,6	$126,72 \pm 19,15$
2,6	$(9,36 \pm 1,52) \times 10^{-2}$	6,7	$128,88 \pm 19,48$
2,7	$(1,71 \pm 0,27) \times 10^{-1}$	6,8	$129,19 \pm 19,53$
2,8	$(3,74 \pm 0,58) \times 10^{-1}$	6,9	$130,62 \pm 19,74$
2,9	$(6,56 \pm 1,00) \times 10^{-1}$	7,0	$130,02 \pm 19,65$
3,0	$1,13 \pm 0,17$	7,1	$124,56 \pm 18,83$
3,1	$2,03 \pm 0,31$	7,2	$111,80 \pm 16,90$
3,2	$3,26 \pm 0,49$	7,3	$108,81 \pm 16,45$
3,3	$5,43 \pm 0,82$	7,4	$115,61 \pm 17,47$
3,4	$8,35 \pm 1,26$	7,5	$117,81 \pm 17,81$
3,5	$11,58 \pm 1,75$	7,6	$112,78 \pm 17,05$
3,6	$14,99 \pm 2,27$	7,7	$104,89 \pm 15,85$
3,7	$18,79 \pm 2,84$	7,8	$100,04 \pm 15,12$
3,8	$22,96 \pm 3,47$	7,9	$98,62 \pm 14,91$
3,9	$27,80 \pm 4,20$	8,0	$98,00 \pm 14,81$
4,0	$33,01 \pm 4,99$	8,1	$97,68 \pm 14,76$
4,1	$37,86 \pm 5,72$	8,2	$97,49 \pm 14,74$
4,2	$47,40 \pm 7,17$	8,3	$97,36 \pm 14,72$
4,3	$71,27 \pm 10,77$	8,4	$98,40 \pm 14,87$
4,4	$84,12 \pm 12,71$	8,5	$102,57 \pm 15,50$
4,5	$79,04 \pm 11,95$	8,6	$106,24 \pm 16,06$
4,6	$76,87 \pm 11,62$	8,7	$105,61 \pm 15,96$
4,7	$90,00 \pm 13,60$	8,8	$99,44 \pm 15,03$
4,8	$103,32 \pm 15,62$	8,9	$91,32 \pm 13,80$
4,9	$96,52 \pm 14,59$	9,0	$84,24 \pm 12,73$
5,0	$85,09 \pm 12,86$	9,1	$80,19 \pm 12,12$
5,1	$89,16 \pm 13,48$	9,2	$78,80 \pm 11,91$
5,2	$100,04 \pm 15,12$	9,3	$77,76 \pm 11,75$
5,3	$111,33 \pm 16,83$	9,4	$77,69 \pm 11,74$
5,4	$122,30 \pm 18,49$	9,5	$78,94 \pm 11,93$
5,5	$138,80 \pm 20,98$	9,6	$80,50 \pm 12,17$
5,6	$155,03 \pm 23,43$	9,7	$80,79 \pm 12,21$
5,7	$163,17 \pm 24,66$	9,8	$80,33 \pm 12,14$
5,8	$160,53 \pm 24,26$	9,9	$79,27 \pm 11,98$
5,9	$152,51 \pm 23,05$	10,0	$78,94 \pm 11,93$
6,0	$144,85 \pm 21,89$		

TABLEAU C.32 – Section efficace estimée (par intervalle d'énergie de 100 keV) de la réaction  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  dans le mélange gazeux composé de 97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ .  $E$  est l'énergie du neutron incident, et  $\sigma$  la section efficace.

$E$ ( MeV)	$\sigma$ ( mb)	$E$ ( MeV)	$\sigma$ ( mb)
3,1	$(6,81 \pm 4,06) \times 10^{-2}$	6,6	$116,81 \pm 17,73$
3,2	$(1,15 \pm 0,54) \times 10^{-1}$	6,7	$99,49 \pm 15,11$
3,3	$(2,80 \pm 0,91) \times 10^{-1}$	6,8	$87,56 \pm 13,31$
3,4	$(6,85 \pm 1,64) \times 10^{-1}$	6,9	$80,33 \pm 12,22$
3,5	$1,77 \pm 0,34$	7	$80,72 \pm 12,27$
3,6	$2,75 \pm 0,49$	7,1	$100,87 \pm 15,32$
3,7	$5,78 \pm 0,95$	7,2	$130,81 \pm 19,85$
3,8	$10,54 \pm 1,67$	7,3	$112,80 \pm 17,12$
3,9	$17,04 \pm 2,65$	7,4	$87,46 \pm 13,29$
4	$29,40 \pm 4,53$	7,5	$71,70 \pm 10,91$
4,1	$42,22 \pm 6,46$	7,6	$66,05 \pm 10,06$
4,2	$52,80 \pm 8,06$	7,7	$56,94 \pm 8,68$
4,3	$48,32 \pm 7,39$	7,8	$60,03 \pm 9,14$
4,4	$37,91 \pm 5,81$	7,9	$71,80 \pm 10,92$
4,5	$34,47 \pm 5,29$	8	$81,23 \pm 12,35$
4,6	$43,09 \pm 6,60$	8,1	$87,78 \pm 13,34$
4,7	$38,58 \pm 5,92$	8,2	$92,03 \pm 13,98$
4,8	$40,72 \pm 6,24$	8,3	$94,41 \pm 14,34$
4,9	$56,83 \pm 8,67$	8,4	$96,81 \pm 14,70$
5	$80,00 \pm 12,18$	8,5	$109,96 \pm 16,69$
5,1	$84,60 \pm 12,87$	8,6	$137,55 \pm 20,86$
5,2	$41,24 \pm 6,32$	8,7	$168,17 \pm 25,48$
5,3	$20,44 \pm 3,17$	8,8	$180,78 \pm 27,39$
5,4	$22,38 \pm 3,46$	8,9	$177,84 \pm 26,94$
5,5	$20,63 \pm 3,20$	9	$177,49 \pm 26,89$
5,6	$24,20 \pm 3,74$	9,1	$166,40 \pm 25,21$
5,7	$29,15 \pm 4,49$	9,2	$164,42 \pm 24,92$
5,8	$32,29 \pm 4,96$	9,3	$168,03 \pm 25,46$
5,9	$50,71 \pm 7,74$	9,4	$179,63 \pm 27,21$
6	$55,42 \pm 8,46$	9,5	$198,12 \pm 30,01$
6,1	$58,35 \pm 8,90$	9,6	$218,68 \pm 33,11$
6,2	$62,11 \pm 9,47$	9,7	$239,96 \pm 36,33$
6,3	$69,36 \pm 10,56$	9,8	$254,62 \pm 38,55$
6,4	$103,04 \pm 15,65$	9,9	$257,40 \pm 38,97$
6,5	$117,73 \pm 17,87$	10	$258,56 \pm 39,14$

TABLEAU C.33 – Section efficace estimée (par intervalle d'énergie de 100 keV) de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  dans le mélange gazeux composé de 97% de  $\text{CF}_4$  et 3% de  $\text{CO}_2$ .  $E$  est l'énergie du neutron incident, et  $\sigma$  la section efficace.

# Bibliographie

- [1] V.A. Khryachkov, I.P. Bondarenko, B.D. Kuzminov, N.N. Semenova, A.I. Sergachev, T.A. Ivanova, and G. Giorginis. (n, $\alpha$  reactions cross section research at ippe. *EPJ Web of Conferences*, 21 :3005, 2012.
- [2] R. Gernhäuser, B. Bauer, J. Friese, J. Homolka, A. Kastenmüller, P. Kienle, H.-J. Körner, P. Maier-Komor, M. Münch, R. Schneider, and K. Zeitelhack. Photon detector performance and radiator scintillation in the hades rich. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A371 :300, 1996.
- [3] G.E. Knoll. *Radiation Detection and Measurement. Third edition.* John Wiley Sons, 2000.
- [4] <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>.
- [5] J. Chadwick. The existence of a neutron. *Proceedings of the Royal Society A*, 136(830) :692, 1932.
- [6] E. Rutherford. Bakerian lecture. nuclear constitution of atoms. *Proceedings of the Royal Society A*, 97(686) :374, 1920.
- [7] W. Bothe and H. Becker. Künstliche erregung von kern- $\gamma$ -strahlen. *Zeitschrift für Physik*, 66 :289, 1930.
- [8] [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1935/chadwick-facts.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1935/chadwick-facts.html).
- [9] D. Blanc. *Physique nucléaire, particules.* Masson, 1995.
- [10] H.H. Goldsmith, H.W Ibser, and B.T. Feld. Neutron cross sections of the elements. a. compilation. *Reviews of Modern Physics*, 19(4) :259, 1947.
- [11] R.K. Adair. Neutron cross sections of the elements. *Reviews of Modern Physics*, 22(3) :249, 1950.
- [12] Working party on international nuclear data evaluation co-operation (wpec). <https://www.oecd-nea.org/science/wpec/>.
- [13] High priority request list - background. <https://www.oecd-nea.org/dbdata/hprl/background.html>.
- [14] Résumé des high priority request list meetings. <https://www.oecd-nea.org/dbdata/hprl/references.html>.
- [15] Liste des high priority request list. <https://www.oecd-nea.org/dbdata/hprl/search.pl>.
- [16] NEA/OECD, editor. *Nuclear Data for Improved LEU-LWR Reactivity Predictions*, volume 22. International Evaluation Co-operation, 2006.
- [17] NEA/OECD, editor. *Uncertainty and Target Accuracy Assessment for Innovative System Using Recent Covariance Data Evaluations*, volume 26. International Evaluation Co-operation, 2008.

- 
- [18] Generation-iv international forum (gif). [https://www.gen-4.org/gif/jcms/c\\_9260/Public](https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9260/Public).
- [19] M. Chadwick. Wpec subgroup proposal. Technical report, NEA/NSC/WPEC, 2013.
- [20] M.B. Chadwick, E. Dupont, E. Bauge, A. Blokhin, O. Bouland, D.A. Brown, R. Capote, A. Carlson, Y. Danon, C. De Saint Jean, M. Dunn, U. Fischer, R.A. Forrest, S.C. Frankle, T. Fukahori, Z. Ge, S.M. Grimes, G.M. Hale, M. Herman, A. Ignatyuk, M. Ishikawa, N. Iwamoto, O. Iwamoto, M. Jandel, R. Jacqmin, T. Kawano, S. Kunieda, A. Kahler, B. Kiedrowski, I. Kodeli, A.J. Koning, L. Leal, Y.O. Lee, J.P. Lestone, C. Lubitz, M. MacInnes, D. McNabb, R. McKnight, M. Moxon, S. Muqhabghab, G. Noguere, G. Palmiotti, A. Plompen, B. Pritychenko, V. Pronyaev, D. Rochman, P. Romain, D. Roubtsov, P. Schillebeeckx, M. Salvatores, S. Simakov, E.Sh. Soukhovitski, J.C. Sublet, P. Talou, I. Thompson, A. Trkov, R. Vogt, and S. van der Marck. The cielo collaboration : Neutron reactions on  $1h$ ,  $16o$ ,  $56fe$ ,  $235,238u$ , and  $239pu$ . *Nuclear Data Sheets*, 118 :1 – 25, 2014.
- [21] P. Boiron. Réacteurs à eau ordinaire pressurisée. *Techniques de l'Ingénieur*, 2008.
- [22] P. Cachera. Réacteurs à eau ordinaire bouillante. *Techniques de l'Ingénieur*, 2000.
- [23] L. Patarin. *Le cycle du combustible nucléaire*. Collection Génie Atomique, edp sciences edition, 2002.
- [24] Commissariat à l'énergie atomique, editor. *Les combustibles nucléaires*. Monographies DEN, le moniteur edition, 2008.
- [25] Les filières de réacteurs nucléaires. <http://www.areva.com/FR/activites-1618/les-filieres-de-reacteurs-nucleaires.html>.
- [26] C. Fribourg. Réacteurs nucléaires de propulsion navale. *Techniques de l'Ingénieur*, BN3141, 2002.
- [27] A. Courcelle. Need for  $16o(n,\alpha)$  measurement and evaluation in the range 2.5 to 10 mev. Technical report, CEA Cadarache, 2005.
- [28] A. Michalowicz. *Cinématiques des réactions nucléaires*. Monographies Dunod, 1964.
- [29] C. Diop. Physique des réacteurs nucléaires - les réactions nucléaires. *Techniques de l'Ingénieur*, BN3011, 2006.
- [30] J.M. Blatt and V.F. Weisskopf. *Theoretical Nuclear Physics*. Springer-Verlag, 1979.
- [31] C. Iliadis. *Nuclear physics of stars*. Wiley-VCH, 2007.
- [32] W.F. Hornyak and T. Lauritsen. Energy levels of light nuclei. *Reviews of Modern Physics*, 20(1) :191, 1948.
- [33] W.F. Hornyak, T. Lauritsen, P. Morrison, and W.A. Fowler. Energy levels of light nuclei. iii. *Reviews of Modern Physics*, 22(4) :291, 1950.
- [34] F. Ajzenberg-Selove and T. Lauritsen. Energy levels of light nuclei. iv. *Reviews of Modern Physics*, 24(4) :321, 1952.
- [35] F. Ajzenberg-Selove and T. Lauritsen. Energy levels of light nuclei. v. *Reviews of Modern Physics*, 27(1) :77, 1955.
- [36] F. Ajzenberg-Selove and T. Lauritsen. Energy levels of light nuclei. vi. *Nuclear Physics*, 11 :1, 1959.
- [37] F. Ajzenberg-Selove. Energy levels of light nuclei  $a=13-15$ . *Nuclear Physics*, A152 :1, 1970.
- [38] F. Ajzenberg-Selove. Energy levels of light nuclei  $a=13-15$ . *Nuclear Physics*, A268 :1, 1976.
-

- 
- [39] F. Ajzenberg-Selove. Energy levels of light nuclei  $a=13-15$ . *Nuclear Physics*, A360 :1, 1981.
- [40] F. Ajzenberg-Selove. Energy levels of light nuclei  $a=13-15$ . *Nuclear Physics*, A449 :1, 1986.
- [41] F. Ajzenberg-Selove. Energy levels of light nuclei  $a=13-15$ . *Nuclear Physics*, A523 :1, 1991.
- [42] F. Ajzenberg-Selove. Energy levels of light nuclei  $a=16-17$ . *Nuclear Physics*, A166 :1, 1971.
- [43] F. Ajzenberg-Selove. Energy levels of light nuclei  $a=16-17$ . *Nuclear Physics*, A281 :1, 1977.
- [44] F. Ajzenberg-Selove. Energy levels of light nuclei  $a=16-17$ . *Nuclear Physics*, A375 :1, 1982.
- [45] F. Ajzenberg-Selove. Energy levels of light nuclei  $a=16-17$ . *Nuclear Physics*, A460 :1, 1986.
- [46] F. Ajzenberg-Selove. Energy levels of light nuclei  $a=18-20$ . *Nuclear Physics*, A190 :1, 1972.
- [47] F. Ajzenberg-Selove. Energy levels of light nuclei  $a=18-20$ . *Nuclear Physics*, A300 :1, 1978.
- [48] F. Ajzenberg-Selove. Energy levels of light nuclei  $a=18-20$ . *Nuclear Physics*, A392 :1, 1983.
- [49] F. Ajzenberg-Selove. Energy levels of light nuclei  $a=18-20$ . *Nuclear Physics*, A475 :1, 1987.
- [50] D.R. Tilley, H.R. Weller, and C.M. Cheves. Energy levels of light nuclei  $a=16-17$ . *Nuclear Physics*, A565 :1, 1993.
- [51] D.R. Tilley, H.R. Weller, C.M. Cheves, and R.M. Chasteler. Energy levels of light nuclei  $a=18-19$ . *Nuclear Physics*, A595 :1, 1995.
- [52] D.R. Tilley, C.M. Cheves, J.H. Kelley, S. Raman, and H.R. Weller. Energy levels of light nuclei  $a=20$ . *Nuclear Physics*, A636 :249, 1998.
- [53] Exfor. <https://www-nds.iaea.org/exfor/exfor.htm>.
- [54] J. seitz and P. Huber. Wirkungsquerschnitt der  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ -reaktion für schnelle neutronen. *Helvetica Physica Acta*, 28 :227, 1955.
- [55] E.A. Davis, T.W. Bonner, D.W. Worley Jr, and R. Bass. Disintegration of  $^{16}\text{O}$  and  $^{12}\text{C}$  by fast neutrons. *Nuclear Physics*, 48 :169, 1963.
- [56] A.S. Divatia, K.K. Sekharan, and M.K. Mehta.  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  reaction cross-sections from the  $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$  reaction. In *Nuclear Data for Reactors vol 1. Conference Proceedings, Paris*, page 233, 1966.
- [57] G. Giorginis, V. Khryachkov, V. Corcalciuc, and M. Kievets. The cross section of the  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  reaction in the mev energy range. In *International Conference on Nuclear Data for Science and Technology*, volume 1, page 525, 2007.
- [58] D. Dandy, J.L. Wankling, and C.J. Parnell. The cross-section for the  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  reaction. Technical Report 6810, Atomic Weapons Research Establishment, Aldermaston (UK), 1968.
- [59] W.N. McDicken and W. Jack. The reactions  $^{20}\text{Ne}(n,\alpha)^{17}\text{O}$  et  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  using 14 mev neutrons. *Nuclear Physics*, 88(457), 1966.
-

- 
- [60] Y-C Hsu, C-Y Huang, and C-C Chang. Angular distributions of alpha particles from the reaction  $^{16}\text{O}(\text{n},\alpha)^{13}\text{C}$  at 14,1 mev. *Nuclear Physics*, A104 :677, 1967.
- [61] B. Leroux, K. El-Hammami, J. Dalmas, R. Chastel, G. Lamot, C. Fayard, and J. Hajj Boutros. Etude des réactions  $(\text{n},\alpha)$  sur les noyaux  $^{16}\text{O}$  et  $^{14}\text{N}$  à 14,9 mev. *Nuclear Physics*, A116 :196, 1968.
- [62] H.J. Brede, M. Mörike, B. Schürenberg, G. Staudt, and F. Weng. The  $^{16}\text{O}(\text{n},\alpha)^{13}\text{C}$  reaction at 13.9 mev. *Zeitschrift für Physik*, 245 :1, 1971.
- [63] M. Bormann, D. Kaack, V. Schröder, W. Scobel, and L. Wilde. The  $(\text{n},\alpha)$  reactions on  $^{11}\text{B}$ ,  $^{14}\text{N}$  and  $^{16}\text{O}$  with 14mev neutrons. *Zeitschrift für Physik*, 258 :285, 1973.
- [64] S. Hlavac, P. Oblozinsky, I. Turzo, L. Dostal, and J. Kliman. Cross sections of the  $^{16}\text{O}(\text{n},\alpha\gamma)$  reaction at 14,7 mev. Technical report, INDC, 1994.
- [65] M. Bormann, S. Cierjacks, E. Fretwurst, K.J. Giesecke, H. Neuert, and H. Pollehn. Untersuchungen über die energieabhängigkeit von kernreaktionen mit neutronen im energiebereich zwischen 12 und 19 mev. *Zeitschrift für Physik*, 174 :1, 1963.
- [66] S. May and G. Pinte. Analyse par activation neutronique. *Techniques de l'Ingénieur*, 1993.
- [67] D. Blanc and G. Ambrosino. *Elements de physique nucléaire*. Masson, 1967.
- [68] K.K. Sekheran, A.S. Divatia, M.K. Mekhta, S.S. Kerekatte, and K.B. Nambiar.  $^{13}\text{C}(\alpha,\text{n})^{16}\text{O}$  reaction cross section between 1.95 and 5.57 mev. *Physical Review*, 156(4) :1187, 1967.
- [69] C.N. Davids. A study of  $(\alpha,\text{n})$  reactions on  $^9\text{Be}$  and  $^{13}\text{C}$  at low energies. *Nuclear Physics*, A110 :619, 1968.
- [70] J.K. Bair and F.X. Haas. Total neutron yield from the reactions  $^{13}\text{C}(\alpha,\text{n})^{16}\text{O}$  and  $^{17,18}\text{O}(\alpha,\text{n})^{20,21}\text{Ne}$ . *Physical Review*, C7(4) :1356, 1973.
- [71] S.E. Kellogg, R.B. Vogelaar, and R.W. Kavanagh.  $^{13}\text{C}(\alpha,\text{n})$  and  $^{14}\text{C}(\text{p},\text{n})$  : Astrophysical neutron sources and sinks. *Bulletin of the American Physical Society*, 34 :1192, 1989.
- [72] S. Harrisopulos, H.W. Becker, J.W. Hammer, A. Lagoyannis, C. Rolfs, and F. Strieder. The reaction  $^{13}\text{C}(\alpha,\text{n})^{16}\text{O}$  : a background for the observation of geo-neutrinos. *Physical Review*, C72 :062801, 2005.
- [73] R.B. Walton, J.D. Clement, and F. Boreli. Interaction of neutrons with oxygen and a study of the  $^{13}\text{C}(\alpha,\text{n})^{16}\text{O}$  reaction. *Physical Review*, 107(4) :1065, 1957.
- [74] Generation-iv international forum (gif) - systèmes. [https://www.gen-4.org/gif/jcms/c\\_9353/systems](https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9353/systems).
- [75] W.D. Harkins, D.M. Gans, and H.W. Newson. Disintegration of fluorine nuclei by neutrons and the probable formation of a new isotope of nitrogen ( $^{16}\text{N}$ ). *Physical Review*, 44 :945, 1933.
- [76] W.D. Harkins, D.M. Gans, and H.W. Newson. The disintegration of the nuclei of light atoms by neutrons. ii. neon, fluorine and carbone. *Physical Review*, 47 :52, 1935.
- [77] E. Fermi, E. Amaldi, O. D'Agostino, F. Rasetti, and E. Segrè. Artificial radioactivity produced by neutron bombardment. *Proceedings of the Royal Society A*, 146 :483, 1934.
- [78] E. Wilhelmy. Resonanzaustritt von protonen und alpha-teilchen. *Zeitschrift für Physik*, 107(11) :769, 1937.
-

- 
- [79] P. Scherrer, P. Huber, and J. Rossel. Kernreaktionen von fluor mit schnellen neutronen. *Helvetica Physica Acta*, 14 :618, 1941.
- [80] P. Huber, J. Rossel, and P. Scherrer. Kernreaktionen von fluor mit schnellen neutronen. *Helvetica Physica Acta*, 14 :314, 1941.
- [81] E. Bleuler and J. Rossel. Etude de la réaction  $f_{19}(n,\alpha)n_{16}$ . *Helvetica Physica Acta*, 20 :445, 1947.
- [82] J.V. Jelley and E.B. Paul. Fast neutron reactions with fluorine and sodium. *Proceedings of the Physical Society of London*, A 63(2) :112, 1950.
- [83] B.J. Toppel. Spin of  $n_{16}$ . *Physical Review*, 103(1) :141, 1956.
- [84] J.B. Marion and R.M. Brugger. Neutron-induced reactions in fluorine. *Physical Review*, 100(1) :69, 1955.
- [85] N.A. Bostrom, E.L. Hudspeth, and I.L. Morgan. <https://www-nds.iaea.org/exfor/servlet/X4sGetSubent?plus=1&sub=11393.002>.
- [86] D.M. Smith, N.A. Bostrom, and E.L. Hudspeth. Excitation study of  $f_{19}(n,\alpha)n_{16}$  with a  $baf_2$  crystal. *Physical Review*, 117(2) :514, 1960.
- [87] R. Bass, P. Haug, K. Kruger, and B. Staginnus. Fast neutron excitation functions by activation techniques. *Report from Euratom-countries + Euratom to EANDC*, 66 :64, 1966.
- [88] F. Foroughi and J. Rossel. Etude des sections efficaces différentielles des réactions  $(n,p)$  et  $(n,\alpha)$  sur  $f_{19}$ ,  $si_{29}$ ,  $s_{32}$  et  $ca_{40}$  à 5,85 mev. *Helvetica Physica Acta*, 45 :439, 1972.
- [89] C.M. Bartle and P.A. Quin. Total cross sections for the  $ca_{40}(n,p)$  and  $(n,\alpha)$  reactions between 2,7 and 5,5 mev. *Annals of Nuclear Energy*, 8 :43, 1981.
- [90] S.M. Bharathi, U.T. Raheja, and E. Kondaiah. Angular distribution of the  $f_{19}(n,\alpha)n_{16}$  reaction at  $en=4,7$  mev. *Nuclear Physics*, 83 :407, 1966.
- [91] T. Knellwolf and J. Rossel. Etude des réactions  $ca_{40}(n,\alpha)a_{37}$  et  $f_{19}(n,\alpha)n_{16}$  avec des neutrons de 6 mev. *Helvetica Physica Acta*, 39 :376, 1966.
- [92] D.L. Smith, J.W. Meadows, and J.F. Whalen. Cross sections for  $f_{19}(n,p)o_{19}$  and  $f_{19}(n,\alpha)n_{16}$  from threshold to 9 mev. *Nuclear Science and Engineering*, 77 :256, 1981.
- [93] E.A. Davis, F. Gabbard, T.W. Bonner, and R. Bass. The disintegration of  $b_{10}$  and  $f_{19}$  by fast neutrons. *Nuclear Physics*, 27 :448, 1961.
- [94] I.P. Bondarenko, V.A. Khryachkov, T.A. Ivanova, B.D. Kuz'minov, N.N. Semenova, and A.I. Sergachev. Experimental investigation of the  $f_{19}(n,\alpha)n_{16}$  reaction excitation function in the neutron energy range of 4 to 7,35 mev. *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 10(4) :349, 2013.
- [95] I.P. Bondarenko, V.A. Khryachkov, T.A. Ivanova, B.D. Kuz'minov, N.N. Semenova, and A.I. Sergachev. Investigation of the  $f_{19}(n,\alpha)n_{16}$  reaction excitation function in the neutron energy range of 4 - 7,35 mev. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences Physics*, 77(4) :459, 2013.
- [96] J. Picard and C.F. Williamson. The  $(n,p)$ ,  $(n,\alpha)$  and  $(n,2n)$  cross sections for  $f_{19}$  and  $na_{23}$  between 13 and 21 mev. *Nuclear Physics*, 63 :673, 1965.
- [97] R. Prasad, D.C. Sarkar, and C.S. Khurana. Measurement of  $(n,p)$  and  $(n,\alpha)$  reaction cross sections at 14,8 mev. *Nuclear Physics*, 85 :476, 1966.
- [98] T. Rohwer, M. Mörike, and G. Staudt. The reaction  $f_{19}(n,\alpha)n_{16}$  at  $en=13,9$  mev and 15,6 mev. *Zeitschrift für Physik*, A281 :107, 1977.
-

- 
- [99] M. Mörike, G. Staudt, and F. Weng. (n,α) reactions on light nuclei at  $E_n=13,9$  mev. *Zeitschrift für Physik*, A287 :211, 1978.
- [100] P.N. Ngoc. <https://www-nds.iaea.org/exfor/servlet/X4sGetSubent?plus=1&sub=30562.009>.
- [101] A. Durusoy and I.A. Reyhancan. Measurements of activation cross-sections for the  $f-19(n,\alpha)n-16$  reaction for neutrons with energies between 13 and 15 mev. *Annals of Nuclear Energy*, 33 :159, 2006.
- [102] CEA, editor. *La neutronique*. Monographies DEN, le moniteur edition, 2013.
- [103] C. Diop. Physique des réacteurs nucléaires - traitement des données nucléaires. *Techniques de l'Ingénieur*, BN3012, 2007.
- [104] A. Trkov, M. Herman, and D.A. Brown. Endf-6 formats manual. data formats and procedures for the evaluated nuclear data files endf/b-vi and endf/b-vii, 2012.
- [105] [https://www.oecd-nea.org/dbdata/data/nds\\_eval\\_libs.htm](https://www.oecd-nea.org/dbdata/data/nds_eval_libs.htm).
- [106] I. Sick, E. Baumgartner, P. Huber, and Th. Stambach. Messung des differentiellen wirkungsquerschnitts der reaktion  $o-16(n,\alpha)c-13$  im energiegebiet von 14,8 - 18,8 mev. *Helvetica Physica Acta*, 41 :573, 1968.
- [107] D.R. Maxson and R.D. Murphy.  $O-16(n,\alpha)c-13$  reaction at 14,1 mev. *Nuclear Physics*, A110 :555, 1968.
- [108] Laboratoire de physique corpusculaire. <http://www.lpc-caen.in2p3.fr/?lang=fr>.
- [109] Laboratoire de physique corpusculaire - groupe aval du cycle electronucléaire. <http://www.lpc-caen.in2p3.fr/article373.html?lang=fr>.
- [110] H.A. Van Sprang and H.H. Brongersma. Electron impact induced light emission from  $cf_4$ ,  $cf_3h$ ,  $cf_3cl$ ,  $cf_2cl_2$  and  $cfcl_3$ . *Chemical Physics*, 35 :51, 1978.
- [111] U. Müller, T. Bubel, G. Schulz, A. Sevilla, J. Dike, and K. Becker. Further studies of the continuous uv emission produced by electron impact on  $cf_4$ . *Zeitschrift für Physik*, D24 :131, 1992.
- [112] A. Pansky, A. Breskin, A. Buzulutskov, R. Chechik, V. Elkind, and J. Va'vra. The scintillation of  $cf_4$  and its relevance to detection science. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A354 :262, 1995.
- [113] A. Morozov, M.M.F.R. Fraga, L. Pereira, L.M.S. Margato, S.T.G. Fetal, B. Guerard, G. Manzin, and F.A.F. Fraga. Photon yield for ultraviolet and visible emission from  $cf_4$  excited with alpha-particles. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, B268 :1456, 2010.
- [114] T. Blake, C. D'Ambrosio, S. Easo, S. Eisenhardt, C. Fitzpatrick, R. Forty, C. Frei, V. Gibson, T. Gys, N. Harnew, P. Hunt, C.R. Jones, R.W. Lambert, C. Matteuzzi, F. Muheim, A. Papanestis, D.L. Perego, D. Piedigrossi, R. Plackett, A. Powell, S. Topp-Joergensen, O. Ullaland, D. Websdale, S.A. Wotton, and K. Wyllie. Quenching the scintillation in  $\{CF_4\}$  cherenkov gas radiator. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 791 :27 – 31, 2015.
- [115] G.R. Cook, P.H. Metzger, and M. Ogawa. Absorption, photoionization, and fluorescence of  $co_2$ . *The Journal of Chemical Physics*, 44(8), 1966.
- [116] W.R. Ware. Oxygen quenching of fluorescence in solution : an experimental study of the diffusion process. *The Journal of Physical Chemistry*, 66 :455, 1962.
-

- 
- [117] R.J. McDonald and B.K. Selinger. Carbon dioxide as a quencher of fluorescence. *Australian Journal of Chemistry*, 26(12) :2715, 1973.
- [118] B. Haesner, W.Heeringa, H.O.Klages, H.Dobiasch, G.Schmalz, P.Schwarz, J.Wilczynski, B.Zeitnitz, and F.Kaeppler. Measurement of the he-3 and the he-4 total neutron cross sections up to 40 mev. *Physical Review*, 1983.
- [119] M. Drogg and N. Otuka. Evaluation of the absolute angle-dependent differential neutron production cross sections by the reactions  $3\text{h}(p,n)3\text{he}$ ,  $1\text{h}(t,n)3\text{he}$ ,  $2\text{h}(d,n)3\text{he}$ ,  $3\text{h}(d,n)4\text{he}$ , and  $2\text{h}(t,n)4\text{he}$  and of the cross sections of their time-reversed counterparts up to 30 mev and beyond. Technical Report 0019, IAEA, 2015.
- [120] G. Lehaut, S. Salvador, J.-M. Fontbonne, F.-R. Lecolley, J. Perronnel, and C. Vandamme. Scintillation properties of n2 and cf4 and performances of a scintillating ionization chamber. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A797 :57, 2015.
- [121] O. Stern and M. Volmer. Über die abklingzeit der fluoreszenz. *Physikalische Zeitschrift*, 20 :183, 1919.
- [122] H. Morii, K. Mizouchi, T. Nomura, N. Sasao, T. Sumida, M. Kobayashi, Y. Murayama, and R. Takashima. Quenching effects in nitrogen gas scintillation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A526 :399, 2004.
- [123] Fast acquisition system for nuclear research. <http://faster.in2p3.fr>.
- [124] Fast acquisition system for nuclear research - about rhb. <http://faster.in2p3.fr/index.php/rhb>.
- [125] M. Henry. Etude des propriétés de scintillation de mélanges gazeux dans le cadre du dispositif expérimental scalp. Master's thesis, Université de Caen Normandie, 2014.
- [126] N. Tsoulfanidis. *Measurement and detection of radiation*. Taylor Francis, 1995.
- [127] RTC, editor. *Photomultiplicateurs*. La Radiotechnique-Compelec, 1981.
- [128] Hamamatsu photopmultiplier tube r2059. <https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/category/3100/3001/R2059/index.html>.
- [129] G. Lehaut. Etude d'une chambre d'ionisation scintillante pour la détection de fragments de fission. Rapport du 4 mars 2013.
- [130] X. Ledoux, M. Aïche, M. Avrigneanu, V. Avrigneanu, L. Audouin, E. Balanzat, B. Bandedat, G. Ban, G. Barreau, E. Bauge, G. Bélier, P. Bem, V. Blideanu, C. Borcea, S. Bouffard, T. Caillaud, A. Chatillon, S. Czajkowski, P. Dessagne, D. Doré, M. FalLOT, F. Farget, U. Fischer, L. Giot, T. Granier, S. Guillous, F. Gunsing, C. Gustavsson, B. Jacquot, K. Jansson, B. Jurado, M. Kerveno, A. Klix, O. Landoas, F.R. Lecolley, J.L. Lecouey, M. Majerle, N. Marie, T. Materna, J. Mrazek, F. Negoita, J. Novak, S. Oberstedt, A. Oberstedt, S. Panebianco, L. Perrot, A.J.M. Plompen, S. Pomp, J.M. Ramillon, D. Ridikas, B. Rossé, G. Rudolf, O. Serot, S.P. Simakov, E. Simeckova, A.G. Smith, J.C. Sublet, J. Taieb, L. Tassan-Got, D. Tarrío, A. Taki-bayev, I. Thfoin, I. Tsekhanovich, and C. Varignon. The neutrons for science facility at spiral-2. *Nuclear Data Sheets*, 119 :353, 2014.
- [131] <http://www.ganil-spiral2.eu/spiral2>.
- [132] X. Ledoux. Communication personnelle.
- [133] [http://geant4.cern.ch/support/source\\_archive.shtml](http://geant4.cern.ch/support/source_archive.shtml).
- [134] <https://root.cern.ch/>.
- [135] B. Tuffin. *La simulation de Monte Carlo*. Hermes/Lavoisier, 2010.
-

- [136] S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, P. Arce, M. Asai, D. Axen, S. Banerjee, G. Barrant, F. Behner, L. Bellagamba, J. Boudreau, L. Broglia, A. Brunengo, H. Burkhardt, S. Chauvie, J. Chuma, R. Chytraccek, G. Cooperman, G. Cosmo, P. Degtyarenko, A. Dell'Acqua, G. Depaola, D. Dietrich, R. Enami, A. Feliciello, C. Ferguson, H. Fesefeldt, G. Folger, F. Foppiano, A. Forti, S. Garelli, S. Giani, R. Giannitrapani, D. Gibin, J.J. Gómez Cadenas, I. González, G. Gracia Abril, G. Greeniaus, W. Greiner, V. Grichine, A. Grossheim, S. Guatelli, P. Gumplinger, R. Hamatsu, K. Hashimoto, H. Hasui, A. Heikkinen, A. Howard, V. Ivanchenko, A. Johnson, F.W. Jones, J. Kallenbach, N. Kanaya, M. Kawabata, Y. Kawabata, M. Kawaguti, S. Kelner, P. Kent, A. Kimura, T. Kodama, R. Kokoulin, M. Kossov, H. Kurashige, E. Lamanna, T. Lampén, V. Lara, V. Lefebure, F. Lei, M. Liendl, W. Lockman, F. Longo, S. Magni, M. Maire, E. Medernach, K. Minamimoto, P. Mora de Freitas, Y. Morita, K. Murakami, M. Nagamatu, R. Nartallo, P. Nieminen, T. Nishimura, K. Ohtsubo, M. Okamura, S. O'Neale, Y. Oohata, K. Paech, J. Perl, A. Pfeiffer, M.G. Pia, F. Ranjard, A. Rybin, S. Sadilov, E. Di Salvo, G. Santin, T. Sasaki, N. Savvas, Y. Sawada, S. Scherer, S. Sei, V. Sirotenko, D. Smith, N. Starkov, H. Stoecker, J. Sulkimo, M. Takahata, S. Tanaka, E. Tcherniaev, E. Safai Tehrani, M. Tropeano, P. Truscott, H. Uno, L. Urban, P. Urban, M. Verderi, A. Walkden, W. Wander, H. Weber, J.P. Wellisch, T. Wenaus, D.C. Williams, D. Wright, T. Yamada, H. Yoshida, and D. Zschiesche. Geant4—a simulation toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 506(3) :250, 2003.
- [137] S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, P. Arce, M. Asai, D. Axen, S. Banerjee, G. Barrant, F. Behner, L. Bellagamba, J. Boudreau, L. Broglia, A. Brunengo, H. Burkhardt, S. Chauvie, J. Chuma, R. Chytraccek, G. Cooperman, G. Cosmo, P. Degtyarenko, A. Dell'Acqua, G. Depaola, D. Dietrich, R. Enami, A. Feliciello, C. Ferguson, H. Fesefeldt, G. Folger, F. Foppiano, A. Forti, S. Garelli, S. Giani, R. Giannitrapani, D. Gibin, J.J. Gómez Cadenas, I. González, G. Gracia Abril, G. Greeniaus, W. Greiner, V. Grichine, A. Grossheim, S. Guatelli, P. Gumplinger, R. Hamatsu, K. Hashimoto, H. Hasui, A. Heikkinen, A. Howard, V. Ivanchenko, A. Johnson, F.W. Jones, J. Kallenbach, N. Kanaya, M. Kawabata, Y. Kawabata, M. Kawaguti, S. Kelner, P. Kent, A. Kimura, T. Kodama, R. Kokoulin, M. Kossov, H. Kurashige, E. Lamanna, T. Lampén, V. Lara, V. Lefebure, F. Lei, M. Liendl, W. Lockman, F. Longo, S. Magni, M. Maire, E. Medernach, K. Minamimoto, P. Mora de Freitas, Y. Morita, K. Murakami, M. Nagamatu, R. Nartallo, P. Nieminen, T. Nishimura, K. Ohtsubo, M. Okamura, S. O'Neale, Y. Oohata, K. Paech, J. Perl, A. Pfeiffer, M.G. Pia, F. Ranjard, A. Rybin, S. Sadilov, E. Di Salvo, G. Santin, T. Sasaki, N. Savvas, Y. Sawada, S. Scherer, S. Sei, V. Sirotenko, D. Smith, N. Starkov, H. Stoecker, J. Sulkimo, M. Takahata, S. Tanaka, E. Tcherniaev, E. Safai Tehrani, M. Tropeano, P. Truscott, H. Uno, L. Urban, P. Urban, M. Verderi, A. Walkden, W. Wander, H. Weber, J.P. Wellisch, T. Wenaus, D.C. Williams, D. Wright, T. Yamada, H. Yoshida, and D. Zschiesche. Geant4 — a simulation toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A506(3) :250, 2003.
- [138] J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, P. Arce, M. Asai, T. Aso, E. Bagli, A. Bagulya, S. Banerjee, G. Barrant, B.R. Beck, A.G. Bogdanov, D. Brandt, J.M.C. Brown, H. Burkhardt, Ph. Canal, D. Cano-Ott, S. Chauvie, K. Cho, G.A.P. Cirrone, G. Cooperman, M.A. Cortés-Giraldo, G. Cosmo, G. Cuttone, G. Depaola, L. Desorgher, X. Dong, A. Dotti, V.D. Elvira, G. Folger, Z. Francis, A. Galoyan, L. Garnier,

M. Gayer, K.L. Genser, V.M. Grichine, S. Guatelli, P. Guèye, P. Gumplinger, A.S. Howard, I. Hřivnáčová, S. Hwang, S. Incerti, A. Ivanchenko, V.N. Ivanchenko, F.W. Jones, S.Y. Jun, P. Kaitaniemi, N. Karakatsanis, M. Karamitros, M. Kelsey, A. Kimura, T. Koi, H. Kurashige, A. Lechner, S.B. Lee, F. Longo, M. Maire, D. Mancusi, A. Mantero, E. Mendoza, B. Morgan, K. Murakami, T. Nikitina, L. Pandola, P. Paprocki, J. Perl, I. Petrović, M.G. Pia, W. Pokorski, J.M. Quesada, M. Raine, M.A. Reis, A. Ribon, A. Ristić Fira, F. Romano, G. Russo, G. Santin, T. Sasaki, D. Sawkey, J.I. Shin, I.I. Strakovsky, A. Taborda, S. Tanaka, B. Tomé, T. Toshito, H.N. Tran, P.R. Truscott, L. Urban, V. Uzhinsky, J.M. Verbeke, M. Verderi, B.L. Wendt, H. Wenzel, D.H. Wright, D.M. Wright, T. Yamashita, J. Yarba, and H. Yoshida. Recent developments in geant4. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A835 :186, 2016.

[139] <http://www.oecd-nea.org/janisweb>.

[140] Catalogue des gaz spéciaux d'air liquide. [http://publication.airliquide.com/GIS/catalogue\\_gaz\\_speciaux/files/assets/common/downloads/files/Catalogue%20Gaz%20Sp%C3%A9ciaux.pdf](http://publication.airliquide.com/GIS/catalogue_gaz_speciaux/files/assets/common/downloads/files/Catalogue%20Gaz%20Sp%C3%A9ciaux.pdf).

---

## Résumé

SCALP (Scintillating ionization Chamber for ALpha particle production in neutron induced reactions) est un dispositif expérimental conçu pour la mesure de la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ . Cette réaction fait partie de la HPRL (High Priority Request List) de la NEA. Elle est très importante pour la physique des réacteurs car la production d'hélium a des conséquences sur le fonctionnement des réacteurs électrogènes à neutrons thermiques et neutrons rapides. Les simulations Monte Carlo effectuées avec GEANT4 montrent que le dispositif conçu (une chambre d'ionisation scintillante entourée de quatre photo-multiplieurs) est apte à la mesure de la section efficace. Les sections efficaces des réactions  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  et  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  (réaction nucléaire étudiée pour la normalisation en section efficace) entre le seuil en énergie et 10 MeV peuvent être mesurées expérimentalement avec une erreur relative minimale de 15%. Toutefois, il faudra en améliorer les performances pour obtenir de plus faibles incertitudes comme requis par la NEA : une mesure de la section efficace de la réaction  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  avec une précision inférieure à 10%.

**Mots clés :** *Production d'hélium par réaction induite d'un neutron sur l'oxygène, chambre d'ionisation scintillante, photo-multiplieurs, mesures de section efficace, simulations par la méthode de Monte Carlo*

## Abstract

SCALP (Scintillating ionization Chamber for ALpha particle production in neutron induced reactions) is an experimental device conceived to measure the cross section of the n-induced reaction on oxygen  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ . This latter reaction belongs to the HPRL (High Priority Request List) NEA list and is relevant in reactor physics because of the He production affecting important fast and thermal neutron reactor's parameters. The Monte Carlo simulations with GEANT4 showed that the device (a scintillating ionization chamber surrounded by four photomultiplier tubes) can measure and discriminate the different reactions inside the scintillating ion chamber. Cross section of  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  and  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  (used for cross section normalisation) reactions between the energy threshold and 10 MeV could be experimentally measured with a 15% relative accuracy. However some improvement will be necessary to obtain lower uncertainties as requested by the NEA :  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$  cross section measurement with a accuracy better than 10%.

**Key words :** *Helium production from neutron induced reactions, scintillating ionization chamber, photomultiplier tubes, cross section measurements, Monte Carlo simulations*

---