Université de Strasbourg

Note de Synthèse de l'activité de recherche présentée en vue de l'obtention de l'

Habilitation à diriger les recherches

*P*résentée par

Maëlle KERVENO

Chargée de Recherche, IPHC - DRS/DNR

NACRE
le Noyau Au Coeur du RéactEur

---

*S*outenue le

12 juillet 2018

Membres du Jury

Rapporteurs :
Jérôme BAUDOT (Professeur, Université de Strasbourg)
Eric BAUGE (Directeur de Recherche, CEA/DAM, Bruyères le Châtel)
Bertram BLANK (Directeur de Recherche, CNRS, CEN Bordeaux-Gradignan)
Examinateurs :
Férid HADDAD (Professeur, Université de Nantes)
Robert JACQMIN (Directeur de Recherche, CEA/DEN, Cadarache)
Arjan PLOMPEN (Expert sénior, EC-JRC-Geel, Belgique)
Garant :
Philippe DESSAGNE (Directeur de Recherche, CNRS, IPHC, Strasbourg)



"Un jour, dit la légende, il y eut un immense incendie de forêt. Tous les animaux terrifiés et atterrés observaient, impuissants, le désastre. Seul le petit colibri s'active, allant chercher quelques gouttes d'eau dans son bec pour les jeter sur le feu. Au bout d'un moment, le tatou, agacé par ses agissements dérisoires, lui dit : « Colibri ! Tu n'es pas fou ? Tu crois que c'est avec ces gouttes d'eau que tu vas éteindre le feu ? » « Je le sais, répond le colibri, mais je fais ma part ."

Conte Amérindien

A Odette,

Remerciements

J'ai été affectée à l'IPHC en 2002 et j'y ai trouvé un environnement et des conditions de travail très favorables. Les directeurs successifs, Daniel Huss, Christelle Roy et maintenant Rémi Barillon, ont toujours soutenu nos travaux en nous laissant une grande liberté. Je les en remercie aujourd'hui. Je remercie aussi Gérard Rudolf de m'avoir accueillie, à mon arrivée à l'IPHC, dans son équipe GRACE (aujourd'hui DNR, c'est moins joli...) et de m'avoir permis de partager son projet au premier rang.

Je remercie aussi très chaleureusement tous les membres du jury. Tout d'abord, les rapporteurs, Bertram Blank, Eric Bauge et Jérôme Baudot qui ont accepté de prendre de leur temps précieux pour évaluer scrupuleusement ce travail. Je remercie également Férid Haddad, Robert Jacqmin et Arjan Plompen d'avoir accepté de faire partie de ce jury d'HDR et d'avoir contribué à la richesse des discussions qui ont suivi la soutenance.

Depuis mes premiers pas au laboratoire SUBATECH, en passant par le cyclotron de Louvain-la-Neuve, le LPSC et puis l'IPHC, j'ai croisé des collègues qui ont marqué mon chemin professionnel. Chacun d'entre eux m'ont fait partagé leur savoir, m'ont inspirée et m'ont guidée, surement malgré eux, dans ma vie professionnelle. Je voudrais remercier ici ces personnes qui sont devenues pour certaines des amis. Ferid Haddad, Isabelle Slypen, Jean-Marie Loiseaux, Annick Billebaud, Sylvain David, Arjan Plompen et Philippe Dessagne.

Philippe que je tiens aussi à remercier plus particulièrement. Nous travaillons ensemble depuis 13 ans. Ses qualités sont nombreuses en tant que physicien mais aussi en tant que collègue et ami. Il ne rechigne jamais pour discuter (et re-discuter) des projets et pour répondre à mes (nombreuses) questions. Son enthousiasme, son dynamisme et son optimisme sont communicatifs. Notre complémentarité nous permet d'atteindre la plupart des objectifs que nous nous fixons malgré les difficultés et aléas rencontrés. Philippe est un collègue précieux, toujours présent pour m'accompagner et me soutenir (ce qui a été particulièrement important ces derniers mois !). Sans lui, le travail présenté dans cette synthèse ne serait pas ce qu'il est. MERCI Philippe.

Au delà de mon propre travail, ce manuscrit présente les travaux de toute une équipe, je remercie Greg Henning et Eliot Party pour les efforts partagés et la bonne ambiance dans laquelle nous travaillons jour après jour. J'ai également la chance de travailler au sein de collaborations de qualité tant sur le plan professionnel que relationnel. Je souhaite remercier ici les collègues du EC-JRC Geel, Arjan Plompen et Markus Nyman, les collègues de l'IFIN-HH, Andu Negret, Catalin Borcea et Adina Olacel ainsi que les collègues du CEA qui travaillent avec nous au sein de la collaboration EEDIN, Marc Dupuis, Stéphane Hilaire et Cyrille De Saint Jean.

Au niveau du laboratoire, je peux toujours compter sur le soutien sans faille de notre service administratif, qui ne rechigne jamais à essayer de nous simplifier les démarches toujours plus complexes. Je leur en suis reconnaissante et les remercie grandement. J'ai aussi la chance de pouvoir m'appuyer sur les grandes qualités de notre service de mécanique pour assurer la réalisation technique de nos projets. Je remercie ici particulièrement, Gérard Gaudiot, Eddy Dangelser, Guy Heitz, Jean Noël Grapton, Cédric Schwab et Marc Krauth.

Enfin, ils ont été en première ligne pour supporter ces derniers mois denses et compliqués. Gilles et Louen, merci pour votre patience et votre soutien. Et enfin merci à Annie pour son soutien et pour la relecture de ce manuscrit qui contient bien trop de virgules !

Table des matières

Remerciements iv

Table des Matières vi

Liste des Figures viii

Liste des Tableaux xiv

Abréviations xvi

Introduction 1

1 Les données nucléaires pour les réacteurs à l'IN2P3 5
1.1 Préambule sur les déchets nucléaires . . . 6
1.2 La naissance d'une thématique - contexte des années 1990 . . . 10
1.2.1 La loi Bataille de 1991 et l'IN2P3 . . . 10
1.2.2 Le concept d'ADS et la filière thorium . . . 15
1.2.3 Les programmes de données nucléaires associés . . . 18
1.3 Les années 2000, ancrage des recherches . . . 20
1.3.1 Les programmes de recherches à l'IN2P3 . . . 20
1.3.2 Le soutien des programmes européens . . . 24
1.3.3 La loi de 2006 . . . 30
1.4 Les années 2010 - vers la maturité ? . . . 32
1.4.1 De GEDEPEON à NEEDS . . . 33
1.4.2 La structuration des activités à l'IN2P3 . . . 34
1.4.3 Le projet structurant NEEDS-NACRE . . . 37
1.4.4 De la mesure à l'évaluation, les activités actuelles . . . 40
1.5 Conclusion . . . 43

2 L'étude des réactions (n,xn) 45
2.1 Importance des réactions (n,xn) dans les réacteurs . . . 46
2.1.1 La diffusion inélastique . . . 47
2.1.2 Les réactions (n,xn) . . . 53
2.2 Méthodes expérimentales . . . 55
2.2.1 Mesures directes et indirectes . . . 55
2.2.2 La spectroscopie γ prompte . . . 56
2.3 GRAPhEME à GELINA@EC-JRC-Geel . . . 62
2.3.1 Dispositif GRAPhEME . . . 62

2.3.2 Analyse de données . . . 69
2.4 Conclusion . . . 79

3 Des sections efficaces (n,xn γ) aux sections efficaces (n,xn) 83
3.1 Déduire les sections efficaces (n,xn) . . . 83
3.2 Les codes de réactions nucléaires . . . 86
3.3 L'apport des mesures (n,xn γ) pour la modélisation des réactions nucléaires 90
3.4 Quel objectif de précision sur les sections efficaces (n,xn) ? "work in progress" . . . 103
3.5 Conclusion . . . 107

4 Perspectives 109
4.1 GRAPhEME et au delà . . . 110
4.1.1 Les mesures sur des actinides très radioactifs . . . 110
4.1.2 Le cas des transitions des niveaux de basse énergie . . . 116
4.1.3 Les mesures de structure : une question ouverte . . . 121
4.2 SPIRAL2/NFS : les réactions (n,2n) sous les projecteurs . . . 122
4.2.1 L'installation NFS . . . 123
4.2.2 LoI ^{90}Zr(n,3n) . . . 129
4.2.3 Mesures des réactions (n,2n) sur les actinides . . . 131
4.3 Maintenir les collaborations expérimentateurs / théoriciens / évaluateurs . 134
4.4 Un pas vers les physiciens des réacteurs . . . 136
4.5 Conclusion . . . 137

Conclusion 139

A Programmes des workshops ; animation scientifique 143

B Projet NEEDS-NACRE : Réponse à l'appel à projet NEEDS2016 149

C CURRICULUM VITÆ 157

Bibliographie 191

Table des figures

1.1 Répartition du volume des déchets par secteurs économiques (gauche) et du niveau de radioactivité des stocks de déchets (droite) à fin 2015, figure extraite de [1]. . . . 7
1.2 Gestion des déchets en fonction de leur nature, figure extraite de [1]. . . . 7
1.3 Cycle du combustible complet, de la mine au réacteur, en passant par le recyclage et la production de déchets associés, figure extraite de [1]. . . . 8
1.4 Composition d'un assemblage après irradiation dans un REP (initialement 500 kg d'uranium étaient présents). . . . 9
1.5 Allure générale de l'évolution temporelle de la radiotoxicité des différents composants majeurs du combustible irradié. Unité des ordonnées : Sv par tonne de métal lourd initial, figure extraite de [2]. . . . 9
1.6 Schéma de principe du système hybride (source https ://nsec.jaea.go.jp/ndre/ndre3/trans/objective-e.html). . . . 16
1.7 Cycle du thorium. . . . 17
1.8 Comparaison des sections efficaces neuroniques sur l'^{238}U et des spectres de neutrons typiques (haut), aux différents flux instantanés (milieu) et moyen (bas) des principales installations temps de vol mondiales. Figure Frank Gunsing. . . . 24
1.9 Calendrier prospectif, envisagé en 2006 par l'OPCST, des différentes options ouvertes dans le cadre des recherches de la loi Bataille de 1991. . . . 32
1.10 Proposition de structure de la thématique Energie à l'IN2P3 soumise à la direction en 2014. DAS : Directeur Adjoint Scientifique . . . 36
1.11 Schéma résumant le cycle de l'évaluation dans le cadre des données nucléaires pour les réacteurs et dans lequel le projet NACRE s'inscrit. . . . 39
1.12 Les outils nationaux et européens dédiés aux recherches sur les données nucléaires pour les réacteurs depuis la loi Bataille de 1991. . . . 44

2.1 Rapport énergie finale sur énergie initiale en fonction de l'énergie incidente du neutron pour les chocs élastiques et inélastiques. . . . 47
2.2 Section efficace de diffusion inélastique, de fission et de réaction (n,2n) sur ^{238}U (gauche) et comparaison des bases de données expérimentales aux bases de données évaluées. . . . 48
2.3 Section efficace de diffusion inélastique sur ^{238}U provenant de la base de données ENDF/B-VII.1. L'ordonnée à gauche correspond aux incertitudes et l'ordonnée à droite à la section efficace. . . . 49
2.4 Contribution des incertitudes sur les sections efficaces des réactions à l'incertitude sur le k_{eff} du système EFR et ce pour 21 isotopes. . . . 50
2.5 Incertitudes cibles pour l'uranium 238 dans 6 types de systèmes nucléaires (ABTR, SFR, EFR, GFR, LFR, ADMAB). . . . 51

2.6 Bases de données expérimentales et évaluées pour les réactions (n,2n) sur ^{232}Th et ^{233}U. . . . 54
2.7 Bases de données expérimentales et évaluées pour la réaction (n,2n) sur ^{238}U. . . . 54
2.8 Schéma de principe du système de détection pour la méthode de la spectroscopy γ prompte couplée à des mesures de temps de vol. Le schéma n'est pas à l'échelle et ne respecte pas les proportions. . . . 58
2.9 Exemple d'oscillogramme du signal à la sortie du pré-amplificateur enregistré lors de tests à n-TOF. La saturation correspond à une énergie d'environ 3.5 MeV et dure 75 μs. . . . 61
2.10 Evolution de la résolution en énergie neutron en fonction de l'énergie neutron à 30 m de la source de production. . . . 63
2.11 A gauche : Spectre temps de vol obtenu pour un détecteur Germanium où les événements "pile-up" ne sont pas considérés. A droite : le facteur de correction du temps mort et du "pile-up" en fonction du temps obtenu en suivant une raie de radioactivité. . . . 64
2.12 Rapport C/E (gauche) obtenu pour un détecteur après optimisation de sa géométrie (droite). . . . 66
2.13 Environnement de notre aire expérimentale FP16/30 m et les spectres en énergie et en temps pour un détecteur Germanium obtenus avant la réduction du bruit de fond. . . . 67
2.14 Mise en évidence de l'influence de l'environnement des autres bases de vol sur notre aire expérimentale (FP16/30 m) et de l'effet de protection d'un cristal BGO entourant le cristal de Germanium. . . . 67
2.15 Distribution en temps (droite) et énergie (gauche) des *gamma* détectés par un détecteur Germanium avant et après l'installation du blindage en plomb. . . . 68
2.16 Distribution en temps d'un détecteur Germanium affectée par des oscillations dues au rayonnement électromagnétique généré par les klystrons de GELINA. . . . 68
2.17 Histoire de GRAPhEME, 2005-2006. . . . 70
2.18 Histoire de GRAPhEME, 2006-2007. . . . 71
2.19 Histoire de GRAPhEME, 2007-2009. . . . 72
2.20 Histoire de GRAPhEME, 2011-2014. . . . 73
2.21 Histoire de GRAPhEME, 2015-2016. . . . 74
2.22 Histoire de GRAPhEME, 2016. . . . 75
2.23 Suivi de la position (en canal) du pic à 511 keV en fonction des semaines de prise de données pour le détecteur gris et rouge. . . . 76
2.24 Portion des distributions en énergie γ pour le détecteur VERT (ligne verte) pour un lot de plusieurs semaines sommées et pour le détecteur BLEU pour deux semaines distinctes de 2010 (ligne bleue) et de 2011 (ligne rouge). On voit la perte de résolution sur le lot de 2010, particulièrement visible pour les pics présents autour du canal 1800. . . . 77
2.25 Flux de neutrons différentiel mesuré avec GRAPhEME dans l'aire expérimentale FP16/30 m de GELINA. . . . 78
2.26 Illustration de la génération des distributions en énergie γ (spectres de droite) à partir des fenêtres en temps appliquées sur la distribution en temps (spectres de gauche) obtenues pour les données de l'^{235}U. . . . 79

2.27 Spectre bi-dimensionnel de l'énergie γ en fonction du temps de détection pour le détecteur vert obtenu avec la cible d'^{238}U. On voit clairement la contribution de γ-flash et les différentes transitions γ. 80
2.28 Portion de la distribution en énergie-γ, dans le cas de la réaction ^{238}U(n,n'), centrée sur les faibles énergies. On voit apparaître faiblement la transition à 45 keV (2^+-0^+) par rapport aux transitions provenant des niveaux supérieurs de la bande du fondamental. 80

3.1 Schéma des deux stratégies possibles pour déduire les sections efficaces (n,xn) totales des sections efficaces (n,xn γ) mesurées. 84
3.2 Section efficace totale ^{238}U(n,n') comparée aux contributions des sections efficaces ^{238}U(n,n' γ) pour les transitions γ rejoignant le fondamental et la transition entre le deuxième et premier niveau. La correction de conversion interne est appliquée pour les transitions entre le premier niveau et le fondamental et le deuxième et le premier niveau. L'insert représente une vue logarithmique. Calculs réalisés avec le code de réaction nucléaire TALYS 1.8. 86
3.3 Schéma de la modélisation des réactions nucléaires. 88
3.4 Spectre caractéristique de l'émission d'un neutron dans le domaine en énergie du continu. 88
3.5 Exemple d'enchainement des modèles tels qu'ils sont implémentés dans le code de réaction nucléaire TALYS. 89
3.6 Portion du spectre en énergie γ pour des fenêtres en temps correspondant aux réactions (n,n')((a), rouge) et (n,2n) ((b), rouge) comparée au spectre de décroissance radioactive (noir) pour la cible ^{235}U. Les transitions analysées sont repérées en italique et en rouge, les transitions provenant de la décroissance des produits de fission sont labellisées "FP" en bleu. 92
3.7 Sections efficaces ^{235}U(n,n' γ) et ^{235}U(n,2n γ) comparées aux données expérimentales existantes et aux prédictions du code TALYS avec différents modèles et paramètres d'entrée. 93
3.8 Sections efficaces ^{232}Th(n,5n γ) pour trois transitions de la bande du fondamentale du ^{228}Th comparées aux prédictions du code TALYS-1.4 (calculs réalisés par A.J. Koning). 94
3.9 Section efficace de fission du Thorium 232 expérimentale, évaluée et calculée par TALYS-1.4. 95
3.10 Sections efficaces ^{238}U(n,n' γ) expérimentales et calculées pour les transitions dans la bande du fondamental. La différence entre le calcul microscopique (QRPA) ou classique (excitons) pour le pré-équilibre est clairement visible sur les transitions au delà du spin $4\hbar$. Figure Marc Dupuis. 97
3.11 Distributions en spin du noyau résiduel formé après l'émission de pré-équilibre d'un neutron, pour la réaction n+^{238}U, obtenues avec un calcul microscopique (JLM/QRPA) par rapport à un calcul classique d'excitons (Talys Presc.). 97

3.12 Sections efficaces ^{238}U(n,n' γ) expérimentales et calculées pour les transitions inter-bande (2-1). Trois approches pour les fonctions de force γ sont étudiées. La première (RIPL) décrit un calcul classique. E1-M1-QRPA est la combinaison d'un calcul classique avec une force γ microscopique et D+PREEQ, E1-M1 QRPA correspond à un calcul complet microscopique. Figure Marc Dupuis. Il faut noter que la transition à 584 keV (3^- - 4^+) est contaminée par une transition du plomb 208 à 583.19 keV à partir de 3 MeV. 98
3.13 Sections efficaces ^{238}U(n,n' γ) expérimentales et calculées pour les transitions inter-bande (3-1 et 3-2). Deux approches pour les fonctions de force γ sont étudiées. la première décrit un calcul classique (Input P.romain) et preeq-E1-M1-QRPA correspond à un calcul complet microscopique. Figure Marc Dupuis. 99
3.14 Sections efficaces ^{238}U(n,n' γ) expérimentales et calculées pour les transitions inter-bande (13-1 et 13-2). Deux approches pour les fonctions de force γ sont étudiées. La première décrit un calcul classique (Input P.Romain) et preeq-E1-M1-QRPA correspond à un calcul complet microscopique. Figure Marc Dupuis. 100
3.15 Rapport d'embranchement expérimental pour la décroissance du niveau 1^- à 680 keV de l'^{238}U comparé au rapport d'embranchement présent dans NNDC et celui mesuré par Govor *et al.*. 100
3.16 Extrait de l'article M. Kerveno *et al.* EPJA (2015) **51** : 167 où la sensibilité des modèles inclus dans TALYS est discutée en regard des sections efficaces (n,xn γ) mesurées avec le spectromètre GAINS. 102
3.17 Portion du schéma de niveau du ^{57}Fe (gauche). Les transitions en trait plein sont celles qui ont pu être mesurées. Les croix rouges représentent les transitions qui atteignent l'état fondamental et qui doivent être utilisées pour reconstruire la section efficace inélastique totale. Les transitions surlignées en vert correspondent à celles effectivement utilisées pour ce calcul selon la formule à droite. 104
3.18 Section efficace inélastique totale pour le ^{57}Fe obtenue avec une combinaison de données expérimentales et modélisées par le code EMPIRE. Les contributions de deux autres niveaux sont montrées. 105
3.19 Matrice de corrélation des sections efficaces de transition γ lors de réactions ^{238}U(n,n') et pour une énergie incidente de 1.3 MeV. Les sections efficaces ont été obtenues via une simulation Monte Carlo avec le code TALYS en faisant varier les rapports d'embranchement dans la structure de ^{238}U aléatoirement. 106
3.20 Planches réalisées pour introduire le workshop "Workshop on experimental and theoretical problematic around actinides for future reactors", organisé en collaboration avec Marc Dupuis et Stéphane Hilaire, dans le cadre de l'ESNT. mars 2014 108

4.1 Photos du détecteur HPGe segmenté en 36 pixels sur son banc de test à l'IPHC (gauche) et zoom sur le capot du cristal (droite) et sa forme en escalier pour s'approcher au plus près de la cible sans intercepter le faisceau. 111
4.2 Illustration du gain obtenu avec le détecteur segmenté, dans le cas de l'utilisation de cibles très radioactives (ici ^{233}U), concernant le taux d'empilement et la résolution en énergie. Extrait de la présentation fait à la conférence ND2016, Bruges, Belgique. 112

4.3 Sections efficaces des différentes voies de réactions possibles entre 0 et 30 MeV calculées par le code de réaction nucléaire EMPIRE pour l'uranium 233 et 238. . . . 113
4.4 Portions du spectre γ enregistré avec 8 pixels du détecteur segmenté, pour une cible d'^{233}U et après 867 heures de faisceau. Les différentes distributions correspondant à des fenêtres en temps relatives aux domaines de la radioactivité (rouge), des réactions (n,n') (noir-haut) et des réactions (n,2n) (noir-bas). . . . 114
4.5 Droite : Sections efficaces évaluées (ENDF et HEFF) des différentes voies de réactions possibles sur ^{239}Pu, (n,f), (n,n') et (n,2n), entre 0 et 20 MeV. Gauche : Sections efficaces, évaluées et expérimentales, des réactions ^{239}Pu(n,n') et (n,2n). . . . 114
4.6 Distributions en énergie γ (E_n=11.35 MeV obtenues lors de la campagne GEANIE). Les pics marqués d'une étoile correspondent à la radioactivité et ceux des transitions γ dans ^{238}Pu sont repérés par leur énergie. . . . 116
4.7 Principe de la conversion interne. Source http ://www.laradioactivite.com. 117
4.8 Distribution en énergie des principaux électrons et photons issus de la radioactivité de l'uranium 238 simulée avec MCNPX. . . . 118
4.9 Photo de l'intérieur de la chambre de DELCO avec les supports des détecteurs (gauche) et les détecteurs insérés (droite). . . . 119
4.10 Distribution en énergie, issue de la radioactivité de l'échantillon d'uranium, mesurée pendant 20 h de temps d'acquisition. . . . 121
4.11 Schéma de l'installation NFS où les salles du convertisseur et du temps de vol sont visibles. . . . 123
4.12 Caractéristiques des différents faisceaux de neutrons pouvant être produits à NFS. . . . 124
4.13 Fréquences du faisceau et résolutions en temps et en énergie accessibles à NFS. . . . 125
4.14 Simulation MCNPX-2.6 du faisceau de neutrons de l'installation NFS, de la sortie du premier collimateur (z=350 cm) et tout au long de la salle de temps de vol. . . . 126
4.15 Photos de la ligne faisceau, conçue et construite à l'IPHC, une fois installée dans la salle temps de vol de NFS. . . . 126
4.16 Simulation MCNPX-2.6 de la ligne sous vide du faisceau de neutrons (à droite). A gauche, définition des paramètres initiaux pour la simulation MCNPX-2.6 du second collimateur. . . . 127
4.17 Schéma du second collimateur et de son blindage tels qu'ils sont simulés avec MCNPX-2.6. L'encart en bas à gauche montre le profil du faisceau obtenu alors à une distance de 28.5 m de la source de neutrons et juste après la fin de la ligne sous vide. . . . 128
4.18 Simulation du bruit de fond γ (à gauche) et neutrons (à droite) dans et aux alentours du second collimateur. . . . 129
4.19 Schémas de niveaux partiels du ^{90}Zr et du ^{88}Zr produit par la réaction (n,3n) sur le ^{90}Zr et principe de la mesure simultanée de la section efficace ^{90}Zr(n,3n) par deux méthodes expérimentales différentes : la spectroscopie γ prompte et l'activation. . . . 130

4.20 Contraintes de l'expérience liées à la composition d'une cible de Zr naturel (à gauche). A droite, différentes sections efficaces totales (n,xn) sur les principaux isotopes du Zr, et partielles (n,xn γ) pour le ^{90}Zr, calculées par le code TALYS. 132
4.21 Comparaison des flux des différentes installations temps de vol mondiales. Figure Frank Gunsing. 133
4.22 Listes des noyaux potentiellement étudiés à NFS. 133

Liste des tableaux

1.1 Budget des programmes européens consacrés aux données nucléaires . . . 30

2.1 Caractéristiques des deux installations "temps de vol" Européennes majeures. 60

2.2 Campagnes expérimentales pour chaque isotope entre 2009 et 2014, statut et référence associée. 69

Abréviations

ADS	**A**ccelerator **D**riven **S**ystem
AEN	**A**gence pour l'**E**nergie **N**ucléaire
AIEA	**A**gence **I**nternatioanle pour l'**E**nergie **A**tomique
ANDRA	**A**gence **N**ationale pour la gestion des **D**échets **RA**dioactifs
BRGM	**B**ureau de **R**echerches **G**éologiques et **M**inières
CEA	**C**ommissariat à l'**E**nergie **A**tomique et aux **E**nergies **A**lternatives
CIELO	**C**ollaborative **I**nternational **E**valuated **L**ibrary **O**rganization
CNRS	**C**entre **N**ational de la **R**echerche **S**cientifique
EDF	**E**lectricité **D**e **F**rance
EEDIN	**E**tude **E**xpérimentale de la **D**iffusion **I**nélastique du **N**eutron pour les réacteurs du futur
FORPRO	**F**ormations **P**rofondes
GAINS	**G**amma **A**rray for **I**nelastic **S**cattering
GEANIE	**GE**rmanium **A**rray for **N**eutron **I**nduced **E**xcitations
GEDEON	**GE**stion des **DE**chets par des **O**ptions **N**ouvelles
GRAPhEME	**G**e**R**manium array for **A**ctinides **Pr**E**c**ise **ME**asurements
HPRL	**H**igh **P**riority **R**equest **L**ist
IN2P3	**I**nstitut **N**ational de **P**hysique **N**ucléaire et de **P**hysique des **P**articules
INSTN	**I**nstitut **N**ational des **S**ciences et **T**echniques **N**ucléaires
IRSN	**I**nstitut de **R**adioprotection et de **S**ûreté **N**ucléaire
MOX	Combustible à base d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium
MSBR	**M**olten **S**alt **B**reeder **R**eactor
MYRRHA	**M**ulti-purpose h**Y**brid **R**esearch **R**eactor for **H**igh-tech **A**pplications
NACRE	Le **N**oyau **A**u **C**oeur du **R**éact**E**ur

NEEDS	**Nucléaire Energie Environnement Déchets Société**
NFS	**N**eutrons **F**or **S**cience
NOMAD	**NO**uveaux **MA**tériaux pour les **D**échets
OCDE	**O**rganisation de **C**oopération et de **D**éveloppement **E**conomiques
OPALE	des d**O**nnées ex**P**érimentales à l'éva**L**uation pour les réact**E**urs
PACE	**P**rogramme sur l'**A**val du **C**ycle **E**lectronucléaire
PRACEN	**P**rogramme de **R**echerche sur l'**A**val du **C**ycle **E**lectronucléaire
PRACTIS	Physico-chimie des actinides et autres radioéléments en solutions et aux interfaces
REP	**R**éacteur à **E**au **P**ressurisée
RSF	**R**éacteur à **S**els **F**ondus
SciNEE	**Sci**ences **N**ucléaires pour l'**E**nergie et l'**E**nvironnement
UOX	Combustible à base d'oxyde d'uranium naturel enrichi
URE	Combustible à base d'oxyde d'uranium traitement réenrichi
WPEC	**W**orking **P**arty on International nuclear data**E**valuation **C**o-operation

Introduction

Je co-organise depuis 15 ans, tous les deux ans, l'école Energies & Recherches destinée aux doctorants du domaine de l'énergie (http ://eer.in2p3.fr/). Pendant une semaine, les cours s'enchainent pour décrire le panorama le plus complet possible des dernières avancées scientifiques et techniques du domaine en les mettant en regard des contraintes sociales, économiques et environnementales. L'auditeur prend alors conscience de la complexité du défi à relever par l'humanité pour réaliser cette fameuse transition énergétique dont on entend beaucoup parler mais qui ne cesse d'être un horizon... Cette idée d'école pour doctorants, S. David, O. Méplan et moi-même, nous est venue au tout début de notre carrière au CNRS. En effet, durant notre thèse effectuée dans la thématique, générale et alors émergente à l'IN2P3, de l'énergie, nous avions eu beaucoup de mal à appréhender les contours et les enjeux de cette vaste problématique. Pourtant, c'était bien cet aspect plus applicatif et lié à des enjeux de société qui m'avait poussée à choisir une thèse dans le domaine des données nucléaires plutôt que dans celui de la physique du plasma de quarks et de gluons. Le CNRS, via l'IN2P3, se positionnait alors comme pouvant être un acteur dans la problématique de l'énergie et particulièrement, de l'énergie nucléaire. La "science dure" se mettait au service de la société pour explorer de nouvelles pistes technologiques et approfondir les connaissances fondamentales qui permettent de mieux comprendre et simuler les systèmes de production d'énergie nucléaire ou les déchets radioactifs. Les physiciens nucléaires s'engageaient finalement dans des recherches qui aideraient la société et les pouvoirs publics à faire "les meilleurs" choix quant à la politique énergétique française du futur. Le domaine des données nucléaires appliquées au réacteur nucléaire résume idéalement l'apport de la science fondamentale dans les applications. En effet, l'amélioration de la connaissance fondamentale des processus nucléaires mis en jeu dans le réacteur permet de décrire plus précisément et, par conséquent, d'optimiser son fonctionnement. Les physiciens nucléaires ont donc un rôle important à jouer dans

cette thématique. Cette "transition vers l'application" a commencé, à l'IN2P3, dans les années 1990 suite à la parution de la loi bataille de 1991. Petit à petit, une communauté, sensible à la question de l'énergie, s'est constituée et s'est penchée sur des questions liées, principalement, à la gestion des déchets nucléaires et la diminution de leur production. Au fil des ans, une vraie thématique a émergé et aujourd'hui un programme de recherche spécifique INET (Innovative Nuclear Energy production Techniques) existe à l'IN2P3. Ce programme est composé de 5 master projets qui sont l'héritage des activités initiales lancées dans les années 90.

Ayant commencé mes premières activités de recherches en thèse dans le domaine des données nucléaires et, au moment de l'émergence de cette nouvelle thématique, il m'a paru intéressant de retracer le parcours de cette communauté pour comprendre comment elle s'est construite et quels outils elle a utilisés pour se structurer. D'autant que, lorsque j'ai commencé la rédaction de ce manuscrit, l'IN2P3 venait d'être "restructuré" après l'arrivée de son nouveau directeur, R. Pain. Nous avions dû faire preuve de pédagogie et de persuasion pour défendre la place de nos activités "appliquées". Le premier chapitre de ce manuscrit retrace donc cette histoire et tente de la mettre en perspective des années et des enjeux à venir.

Les données nucléaires utilisées dans les simulations de réacteurs sont des données dites évaluées. Elles sont construites à partir d'informations expérimentales qui sont combinées à l'état de l'art des modèles théoriques. Cette méthodologie permet notamment d'obtenir des informations là où les données expérimentales sont rares voire inexistantes. Pour répondre aux besoins des applications, un des enjeux aujourd'hui, est la réduction des incertitudes sur les données évaluées. Cela nécessite donc de travailler sur les deux aspects, expérimental et théorique, des données nucléaires. Mon travail de recherche concerne l'amélioration de la connaissance des données nucléaires expérimentales et plus particulièrement des sections efficaces de réaction induites par neutrons. Le chapitre deux se concentre sur mes activités de recherche depuis mon arrivée à l'IReS (devenu IPHC) en 2002 où j'ai été affectée dans l'équipe de G.Rudolf. Il s'intéressait particulièrement à l'étude des réactions (n,xn) et tentait de mettre en œuvre la méthode de la spectroscopie gamma prompte auprès de faisceaux de neutrons blancs. Dans ce chapitre, j'illustre d'abord l'importance des réactions (n,n') et (n,xn) dans le fonctionnement d'un cœur de réacteur nucléaire. Les enjeux de précision sur ces données nucléaires sont également

abordés. Je détaille ensuite la méthode expérimentale que nous avons choisie pour étudier ces réactions. Finalement, je décris le dispositif GRAPhEME que nous avons conçu auprès du faisceau de neutrons de GELINA (EC-JRC, Geel, Belgique).

La spectroscopie gamma prompte est une méthode indirecte permettant de déterminer les sections efficaces (n,n') et (n,xn) à partir des sections efficaces (n,xn γ) mesurées. Dans le cas des actinides, le recours aux codes de réaction nucléaire pour pallier les informations expérimentales manquantes est incontournable. Le troisième chapitre est donc consacré aux dialogues entre expérimentateurs et théoriciens qui travaillent en collaboration pour produire des sections efficaces (n,xn) aussi précises que possibles.

Enfin, le chapitre 4 résume mes perspectives de travail pour les années à venir. D'un point de vue expérimental, elles s'inscrivent bien évidemment dans la suite des travaux menés auprès de GELINA avec GRAPhEME et concernent les mesures sur des actinides très actifs comme l'uranium 233 et le plutonium 239. Je travaillerai également sur les développements permettant de pallier les limitations de la spectroscopie γ prompte. La future installation NFS de SPIRAL2 ouvre de nouvelles opportunités pour l'étude des réactions (n,2n). Compte tenu de notre engagement dans la construction des équipements de la salle temps de vol, nous ne manquerons pas de proposer un programme expérimental auprès de NFS. Notre objectif final étant de fournir des données expérimentales précises et utiles à l'évaluation, je continuerai d'œuvrer pour renforcer nos liens avec les théoriciens et les évaluateurs, en proposant/mettant en place des cadres communs de travail qu'ils soient nationaux ou européens. Enfin, je souhaite également poursuivre un rapprochement avec nos collègues physiciens des réacteurs de l'IN2P3 qui sont les utilisateurs, in fine, des données évaluées afin de contribuer au développement d'outils permettant les études de sensibilité aux sections efficaces.

Chapitre 1

Les données nucléaires pour les réacteurs à l'IN2P3

Je suis entrée dans le monde de la recherche en 1997 en commençant une thèse sur la production de particules chargées lors de réactions induites par neutrons sur du Plomb aux énergies intermédiaires. Ces mesures de données nucléaires s'inscrivaient dans le contexte des études sur les systèmes hybrides. A l'époque, même si plusieurs équipes de l'IN2P3 s'étaient déjà engagées dans ces nouvelles mesures, cette thématique des données nucléaires liées à l'énergie nucléaire était encore émergente dans l'institut. Vingt ans après, au moment où j'écris cette synthèse, ces recherches sont maintenant ancrées à l'IN2P3 et rassemblent une vingtaine de chercheurs qu'ils soient du CNRS ou des universités. Pourtant, compte tenu des évolutions budgétaires récentes et des politiques scientifiques et de recrutement, notre communauté se trouve face à des défis structuraux (en plus des enjeux de recherches) qu'elle doit relever si elle veut garder une efficacité et une compétitivité internationale. Comment une communauté se construit puis évolue, les interactions qu'elle nourrit, qu'elle développe avec l'extérieur, les outils qu'elle utilise pour mener à bien ses projets, ce sont tous ces aspects que je tente de décrire dans les premiers paragraphes de ce premier chapitre. Les actions mises en place ces trois dernières années pour améliorer la visibilité de nos projets ainsi que les enjeux et perspectives à moyen terme de notre thématique, sont décrits en fin de chapitre.

1.1 Préambule sur les déchets nucléaires

Plusieurs secteurs économiques, parce qu'ils utilisent les propriétés de la matière nucléaire, sont producteurs de déchets nucléaires. L'industrie nucléaire via ses centrales dédiées à la production d'électricité et via la filière de fabrication et de retraitement du combustible nucléaire, est la principale utilisatrice de matière radioactive. Dans le domaine nucléaire, la recherche qu'elle soit médicale, biologique, agronomique, en physique nucléaire et des particules, ..., ou les activités militaires pour la défense (propulsion nucléaire, armes, ...), utilisent également des matières radioactives. Enfin, la médecine avec les diagnostics et les traitements, l'extraction de terres rares, la fabrication de sources scellées ou les applications comme le contrôle de soudures, la stérilisation de matériels médicaux, la stérilisation et la conservation de produits alimentaires, ..., ont besoin de matières radioactives et produisent donc des déchets [1]. La définition d'un déchet peut parfois être complexe mais dans l'inventaire national des matières et déchets radioactifs de fin 2015, l'ANDRA précise qu'un déchet radioactif est une matière radioactive dont aucun usage n'est prévu. La Figure 1.1 présente les volumes de ces déchets engendrés par les différents secteurs économiques (gauche) et la répartition du volume et du niveau de radioactivité des stocks de déchets à fin 2015 (droite). On voit que l'industrie nucléaire est évidemment la principale activité économique engendrant des déchets nucléaires et que ceux de haute activité et de moyenne activité à vie longue représentent 3,3% du volume mais 99,8% de la radioactivité ! La Figure 1.2 récapitule la classification en vigueur en France aujourd'hui, en fonction de leur activité et de leur durée de vie, ainsi que le mode de gestion différencié qui leur est appliqué. Comme mentionné précédemment, l'industrie nucléaire est la première productrice de déchets nucléaires, et ce tout au long du cycle du combustible comme cela est schématisé sur la Figure 1.3. Cette figure illustre également quels types de déchets sont produits à chaque étape du cycle mais également les trois types de combustibles utilisés dans l'industrie nucléaire française qui participent, pour deux d'entre eux (MOX - Combustible à base d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium, et URE - Combustible à base d'oxyde d'uranium de retraitement réenrichi) à l'optimisation des ressources. Il faut préciser que la majorité des déchets générés dans ce cycle est constituée de déchets à vie courte et sont stockés en surface dans un site de l'ANDRA dans l'Aube. Ceux de moyenne activité à vie longue sont entreposés sur leurs sites de production. Les matières radioactives (uranium, plutonium) issues de ce cycle sont, soit valorisées (fabrication de nouveau combustibles - MOX et URE) soit

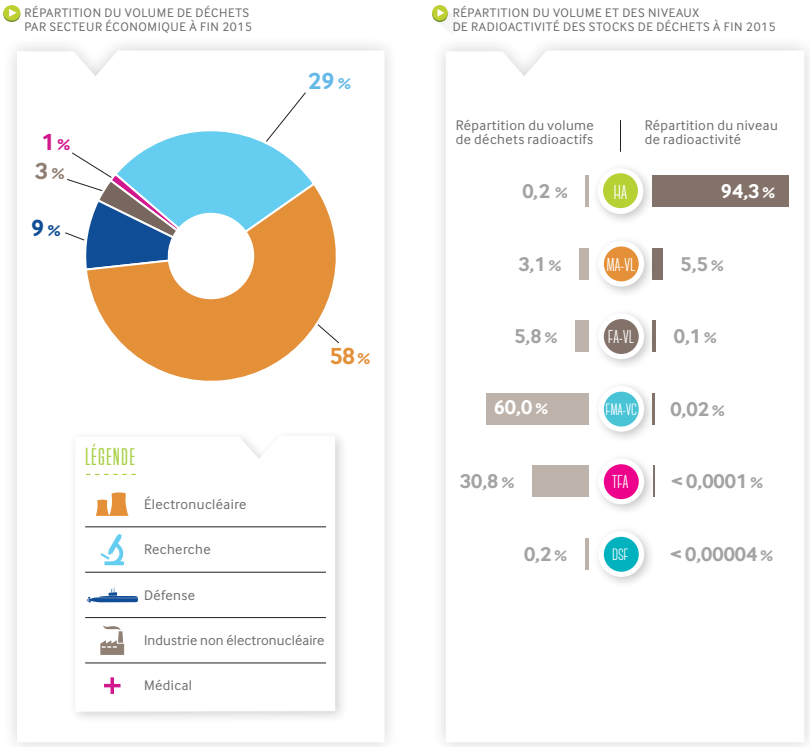


FIGURE 1.1: Répartition du volume des déchets par secteurs économiques (gauche) et du niveau de radioactivité des stocks de déchets (droite) à fin 2015, figure extraite de [1].

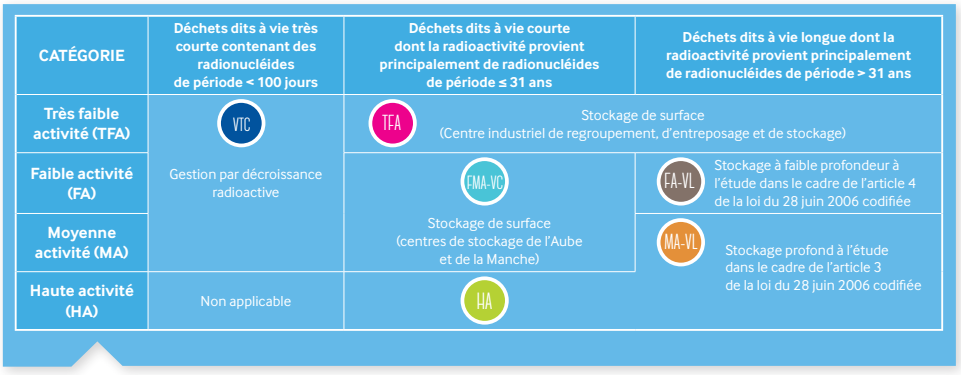


FIGURE 1.2: Gestion des déchets en fonction de leur nature, figure extraite de [1].

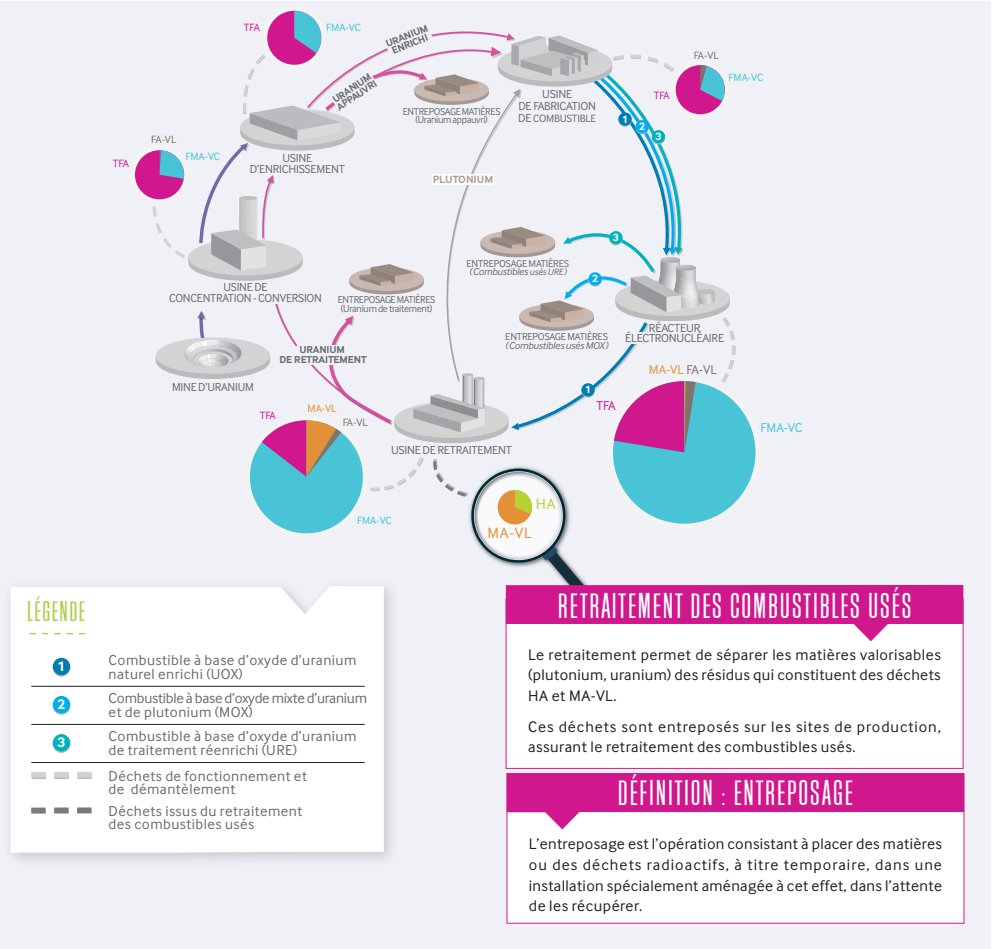


FIGURE 1.3: Cycle du combustible complet, de la mine au réacteur, en passant par le recyclage et la production de déchets associés, figure extraite de [1].

entreposées en attente d'une valorisation future possible, par exemple par la mise en fonctionnement de réacteurs de génération IV. La Figure 1.4 montre plus précisément la composition d'un crayon de combustible après irradiation dans un REP (Réacteur à Eau Pressurisée). On constate que la majeure partie de la matière présente est valorisable et ne constitue donc pas un déchet. Seuls les produits de fission et les actinides mineurs (Am, Cm, Np) constituent des déchets. La Figure 1.5 illustre également un autre aspect contraignant des déchets nucléaires que constitue leur radiotoxicité. La radiotoxicité d'un radionucléide est la toxicité de nature radioactive que peut subir un organisme qui est exposé à ce radionucléide, notamment par ingestion ou inhalation. On voit que la radiotoxicité totale du combustible usé est dominée sur le long terme par le plutonium, mais si l'on considère que le plutonium est une matière valorisable, ce sont alors les actinides mineurs qui dominent la radiotoxicité des déchets après 100 ans, avant de revenir au niveau de la radioactivité naturelle après 10000 ans.

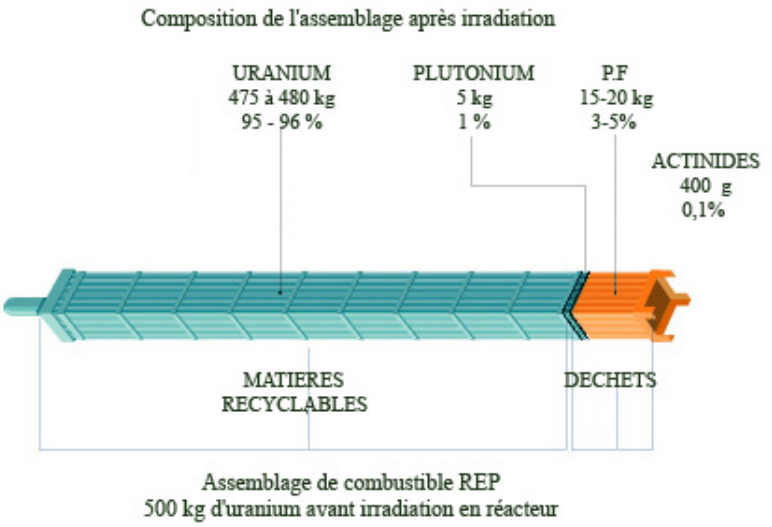


FIGURE 1.4: Composition d'un assemblage après irradiation dans un REP (initialement 500 kg d'uranium étaient présents).

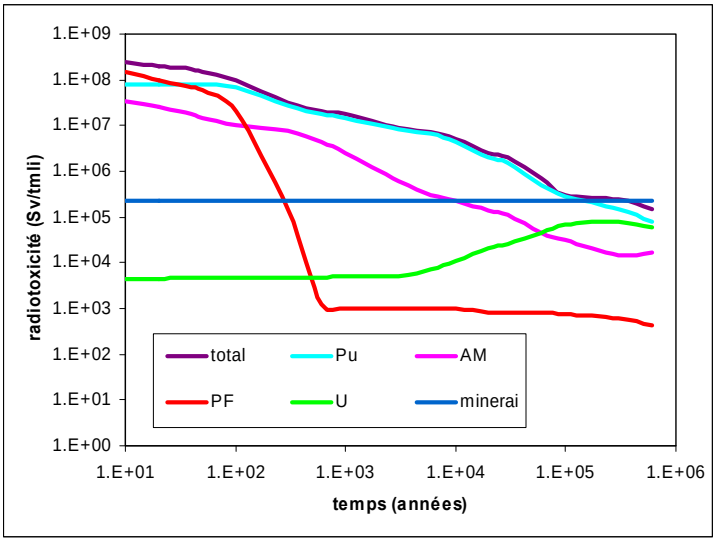


FIGURE 1.5: Allure générale de l'évolution temporelle de la radiotoxicité des différents composants majeurs du combustible irradié. Unité des ordonnées : Sv par tonne de métal lourd initial, figure extraite de [2].

Aujourd'hui, même si la France s'est dotée d'un système de gestion performant des déchets nucléaires, l'utilisation sur le long terme de cette source d'énergie pose le problème des quantités de déchets à stocker, de la stabilité de leur conditionnement (sur des dizaines de milliers d'années pour certains noyaux) et de la sûreté des installations. C'est pourquoi, des recherches continues sont menées pour minimiser les quantités produites, pour concentrer la radioactivité et pour garantir le confinement dans des conditions sûres. Les déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue font, de plus, l'objet de programmes de recherches dont les grandes orientations ont été fixées par les lois des 31 décembre 1991 et 28 juin 2006.

La suite de ce chapitre expose comment l'IN2P3 a pu mettre ses compétences fondamentales au service d'une question de société en s'impliquant dans les recherches sur les déchets nucléaires après la première loi de 1991.

1.2 La naissance d'une thématique - contexte des années 1990

1.2.1 La loi Bataille de 1991 et l'IN2P3

Historiquement le CNRS et les Universités françaises n'étaient pas impliqués dans les recherches sur l'énergie nucléaire ni dans l'enseignement de la technologie des réacteurs nucléaires [3]. Le CEA avait le monopole de la partie recherche, l'INSTN créé en 1956, avait la charge exclusive de l'enseignement tandis que les universités et le CNRS se concentraient sur les aspects fondamentaux de la physique nucléaire et de la physique des particules. Dans les années 60-70, le développement de services de recherches fondamentales au CEA, directement associées aux thématiques appliquées, va contribuer à renforcer la distance entre le CNRS et les Universités et l'énergie nucléaire. Cette distance pouvait également s'accompagner d'une certaine méfiance de la communauté académique vis à vis de l'énergie nucléaire et de la construction de centrales nucléaires. On peut pourtant noter que des thèmes de recherches comme la radiochimie, la physique des matériaux ou les sciences physiques pour l'ingénieur développés au CNRS étaient très proches des problématiques de l'énergie nucléaire.

Le début des années 80 voit l'ouverture de débats entre l'industrie nucléaire et la puissance publique pour traiter la question des déchets nucléaires et des discussions sont

menées autour de leur possible stockage géologique qui apparaît alors, pour les acteurs industriels, comme la seule solution envisageable. Des études sont lancées pour rechercher des sites dans différents types de formations géologiques sur le territoire national. Mais rapidement, l'hostilité des populations et des blocages politiques entravent ces études, ce qui conduit le gouvernement de l'époque à lancer un moratoire en 1989 sur la procédure de recherche de site. Cela a abouti à la loi n^o 91-1381 du 30 décembre 1991 [4] qui visait à proposer un cadre législatif pour reprendre un programme de recherche, l'objectif initial étant de pouvoir donner au parlement l'ensemble des données scientifiques permettant de prendre une décision pour l'implantation d'un centre de stockage géologique de déchets radioactifs. Un premier rendez-vous était donné 15 ans plus tard pour effectuer un bilan des recherches et une éventuelle prise de décision quant à une gestion des déchets la plus appropriée. Cette loi, aussi appelée "la loi Bataille" du nom du député-rapporteur à l'assemblée nationale, comporte 15 articles. Parmi ces articles, on peut mentionner le 1er article qui énonce un principe de droit : "La gestion des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue doit être assurée dans le respect de la protection de la nature, de l'environnement et de la santé, en prenant en considération les droits des générations futures.". Les articles 2 et 3 précisent les contours réglementaires pour tout stockage souterrain en couches géologiques profondes et inscrivent notamment la notion de réversibilité. Le stockage de déchets étrangers est aussi exclu. Les articles 5 à 12 énoncent "les conditions dans lesquelles sont mis en place et exploités les laboratoires souterrains destinés à étudier les formations géologiques profondes". L'article 13 décrit la création de l'ANDRA (Agence Nationale pour la gestion des Déchets RAdioactifs) comme un établissement public industriel et commercial (EPIC), placé sous la tutelle des ministres de l'industrie, de la recherche et de l'environnement et qui est donc soustrait de la tutelle du CEA. L'article 14 précise la composition et le fonctionnement du comité local d'information et de suivi qui doit être mis en place dans chaque laboratoire souterrain. Et enfin, l'article 4 concerne l'organisation et le suivi des avancées de la recherche sur la gestion des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue. Il décrit notamment trois axes de recherches :

- AXE 1 (coordination CEA) : la recherche de solutions permettant la séparation et la transmutation des éléments radioactifs à vie longue présents dans ces déchets ;
- AXE 2 (coordination ANDRA) : l'étude des possibilités de stockage réversible ou irréversible dans les formations géologiques profondes, notamment grâce à la réalisation de laboratoires souterrains ;

– AXE 3 (coordination CEA) : l'étude de procédés de conditionnement et d'entreposage de longue durée en surface de ces déchets.

C'est cet article particulièrement qui permettra au monde académique de s'investir dans la recherche autour de l'énergie nucléaire. Ainsi trouve t'on dans le rapport d'activité de l'IN2P3 de 1992-1993 [5] une première mention de ces activités dans les chapitres consacrés aux programmes interdisciplinaires et aux partenaires de l'IN2P3. Il y est mis en avant d'une part, le rôle essentiel que peut jouer l'institut en tant qu'acteur indépendant de la filière industrielle et d'autre part, les compétences qui peuvent lui permettre de s'investir dans les problèmes liés à l'énergie nucléaire qui est considérée, à ce moment, comme une "source d'énergie nécessaire à l'indépendance énergétique nationale, à faible impact climatique mais dont la gestion du cycle du combustible pose des problèmes spécifiques". Ainsi à la mi-1992, la direction de l'institut fait écho à la loi de 1991 et propose une réflexion en mettant en place une mission "d'exploration concernant la faisabilité d'un programme de recherches sur les déchets" [3]. Dès octobre 1992, un premier retour de ce travail est présenté aux journées de l'IN2P3 à Giens et il en ressort "un écho plutôt favorable à la mise en œuvre de certaines compétences de l'institut dans un domaine traditionnellement réservé au Commissariat à l'Energie Atomique" [3]. Finalement en 1993, six axes d'études dans lesquels l'IN2P3 pouvait apporter ses compétences, furent dégagés dans un rapport intitulé "Un programme de recherches sur les déchets nucléaires à l'IN2P3 ?". Certains de ces sujets étaient déjà abordés par les équipes de radiochimie de Strasbourg et d'Orsay. Elles pouvaient donc prendre en charge légitimement les études sur les aspects physico-chimiques des stockages de déchets nucléaires ou le contrôle des déchets destinés au stockage en surface ou encore la séparation de certains actinides et produits de fission. Les quatre autres sujets, la détection de la radioactivité dans l'environnement, la séparation de certains actinides et des produits de fission, la transmutation de corps à vie longue par accélérateur ou les études générales de stratégies impliquant les déchets nucléaires, pouvaient faire appel à des techniques bien maitrisées (comme la séparation de masse par accélérateur) ou à des instruments très performants utilisés en physique nucléaire expérimentale. Le vrai atout de l'institut résidait également dans sa maitrise des techniques d'accélération de particules qui trouvait une application directe dans le sujet d'étude de la transmutation par accélérateur. Le conseil scientifique de l'IN2P3 ayant validé ces propositions de thématiques de recherches en mai 1993, la direction de l'institut a alors utilisé un de ses outils fédérateurs que sont les programmes

interdisciplinaires, pour créer le programme PRACEN (Programme de Recherche sur l'Aval du Cycle Electronucléaire). Les recherches s'y articulaient autour de 3 thèmes :

- thème 1 : études radiochimiques liées aux conditions physico-chimiques des stockages en surface et en profondeur des déchets, ainsi qu'à la séparation de certains radioéléments à vie longue.
- thème 2 : mesures de radioactivité dans les déchets et dans l'environnement.
- thème 3 : acquisition de données nucléaires et développement des accélérateurs, en relation avec la transmutation nucléaire.

On voit alors apparaître des activités relatives aux données nucléaires dans le troisième thème. Même si l'IN2P3 n'avait pas développé, au préalable, de recherche sur la transmutation, il était tout à fait à même de s'y investir de façon pertinente, notamment dans un premier temps, en étudiant la production de neutrons via l'interaction de protons de haute énergie avec des cibles lourdes. Un autre axe se dessine pour l'étude d'une maquette d'assemblages sous-critiques alimentés par un faisceau de particules de basse intensité. Cette maquette permettrait des premières investigations sur les systèmes d'amplificateur d'énergie, proposés par Carlo Rubia, et dédiés à la production d'énergie [6].

Durant les années suivantes, la communauté des physiciens va continuer à se mobiliser et les activités à se développer. Ainsi, en 1998, on peut lire dans l'avant propos du rapport d'activités de l'IN2P3 (pour la période 1994-1997) [7] rédigé par Claude Detraz (alors Directeur de l'institut) : "Le lecteur sera ainsi frappé par la place croissante que prennent les recherches liées à ce que l'on convient d'appeler la demande sociale. C'est vrai les progrès sont frappants. (...) Le changement le plus profond dans ce domaine vient de l'investissement réussi dans les recherches concernant l'électronucléaire.". De plus, un chapitre complet du rapport est consacré à la description de ces activités sous l'intitulé "L'IN2P3 et l'aval du cycle électronucléaire", dans la section partenariat. Et c'est effectivement véritablement en 1997, sous l'impulsion d'instances extérieures (Ministère de l'Education nationale, CNE - Commission Nationale d'Evaluation, Cosrac - Comité de suivi des recherches sur l'aval du cycle, OPECST - Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et techniques et EDF) que ces recherches vont s'ancrer au CNRS et en particulier à l'IN2P3 avec la création d'un nouveau programme interdisciplinaire PACE (Programme sur l'Aval du Cycle Electronucléaire) qui devait, pour la direction du CNRS, traverser les frontières des structures et des disciplines. Ce programme devait ainsi permettre une vraie programmation de la recherche et un rapprochement entre le CNRS et le CEA. PACE a donc remplacé PRACEN qui n'était qu'une entité de l'IN2P3, et

différents Groupements de Recherches (GdR) ont été créés. Fin 1997, PACE regroupait quatre GdR, GEDEON (GEstion des DEchets par des Options Nouvelles), PRACTIS (Physico-chimie des actinides et autres radioéléments en solutions et aux interfaces), FORPRO (Formations profondes) et NOMAD (Nouveaux matériaux pour les déchets). Le GdR qui nous concerne ici est bien évidemment GEDEON qui associait à l'origine le CNRS, le CEA et EDF et qui axait ses recherches sur les options innovantes que constituaient les systèmes hybrides et le cycle de combustible au thorium. On peut noter que FRAMATOME, intéressé par les challenges techniques que représentaient les ADS (Accelerator Driven Systems), a participé au GdR de 1998 à 2002. Le CEA était l'expert pour les questions de physique des réacteurs et de fabrication de combustible. Le CNRS quant à lui apportait ses compétences en terme d'accélérateur de particules de haute intensité (pour les ADS) et de physique nucléaire fondamentale que ce soit pour la production de nouvelles données nucléaires, pour le cycle du thorium ou la transmutation ou pour la physique de la spallation "au cœur" des systèmes hybrides. Outre l'aspect structuration des activités que permet la création des GdR, le programme PACE se voyait également doté d'un budget composé des participations des différents partenaires. Des appels à propositions de recherches étaient lancées chaque année. Les demandes étaient évaluées par les conseils scientifiques des GdR et, au vu de ses recommandations, les conseils de groupement arbitraient les thèmes prioritaires et attribuaient les crédits aux équipes. Chaque année, des ateliers bilans étaient organisés. Les équipes y présentaient leurs travaux, l'état d'avancement des recherches et justifiaient l'utilisation des crédits alloués. Enfin, les GdR organisaient aussi l'animation scientifique en proposant des ateliers thématiques permettant de rassembler les différents acteurs des recherches.

Cette organisation des recherches, cette volonté de rassembler les organismes autour de thèmes de recherches communs et innovants ainsi que la mise à disposition de crédits spécifiques ont efficacement permis de créer une nouvelle thématique que l'on pourrait nommer dans un premier temps "Energie à l'IN2P3", ainsi qu'une "identité communautaire" à des physiciens nucléaires qui se lançaient dans des recherches fondamentales liées directement à l'application de l'énergie nucléaire. La quinzième école Joliot Curie [8] intitulée "Production d'énergie nucléaire et traitement des déchets : des filières d'aujourd'hui aux solutions innovantes" a été organisée en 1996. Et finalement, dans le rapport

d'activité de l'IN2P3 pour la période 1998-2000, les recherches sur "l'aval du cycle électronucléaire" sont présentées dans la partie "avancées scientifiques et technologiques" au même titre que les recherches dite "cœur de métier" comme la physique nucléaire ou la physique des particules.

1.2.2 Le concept d'ADS et la filière thorium

Des physiciens nucléaires de l'IN2P3 se sont donc mobilisés autour des recherches de l'axe 1 de la loi Bataille qui concerne les études de la séparation et la transmutation. A l'origine, le groupement de recherche GEDEON a articulé ses activités de recherches autour des déchets nucléaires et des ADS. Mais rapidement, l'intérêt d'étudier des systèmes créant moins de déchets a émergé et les recherches se sont donc élargies, dès 2003, aux systèmes du futur basés sur les travaux du forum Génération IV [9] et notamment ceux utilisant le cycle du thorium et les réacteurs à sels fondus [3, 10]. GEDEON est alors devenu GEDEPEON (GEstion des DEchets et Production d'Energie par des Options Nouvelles) [11]. Les thèmes de recherches étaient structurés comme suit : La physique de la spallation, les données nucléaires, l'étude de la neutronique sous critique, les accélérateurs, les matériaux, le cycle du thorium et les études systèmes et scénarios. En effet, le concept d'ADS, même s'il n'était pas nouveau, nécessitait un important travail exploratoire pour étudier sa faisabilité technologique, sa capacité à transmuter et son intégration dans un schéma viable pour l'industrie électronucléaire. Les premières mentions de ce type de système datent des années 30-40, où les neutrons, issus des réactions de spallation de protons sur une cible d'uranium, étaient utilisés pour la création de transuraniens via la transmutation de noyaux lourds. Dans les années 50, les canadiens utilisent ce principe pour produire de l'uranium 233 à partir du thorium 232 afin d'augmenter la matière fissile des réacteurs CANDU. C'est véritablement dans les années 80-90 que les ADS ont été étudiés à nouveau au sein de différents projets que ce soit pour la production d'énergie et l'incinération d'actinides et de produits de fission (concept de C. Bowman - 1992 [12]), la réduction de la production d'actinides mineurs (en utilisant un combustible au thorium) ou la transmutation des produits de fission à vie longue (concept de C. Rubia - 1994 [6]) [2, 13].

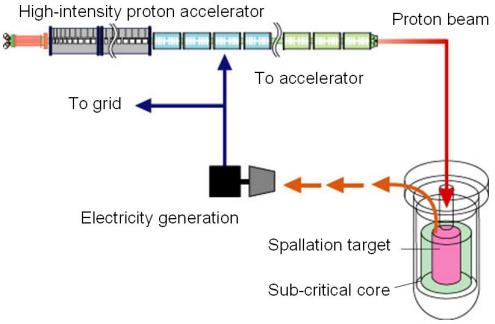


FIGURE 1.6: Schéma de principe du système hybride
(source https ://nsec.jaea.go.jp/ ndre/ndre3/trans/objective-e.html).

Un système hybride (cf. Figure 1.6) est composé d'un cœur de réacteur sous-critique, où la réaction en chaîne ne peut être entretenue seulement avec les neutrons issus des fissions des noyaux du combustible, comme c'est le cas avec les réacteurs "conventionnels" dits "critiques".

Le facteur de multiplication d'un ADS est inférieur à l'unité et l'entretien de la réaction en chaîne repose alors sur l'apport externe de neutrons via des réactions de spallation par exemple. En effet la réaction de spallation générée par l'interaction de protons de haute énergie (1-2 GeV) sur une cible constituée d'un élément lourd, comme le plomb, donne naissance à une trentaine de neutrons par proton incident. Le système hybride est donc constitué de 3 éléments : l'accélérateur de protons, la cible de spallation et le cœur du réacteur sous critique. Deux avantages évidents se dégagent d'un tel système. Le premier concerne la sûreté puisque la réaction en chaîne est entretenue par l'apport externe de neutrons via l'accélérateur. Le second est la disponibilité de neutrons supplémentaires pour autre chose que l'entretien de la réaction en chaîne et qui peuvent donc être utilisés pour l'incinération ou la transmutation de noyaux.

Malgré l'absence d'isotope fissile du thorium (cf. Figure 1.7), qui explique qu'il n'ait pas été exploité de façon industrielle jusqu'à maintenant, le cycle du thorium présente aussi des avantages intéressants notamment en matière de surgénération.

La surgénération est la capacité d'un réacteur nucléaire à produire plus d'isotopes fissiles qu'il n'en consomme, en transmutant des isotopes fertiles en isotopes fissiles. A la fin des années 70, il a été montré expérimentalement que le cycle du thorium (^{232}Th/^{233}U) pouvait être surgénérateur en spectre de neutrons thermiques. De plus, l'utilisation de ce combustible permettrait de réduire de 10 à 100 fois la radiotoxicité des déchets par

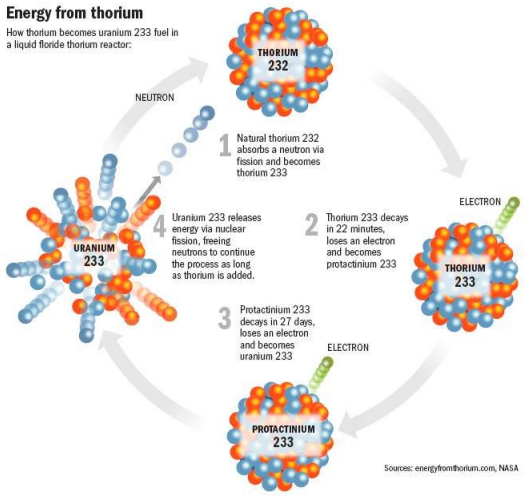


FIGURE 1.7: Cycle du thorium.

rapport au cycle à l'uranium en réacteur rapide. Deux autres avantages sont la minimisation de la masse de matière fissile dans le cœur du réacteur et la souplesse de ce cycle qui s'adapte plus facilement à différentes options sur la stratégie nucléaire (incinération du plutonium, démarrage des Réacteurs à Neutrons Rapides, arrêt du nucléaire, ...). Les réacteurs au thorium ont déjà été étudiés de façon poussée par le passé aux Etats-Unis dès les années 50. C'est notamment le concept de réacteur à sels fondus (RSF) qui fait l'objet d'études pour sa capacité à retraiter le combustible en ligne pour en extraire les poisons neutroniques comme le ^{231}Pa. Dans ce réacteur, le combustible est sous forme de sels fondus et sert également de caloporteur. Un projet industriel, le MSBR (Molten Salt Breeder Reactor) voit même le jour en 1969 à l'ORNL et aboutit à un ensemble d'études très cohérent sur les différents aspects de ce type de réacteurs (thermohydraulique, retraitement en ligne, ...). Mais la concurrence des réacteurs à neutrons rapides, de conception plus classique, basés sur le cyle U/Pu et refroidis au sodium, met finalement un terme à ces recherches aux Etats-Unis à la fin des années 70. En France, les études continuent jusqu'en 1983 au CEA et à EDF. Au Japon, dans les années 80, d'autres concepts de RSF sont également étudiés par exemple pour la transmutation des actinides ou l'incinération des transuraniens. Aux Etats-Unis, dans les années 90, C. Bowman adapte le concept du MSBR pour l'incinération et la dénaturation du Pu issu des centrales à eau légère. Enfin, en France, les études sur le cycle du thorium sont relancées également dans les années 90 à travers 3 programmes. Le concept TASSE (Thorium based Accelerator driven System with Simplified fuel cycle for Energy generation) est étudié au CEA, EDF développe AMSTER (Actinide Molten Salt TransmutER) et le CNRS s'investit dans les

études autour du TMSR (Thorium Molten Salt Reactor).

1.2.3 Les programmes de données nucléaires associés

L'étude et le développement de ces nouveaux concepts de réacteurs (ADS), des cycles de combustibles sur lesquels ils reposent (U/Pu, Th/U) et des stratégies à développer pour la gestion des déchets nucléaires (transmutation) nécessitent un effort important de recherche qui se base, entre autres, sur la simulation numérique (code de transport). Au cœur de ces simulations, pour les énergies inférieures à 200 MeV, figurent les bases de données nucléaires qui compilent toutes les données de physique nucléaire fondamentale qui permettent, elles mêmes, la description précise des processus nucléaires mis en jeu. Au delà de 200 MeV, les modèles de spallation sont directement implémentés dans les codes de transport. Il a été rapidement montré que des études supplémentaires sur la spallation étaient nécessaires pour obtenir une compréhension détaillée du phénomène et par la suite, des modèles fiables. Les bases de données, quant à elles, étaient également de qualité insuffisante pour l'étude précise de la transmutation des actinides mineures ou pour l'étude du cycle de combustible au thorium pour lequel très peu de données expérimentales existaient. Les physiciens de l'IN2P3, dans le cadre du GDR GEDEON, se sont donc investis dans des campagnes de mesures sur la physique de spallation (IPN Orsay), sur la production de particules chargées lors de réactions induites par nucléon aux énergies intermédiaires (20-200 MeV) (SUBATECH Nantes et LPC Caen), sur l'étude de la fission et de la capture des noyaux du cycle du thorium (CEN Bordeaux-Gradignan) et sur l'étude des sections efficaces de capture auprès d'un spectromètre à ralentissement (ISN Grenoble, aujourd'hui LPSC). Il faut noter que bon nombre de ces programmes expérimentaux se déroulaient en collaboration avec des équipes du CEA.

Les programmes de mesures dédiés à la physique de la spallation ont démarré auprès de l'installation synchrotron SATURNE (CEA Saclay) de 1994 à 1997 jusqu'à la fermeture de l'installation. Les multiplicités de neutrons, leur énergie et leur dépendance angulaire étaient mesurées lors de réactions mettant en jeu des protons de 800 à 1600 MeV interagissant sur des cibles (fines et épaisses) de Plomb, tungstène, Fer, Aluminium, etc [14]. Ces données étaient utilisées pour améliorer les modèles de cascade intra-nucléaire et pour valider le transport des particules des codes comme LAHET ou MCNP [15]. Des campagnes de mesures de multiplicité de neutrons ont été aussi réalisées auprès

des installations GANIL, COSY et CERN pour des systèmes variés de particules légères chargées sur des cibles épaisses à des énergies allant de 200 à 2000 MeV. Un autre pan important de ces mesures dédiées à la spallation, était la mesure de ses produits. La technique de la cinématique inverse était alors appliquée à des faisceaux de Plomb ou de Fer, pour des énergies de 1 GeV/A, interagissant avec une cible d'hydrogène liquide au GSI [16]. Les produits de spallation étaient directement détectés par le système de détection FRS (Fragment Separator). Ces données pouvaient servir à tester et contraindre les codes de spallation ou directement fournir des informations sur les matériaux utilisés dans les cibles de spallation (impuretés dans le plomb ou les alliages de Fer) ou encore quantifier les déchets et la chaleur générée dans ces cibles. Enfin, un autre programme d'envergure a été lancé en 1999 pour concevoir, construire et opérer une cible de spallation en plomb-bismuth liquide pour une puissance faisceau de 1 MW sur le site de SINQ (Spallation Neutron source) au Paul Scherrer Institut (PSI) en Suisse. Ce programme visait la validation des calculs théoriques qui prédisaient qu'une cible de métal liquide pouvait produire un flux plus intense de neutrons par rapport à une cible métallique. L'expérience MEGAPIE (Megawatt Pilot Experiment) a donc été menée pour obtenir cette démonstration, avec un fonctionnement sur plusieurs mois à partir d'une quantité de 920 kg de plomb bismuth liquide [17–19].

A plus basse énergie, les efforts se sont également portés sur les données de production de particules légères aux énergies intermédiaires (neutrons et particules chargées). En effet, au dessous de 20 MeV les bases de données nucléaires compilent les sections efficaces d'intérêt qui sont utilisées dans les codes de transport ou de simulation. Au delà de 200 MeV, ces codes utilisent les modèles de cascade intranucléaire mais dans la région intermédiaire, ces derniers ne sont plus valides puisque différents processus entrent alors en jeu, dont le processus dit de "pré-équilibre". Malgré le développement dans les années 60-70 de différents modèles de pré-équilibre et l'obtention d'un assez bon pouvoir prédictif concernant l'émission de protons aux énergies inférieures à 65 MeV, la description des particules composites restait difficile [20]. Un important programme de mesures systématiques en neutrons et protons incidents a donc été lancé auprès de diverses installations (cyclotron CYCLONE de Louvain-la-Neuve [21, 22], Belgique, faisceau de neutrons du TSL [20], Uppsala, Suède et cyclotron AGOR à Groningen, Pays Bas). Les cibles étudiées étaient le Plomb, le Fer et l'Uranium et de larges jeux de données de sections efficaces

doublement différentielles, différentielles et totales ont pu être mesurées et utilisées ensuite pour contraindre les modèles.

Pour ce qui est des données de transmutation et celles liées aux cycles de combustible et qui concernent donc les réactions de capture et de fission, elles ont été menées dans un premier temps auprès du Van de Graaff du CENBG [23] dans une gamme d'énergie neutron allant de 30 keV à 3 MeV. On voit également apparaître à cette époque la volonté d'utiliser des méthodes indirectes pour avoir accès à des sections efficaces pour des isotopes dont l'activité/la durée de vie ne permet pas la fabrication des cibles. Pour les énergies inférieures à 30 keV, la technique du spectromètre à ralentissement (ISN Grenoble [24] et CERN [25]) est utilisée pour mesurer des sections efficaces semi-différentielles de capture de produits de fission à vie longue. Ces spectromètres sont également utilisés pour mesurer les sections efficaces de diffusion des modérateurs.

Les équipes de l'IN2P3 se sont donc investies fortement dans cette thématique des données nucléaires pour les réacteurs et ont défendu des projets expérimentaux variés auprès d'installations qui privilégiaient souvent les expériences à caractère plus fondamental. Elles ont su mettre à profit leurs compétences pour fournir des nouveaux jeux de données nucléaires compilés dans la base de données EXFOR [26] et utilisables par les évaluateurs pour fournir de nouvelles évaluations et/ou par les théoriciens pour contraindre les modèles des codes de réactions nucléaires.

1.3 Les années 2000, ancrage des recherches

1.3.1 Les programmes de recherches à l'IN2P3

Après un démarrage prometteur et une implication enthousiaste des chercheurs de l'IN2P3 dans la thématique des données nucléaires pour les réacteurs, les années 2000 voient l'ancrage de ces recherches dans l'institut. Grâce à la mise en place d'installations nucléaires dédiées comme le faisceau de neutron n-TOF du CERN où la récurrence des programmes européens soutenant l'activité des données nucléaires pour les réacteurs (cf. paragraphes suivants), les équipes ont développé des programmes expérimentaux sur le moyen et long terme, chacune se spécialisant dans un domaine particulier [27]. l'IPN d'Orsay a focalisé

ses recherches dans le contexte des études des cycles de combustibles et de la transmutation des actinides mineurs, sur les mesures de sections efficaces de fission auprès du faisceau n-TOF du CERN. L'équipe a notamment développé des détecteurs PPAC permettant la détermination des sections efficaces mais également des distributions angulaires de fission. Les noyaux suivants ont été étudiés : ^{nat}Pb, ^{209}Bi, ^{232}Th, ^{233,234,235,238}U, ^{237}Np. On peut noter également l'implication de cette équipe dans la collaboration SOFIA (Study Of FIssion with Aladin) qui travaille au GSI afin de mesurer les rendements de fission en masse et en charge des deux fragments à faible énergie d'excitation. Le CENBG, de son coté, a poursuivi le développement de la méthode dite "surrogate" ou par réaction de transfert, afin d'avoir accès aux sections efficaces de fission pour des noyaux dont il est très difficile voire impossible d'obtenir un échantillon. Des mesures ont été réalisées auprès du tandem d'Orsay avec une cible d'^{243}Am et ont permis l'extraction des sections efficaces de fission de ^{242,243,244}Cm, de ^{241,243}Am et de ^{231,233}Pa. L'équipe a ensuite étendu la méthode aux réactions de capture mais s'est heurtée au problème de la détermination des probabilités de décroissance gamma et neutron par le modèle statistique dont la méthode "surrogate" dépend pour extraire les sections efficaces neutroniques. Des développements, tant expérimentaux que théoriques, sont encore en cours pour affiner la compréhension des désaccords entre données neutroniques de capture et données par réaction de transfert. Parallèlement aux activités "surrogate", l'équipe s'est aussi attelée, en collaboration avec le LPSC Grenoble, à la mesure complexe de la capture sur des noyaux fissiles et notamment sur l'^{233}U. L'équipe du LPSC a poursuivi ces mesures sur la plateforme PEREN pour déterminer les sections efficaces de diffusion élastique des neutrons, pour des énergies inférieures à 0.5 MeV, pour ^{12}C , ^{19}F et ^{7}Li dans le cadre des études sur les RSF. Une fois ces campagnes terminées, une activité s'est développée auprès du réacteur de l'ILL sur les mesures de rendements de fission en utilisant le spectromètre Lohengrin. Ces données sont cruciales pour estimer les inventaires et la radiotoxicité du combustible usé mais également la puissance résiduelle après l'arrêt du réacteur. Des données concernant les rendements en masse et isotopiques mais aussi les rapports isomériques sont obtenues. Une équipe du GANIL s'intéresse également au rendement de fission en couplant les méthodes des réactions de transfert et de la cinématique inverse auprès du spectromètre VAMOS. Cette technique permet d'obtenir, pour plusieurs systèmes fissionnant dans une large gamme d'énergie d'excitation, des informations sur les rendements des fragments de fission isotopiques, sur les multiplicités de neutrons ou sur l'excès de neutrons et permet également l'apport d'information pour

la compréhension du mécanisme de transfert et de scission par exemple. L'activité de mesures des émissions de particules légères aux énergies intermédiaires s'est poursuivie jusqu'à la publication des derniers résultats vers 2005. Le LPC Caen a ensuite pris en charge le développement d'un détecteur dédié (SCALP) à la mesure de la section efficace ^{16}O(n,α). Une nouvelle équipe de SUBATECH, à Nantes, s'est engagée dans des mesures concernant la désintégration β des produits de fission et l'émission de neutrinos en rapport avec les aspects de non-prolifération. La réalisation de nouvelles mesures, principalement à Jyväskÿla en Finlande, en utilisant un détecteur TAS (Total Absorption Spectroscopy) permet de corriger de l'effet Pandemonium dont souffrent les données de décroissance réalisées historiquement avec des détecteurs Germanium [28]. Enfin l'IPHC a démarré une activité au tout début des années 2000 qui visait, dans un premier temps, à démontrer la validité de la méthode de la spectroscopie gamma prompte pour mesurer les sections efficaces de réaction (n,xn). Après avoir réalisé des tests infructueux auprès du faisceaux n-TOF au CERN et réussi la mesure de la section efficace ^{232}Th(n,5n) auprès du cyclotron CYCLONE de Louvain-la-Neuve, Belgique, l'équipe a installé et développé, depuis 2002, le dispositif GRAPhEME (GeRmanium array for Actinides PrEcise MEasurements) auprès du faisceau de neutrons GELINA du EC/JRC-Geel en Belgique. Des campagnes de mesures ont été effectuées sur divers actinides ^{235,238}U, ^{232}Th et sur les isotopes de tungstène 182, 183, 184, 186 ainsi que sur une cible naturelle. Ces sections efficaces (n,n') et (n,2n) sont particulièrement importantes dans le cadre des études sur le cycle de combustible (compétition sur la production des neutrons dans le cœur du réacteur, modération des neutrons, ...) et influencent donc directement ou indirectement les paramètres comme le k_{eff} ou la puissance radiale.

Après cette revue rapide des programmes de recherches menées à l'IN2P3 dans le courant des années 2000, il faut souligner la volonté internationale de soutenir ces activités de mesures de données nucléaires. L'AEN (Agence pour l'Energie Nucléaire) de l'OCDE (Organisation de Coopération et de Développement Economiques) qui héberge le projet européen de base de données évaluées JEFF (Joint Evaluated Fission and Fusion File) a remis à jour en 2003-2004, sa liste de priorités HPRL (High Priority Request List) dont l'objectif est la stimulation et l'orientation des activités de mesure (et d'évaluation) de données nucléaires pour les applications. Cette liste a été très largement utilisée pour définir nos programmes de recherches mais également pour appuyer nos demandes auprès des installations nucléaires afin d'obtenir les temps de faisceaux nécessaires à la réalisation de

nos expériences. Le CERN a aussi contribué grandement au développement des activités de données nucléaires pour les réacteurs suite à la mise en service, en 2001, du faisceau de neutron n-TOF [29]. Ce projet est né sous l'impulsion de C. Rubbia qui, suite à ses travaux sur l'étude des ADS, a pris conscience de l'importance de disposer de données nucléaires fiables et en particulier du manque de données nucléaires pour les applications de la transmutation des actinides et du développement des réacteurs hybrides. n-TOF est un faisceau de neutrons pulsé couplé à deux bases de vol (initialement 200 m et 20 m depuis 2015) dont l'énergie des neutrons s'étend de quelques meV à plusieurs GeV. Des détecteurs spécifiques (PPAC, FIC, Micromégas, TAC-4π-BaF_2) y ont été développés et des mesures de fission, capture et (n,α), (n,p) sont réalisées, que ce soit pour les applications de l'énergie nucléaire, de l'astrophysique nucléaire ou de la physique nucléaire fondamentale. En France, au début des années 2000, une volonté est née au GANIL, via le projet SPIRAL2, de profiter du faisceau de deutons pour générer un important flux de neutrons entre 1 keV et 40 MeV dans le but de réaliser des mesures d'activation/irradiation sur des matériaux avec un haut flux de neutrons et de disposer d'une salle de temps de vol pour des mesures neutroniques. La communauté française et européenne s'est alors mobilisée pour proposer des lettres d'intérêt [30] et le projet NFS (Neutrons for Science) a pu intégrer SPIRAL2 [31]. NFS pourra accueillir des mesures d'activation par protons, deutons ou alphas au sein de sa station d'irradiation. Une base de vol de 30 m permettra la mesure de données neutroniques avec des faisceaux monocinétiques ou blancs sur une gamme en énergie de quelques MeV à 31 et 40 MeV respectivement. La Figure 1.8 présente les différents flux de neutrons accessibles auprès des trois grandes installations européennes (n-TOF@CERN, GELINA@EC-JRC,Geel et NFS@SPIRAL2, GANIL) et de l'installation américiane LANSCE de Los Alamos comparés aux spectres de neutrons thermiques, stellaires et de fission et fusion, et illustre la complémentarité des installations.

Avant de mettre en perspective ces recherches dans le cadre des programmes européens, il faut souligner que les activités françaises sur les données nucléaires pour les réacteurs, menées dans le cadre du GDR GEDEON, bénéficiaient d'un budget total d'environ 660 000 F par an (en 2001 par exemple [32]), soit environ 100 kEuro qui venaient s'ajouter aux soutiens des instituts, et qui, au fil des ans, a permis le développement de nombreux dispositifs expérimentaux encore opérationnels aujourd'hui.

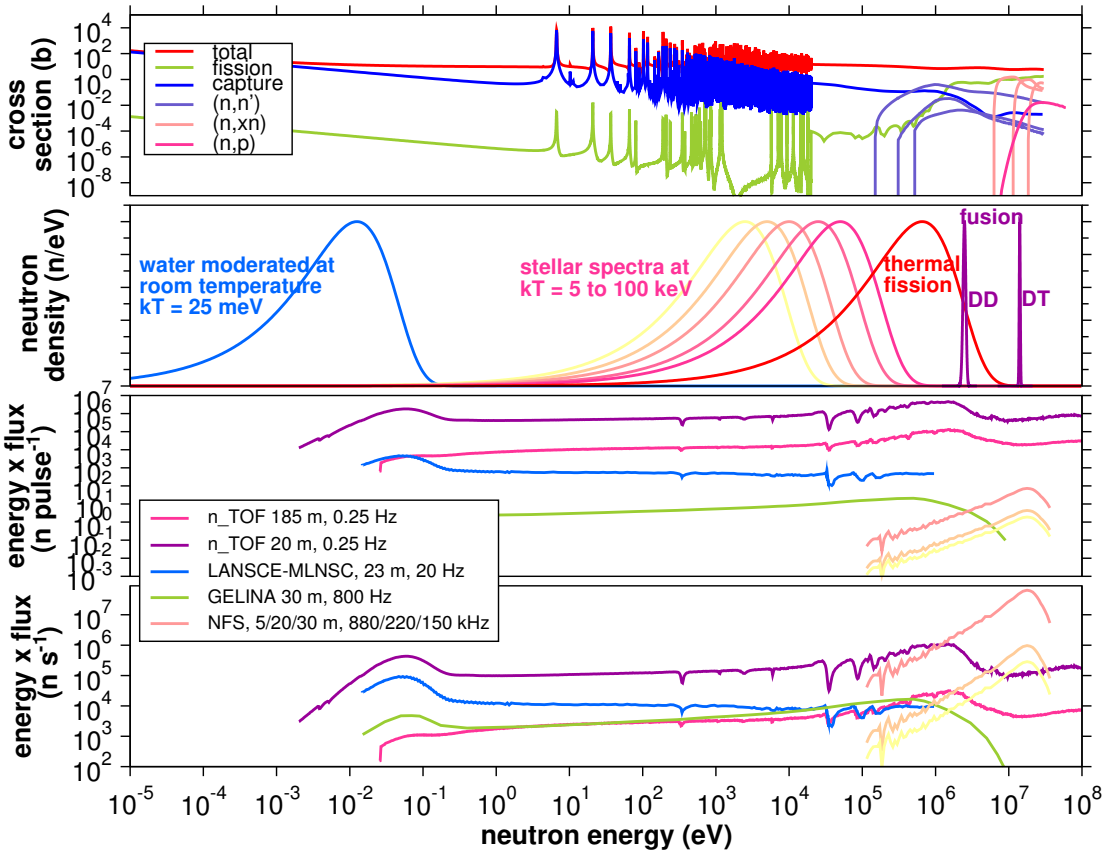


FIGURE 1.8: Comparaison des sections efficaces neuroniques sur l'^{238}U et des spectres de neutrons typiques (haut), aux différents flux instantanés (milieu) et moyen (bas) des principales installations temps de vol mondiales. Figure Frank Gunsing.

1.3.2 Le soutien des programmes européens

Les programmes européens [33], dans le cadre d'EURATOM, ont joué un rôle important dans le financement des activités de données nucléaires à l'IN2P3. Ils ont aussi contribué grandement à la coordination et à l'animation des équipes des différents pays européens impliqués dans ces recherches. Dans les années 90, au sein du 4$^{\text{ème}}$ programme cadre (FP4) et du programme de recherche dédié à la sûreté de l'énergie nucléaire (EAEC-NFS2), cinq lignes d'actions avaient été définies. L'une d'elle concernait l'exploration d'approches innovantes comme la séparation poussée et la transmutation par ADS [34] et a donné naissance au premier programme de recherche européen IABAT (Impact of the Accelerator BAsed Technologies on nuclear fission safety, 1996-1999, coordination Suède) où apparaissent des activités de données nucléaires. Des actions de recherches sont alors définies sur la cible de spallation, la sûreté des ADS, l'impact environnemental, la technologie des accélérateurs, l'étude de la radiotoxicité du cycle de combustible

dans un ADS ainsi que sur les aspects de prolifération. Et finalement, on voit aussi apparaître un thème de recherches lié aux données nucléaires de base pour les ADS avec des aspects tant expérimentaux que d'évaluation. Cela concerne des données d'intérêt liées aux rendements de fission pour ^{232}Th et ^{233}U mais aussi la création de librairies de données pour quelques isotopes importants et pour des réactions induites par neutrons et protons jusqu'à 150 MeV. Dix instituts européens participent à ce projet dont le CEA mais pas le CNRS.

Il faudra attendre le programme cadre suivant (FP5 et les suivants) pour voir apparaître le CNRS dans les partenaires des projets européens dédiés aux recherches sur la transmutation. En effet un réseau thématique sur les options innovantes de séparation et de transmutation ADOPT (ADvanced Options for Partitioning and Transmutation, 2001-2004, coordination Belgique) a été financé par la Commission Européenne. Cinq clusters composaient ce réseau qui regroupait 15 instituts européens dont le CNRS, le CEA et FRAMATOME pour la France. Un des clusters était dédié aux études de base et regroupait les projets (CSC : Cost-Sharing Contracts) MUSE (The muse experiments for subcritical neutronics validation), HINDAS (High and intermediate energy nuclear data for accelerator-driven system) et NTOF-ND-ADS (ADS nuclear data). Les programmes français de données nucléaires décrits dans le paragraphe 1.2.3 de ce chapitre, s'inscrivaient dans ce cadre européen et ont bénéficié de crédits européens pour la réalisation des programmes de recherches. Le projet HINDAS (2000-2003) concernait la production de données nucléaires dans la région en énergie 20-2000 MeV par la combinaison d'expériences dédiées et le développement de modèles nucléaires. Le projet NTOF-ND-ADS (2001-2004) a permis le soutien de l'installation N-TOF au CERN et la mise en place d'importants programmes de mesures de données nucléaires de haute précision pour des réactions et isotopes majeurs de la problématique de la transmutation des déchets nucléaires et des ADS.

Dans le 6$^{\text{ème}}$ programme cadre, le projet intégré EUROTRANS (EUROpean research programme for the TRANSsmutation of high level nuclear waste in an accelerator driven system, 2005-2010, coordination Allemagne) avait pour but de définir le design et l'évaluation de la faisabilité d'un prototype d'ADS industriel dédié à la transmutation. Il regroupait 29 instituts partenaires de 14 pays européens. Ce projet était découpé en domaines autour de la stratégie européenne de l'ETD/XT-ADS (european transmutation demonstrator) et, à plus long terme, de l'EFIT (European Facility for Industrial Transmutation). Un des domaines, NUDATRA (NUclear DAta for TRAnsmutation) était

consacré à l'amélioration des bases de données nucléaires évaluées et des modèles théoriques nécessaires au travail de design. Les activités se trouvaient alors de plus en plus structurées, les expériences de plus en plus liées au développement des modèles et à l'évaluation. Dans NUDATRA [35], quatre workpackages avaient été définis et traitaient des analyses de sensibilité et de la validation des données nucléaires et des outils de simulation, des mesures aux énergies basses et intermédiaires, de l'évaluation des librairies de données nucléaires et des modèles théoriques utilisés aux énergies basses et intermédiaires et enfin de la modélisation et des expériences à haute énergie. Ainsi les principaux résultats attendus concernaient plus précisément :

- des nouvelles mesures et évaluations sur les sections efficaces du Pb-Bi (inélastique, (n,xn) et rapports d'embranchement isomérique (production de Po)),
- des nouvelles mesures et évaluations pour les actinides mineurs et en particulier la capture du ^{243}Am et la fission du ^{244}Cm,
- le développement du code TALYS vers un outil d'évaluation et de production de données nucléaires aux énergies intermédiaires,
- l'amélioration des modèles de haute énergie basée sur les expériences pour les prédictions de la production des produits de spallation et de gas (H, He), et enfin,
- l'étude de sensibilité et l'analyse d'incertitude du combustible envisagé pour l'ETD et les enjeux de covariances associées.

Dans le dernier programme cadre FP7, deux projets sur les données nucléaires ont été soutenus. Tout d'abord, le projet ANDES (Accurate Nuclear Data for nuclear Energy Sustainability, 2010-2013, coordination Espagne) a été construit par 19 partenaires, en suivant les recommandations du comité SNETP (European Technological Platform for a Sustainable Nuclear Energy) qui préconisait, pour la pérennité de l'énergie nucléaire, de combiner les réacteurs actuels LWR (Ligth Water Reactor), les futurs réacteurs rapides et la minimisation des déchets produits grâce à des cycles fermés utilisant la séparation et la transmutation. La variété des systèmes nucléaires utilisés nécessitait alors d'améliorer encore la précision, la validation des données nucléaires concernées et par conséquent d'améliorer les installations expérimentales et de démonstration nécessaires à leur validation. Ce projet intègre donc, non seulement de nouvelles mesures microscopiques mais également l'étude de benchmarks dédiés, basés sur des expériences intégrales. L'évaluation et le développement de modèles théoriques prédictifs pour les actinides majeurs présents dans les combustibles des réacteurs du futur font toujours partie du projet. Comme pour le précédent projet NUDATRA, les aspects de réduction d'incertitudes et

leurs corrélations dans les évaluations sont aussi mis en avant dans ANDES. Les nouvelles mesures de données nucléaires étaient concentrées dans le workpackage MARS (Measurements for advanced reactors systems) [36] et ambitionnaient de fournir des jeux précis de données de sections efficaces sur la diffusion inélastique du neutron (isotopes ^{23}Na, Mo, Zr et ^{238}U), la capture neutronique des noyaux ^{238}U, ^{241}Am, et la fission induite par neutron sur ^{240,242}Pu, et ^{241,243,245}Am. Des techniques innovantes de mesures telle que la méthode "surrogate" faisait aussi partie du projet et dans ce cas, était dédiée à la mesure de la capture sur des isotopes de Cm. Les rendements de fission pour les isotopes Pu, Am, Cm et Cf étaient également étudiés via la méthode de la cinématique inverse et la décroissance de quatre produits de fission (^{88}Br, ^{94}Rb, ^{95}Rb, ^{137}I) a fait l'objet de mesure par la spectroscopie gamma par absorption totale. Finalement, fort de ses succès dans les précédents programmes, la communauté données nucléaires européenne s'est mobilisée à nouveau pour soumettre le programme CHANDA (solving CHAllenges in Nuclear DAta, 2013-2018, coordination Espagne) et tenter de résoudre les défis de la thématique non encore relevés. Les objectifs de CHANDA, dans la lignée de ceux d'ANDES, sont définis comme suit :

- fournir des données nucléaires nécessaires pour la sûreté, le fonctionnement durable et le développement des réacteurs nucléaires existants et futurs ainsi que pour les cycles de combustibles,
- proposer des solutions aux challenges expérimentaux que représentent les mesures sur des cibles très radioactives, à courte durée de vie ou concernant des matériaux rares.
- préparer des outils pour résoudre la problématique de la quantification et la validation de la précision des simulations basées sur les données nucléaires disponibles et les modèles.
- identifier et promouvoir la synergie avec les autres domaines d'applications des données nucléaires.

Le nombre de participants au projet est fortement augmenté par rapport aux précédents. 35 partenaires se sont associés pour construire et participer à CHANDA qui a été structuré en 13 workpackages pour couvrir les champs décrits plus haut. A part les workpackages dédiés aux mesures de données nucléaires - WP8 - (sur lequel je reviendrai plus loin) et ceux sur l'évaluation, on peut mentionner cinq workpackages de "support aux données nucléaires". Le premier (WP3) concerne un élément clé, parfois bloquant, de notre thématique qui est l'approvisionnement en cible. En effet, depuis de nombreuses

années, la communauté des expérimentateurs se plaignait de la difficulté d'approvisionnement en cibles qu'elles soient fortement radioactives, sous des formes non standard ou avec un besoin de caractérisation précise. Ces difficultés commençaient dès la recherche de matière et se poursuivaient ensuite au niveau de la fabrication. L'approvisionnement en cible s'apparentait donc souvent au parcours du combattant et pouvait prendre plusieurs années. L'ambition du WP3 était donc de réaliser, dans un premier temps, un inventaire des fournisseurs de matière et des laboratoires (ainsi que leurs équipements) capables de préparer des cibles. L'idée étant de créer un réseau des cibles entre les différents organismes européens. Dans un deuxième temps, après identification de nouveaux équipements nécessaires au développement de nouvelles cibles, CHANDA devait fournir les ressources pour investir dans ces équipements. Enfin le WP3 devait venir en support aux activités du WP8 pour l'obtention des cibles nécessaires aux expériences. Trois autres workpackages (WP4,5,6) concernaient le support aux expérimentateurs dans leur accès aux installations européennes que ce soit pour la réalisation d'expériences (prise en charge du coût d'une partie des temps faisceau et des frais de voyage et de séjours des chercheurs) ou pour des séjours de visiteurs scientifiques. Un réseau d'une vingtaine d'installations nucléaires européennes (accélérateurs de particules et réacteurs) a permis d'allouer 4000 heures aux activités expérimentales du projet CHANDA. Un PAC (Programme Advisory Committee) a été mis en place pour organiser les 7 appels à propositions qui auront lieu tout au long du projet et classer les expériences proposées à chaque appel. On peut noter également le workpackage 7 spécialement dédié aux deux nouvelles installations délivrant des hauts flux de neutrons, Neutrons For Sciences et N-TOF@CERN-EAR2, pour l'investissement dans les équipements de base (système d'acquisition, moniteur de flux, détecteurs,...) permettant de réaliser des expériences de mesures de données nucléaires. Enfin, le WP8 devait s'attaquer aux défis expérimentaux qui subsistent dans le domaine de la sûreté nucléaire et qui nécessitent d'améliorer les méthodes expérimentales, les dispositifs de mesures et les installations de façon à franchir les fossés qui nous séparent encore des objectifs à atteindre en matière de précision et cela malgré les efforts déjà consentis lors des précédentes décennies. Une partie des activités du WP8 concernent alors la mesure des sections efficaces de fission sur les actinides (à N-TOF@CERN-EAR2), la mesure des distributions angulaires (NFS@SPIRAL2) mais également le développement de nouveaux instruments pour introduire une normalisation à la section efficace de diffusion élastique H(n,p) pour le domaine de la fission rapide.

L'enjeu sur les mesures de sections efficaces de capture sur les actinides concerne la réduction des incertitudes par une meilleure prise en compte du bruit de fond induit par la fission. De plus, la méthode "surrogate" pour la capture continue à être explorée pour s'affranchir des problèmes d'approvisionnement en cible. Les processus de diffusion inélastique du neutron et (n,xn) font aussi partie du WP8. Un des objectifs est d'essayer de résoudre les verrous de la méthode de la spectroscopie gamma prompte (cf. chap 2), via des mesures de structure et le développement d'un système de détection d'électrons de conversion pour pallier la faible efficacité de la méthode pour les transitions dont la désexcitation par émission γ est faible. Les mesures de distributions angulaires et spectre en énergie des neutrons émis auprès d'installations de temps de vol font aussi partie de l'étude. La thématique des données de décroissance des produits de fission est également incluse dans le WP8 via des mesures utilisant des détecteurs neutrons et gamma 4π de haute efficacité. Enfin, les mesures des rendements des produits de fission sont aussi à l'étude auprès de différentes installations et avec des techniques variées permettant une collecte riche de nouvelles données précises et complémentaires. Le CNRS est impliqué à hauteur de 49.5 h.m dans CHANDA, dont 47 travaillent au sein du WP8.

Enfin, au delà des programmes finançant les équipes, il faut mentionner le rôle important des programmes transnationaux permettant la mise en réseau des installations nucléaires et facilitant leur accès aux chercheurs travaillant dans le domaine des données nucléaires pour les réacteurs. En effet, nos types d'expériences pouvaient être jugés, par certains PAC d'installations, comme manquant d'intérêt fondamental ou peu novatrices. Notre communauté a souvent eu des difficultés à défendre les enjeux de nos travaux expérimentaux et nos propositions d'expérience se sont vues parfois déclassées par rapport à d'autres demandes plus "fondamentales et porteuses". Le financement de temps de faisceau par les projets européens a permis un accès plus aisé à ces installations. Dès 2006, le projet EFNUDAT (European Facility for NUclear DATa measurements, FP6-NUWASTE) regroupait des installations européennes. En 2010 le projet ERINDA (European Research Infrastructures for Nuclear Data Application, FP7-Fission) a pris le relais. Et aujourd'hui, ce soutien est inclus dans les WP4,5 et 6 de CHANDA comme vu précédemment. Les installations du JRC-Geel (temps de vol, GELINA et Van de Graaff) ont bénéficié également d'un soutien particulier via les projets NUDAME (FP6) et EUFRAT (FP7). Ces projets se basent sur un PAC interne pour sélectionner les expériences pertinentes et d'un budget propre pour le paiement des heures de faisceau ainsi que des

TABLE 1.1: Budget des programmes européens consacrés aux données nucléaires

	HINDAS (4 ans)	NUDATRA (4 ans)	ANDES (3 ans)	CHANDA (4 ans)
budget total (MEuros)	3,3	-	5,9	9,2
part EC (MEuros)	2,1	1,1	2,9	5,4

frais de mission des expérimentateurs.

Après cette revue des programmes européens en soutien aux activités données nucléaires, on réalise l'importance de ces outils de gestion et de financement (cf. tableau 1.1) pour la thématique. Si dans les années 90, les projets s'articulaient autour d'un démonstrateur potentiel d'ADS, au fil du temps, les intentions se sont ouvertes vers les autres systèmes innovants de production d'énergie nucléaire. On peut noter que même si des divergences existent entre les pays de l'Union Européenne quant à l'avenir national de l'énergie nucléaire pour chaque pays, l'Europe a continué à financer ces études. Et même si on peut reprocher à ces "grosses structures" un manque d'animation, elles sont, sans conteste, un élément clé des progrès réalisés dans la thématique.

1.3.3 La loi de 2006

Je souhaite clore cette partie en revenant à un niveau national, puisqu'en France, dans la période des années 2000, la loi Bataille de 1991 arrivait à son terme en 2006. Depuis la loi de 1991, les recherches sur les 3 axes ont été continuellement évaluées par la CNE qui a produit un rapport en 2006 sur ces quinze années de travaux [37]. La commission relève que, du point de vue de la séparation, de gros progrès ont pu être réalisés et la faisabilité scientifique de la séparation des actinides mineurs américium et curium a été démontré en 2001. La faisabilité technique de la séparation était encore en cours en 2006 et elle reposait sur trois étapes : Purex modifié (séparation du neptunium et du technétium), Diamex-Sanex (séparation des actinides mineurs et des lanthanides), Diamex-2 (séparation de l'américium du curium). Quant aux produits de fission à vie longue, la faisabilité technique de séparation du césium n'a pu être démontrée, la séparation du technicium n'est effective que dans 50% à 90% des cas, ce qui n'est pas concluant mais l'iode peut être séparé à 97%. Pour la transmutation, il est mentionné que cette technologie repose sur les données nucléaires de base et que même si de nombreuses données avec incertitudes réduites ont été acquises sur la période, d'autres programmes

expérimentaux restent nécessaires particulièrement sur les noyaux lourds. Les tests des matériaux matrices des nouveaux combustibles riches en actinides mineurs étaient encore en cours de réalisation dans Phénix en 2006. Cependant, compte tenu de précédentes expériences intégrales de transmutation, la CNE "considère que la faisabilité scientifique de la transmutation dans le spectre de neutrons rapides de Phénix a été établie pour l'américium et le neptunium.". Mais il reste encore à démontrer la faisabilité technique de la transmutation des actinides mineurs et notamment la fabrication de ce type de combustibles. Il apparaît aussi que pour les trois produits de fission à vie longue (iode, césium, technicium), le processus de séparation-transmutation industriel sera quasiment impossible à mettre en place en réacteur. Finalement la CNE met en avant le besoin de replacer les recherches sur la séparation-transmutation dans le cadre global de la stratégie énergétique et des systèmes nucléaires. En effet, les stratégies (pour la séparation) à adopter dépendent de la politique énergétique (poursuite du nucléaire ou non, à quel rythme...) et des systèmes nucléaires envisagés (RNR, ADS, cycle du thorium...). Elle pointe aussi les "redoutables" défis scientifiques et technologiques qu'il reste à relever comme la gestion du curium qui est une question clé et s'interroge sur la "balance des bénéfices techniques attendus à moyen ou long terme (diminution de la radiotoxicité et de la chaleur dégagée par les colis de déchets) et les risques supplémentaires introduits à court terme, du fait des manipulations.". La CNE termine le chapitre consacré à la séparation-transmutation en précisant qu'en 2006, il est encore impossible de prédire le succès ou l'échec de la transmutation à l'échelle industrielle et que même en cas de réussite, des résidus de déchets à vie longue existeront toujours. Pour résumer, la Figure 1.9 synthétise le calendrier prospectif, envisagé en 2006, de la gestion des déchets nucléaires au delà de 40 ans. Finalement, concernant la séparation et la transmutation, les recommandations de la CNE sont de :

- Développer des techniques de séparation en relation avec le devenir des produits séparés.
- Réorienter, focaliser et coordonner la recherche sur la séparation-transmutation en relation avec les exigences des systèmes de "Génération IV".
- Conclure sur le rôle et le devenir des ADS à l'issue du programme EUROTRANS.

Suite à ces travaux encadrés par la loi de 1991, et des conclusions des différentes commission d'évaluation, une nouvelle loi a été voté en 2006 [38] prolongeant celle de 1991 selon les trois axes et en fixant des dates pour la mise en œuvre des solutions résultant des recherches. Par exemple, elle avance l'année 2016 pour l'entrée en service de nouvelles

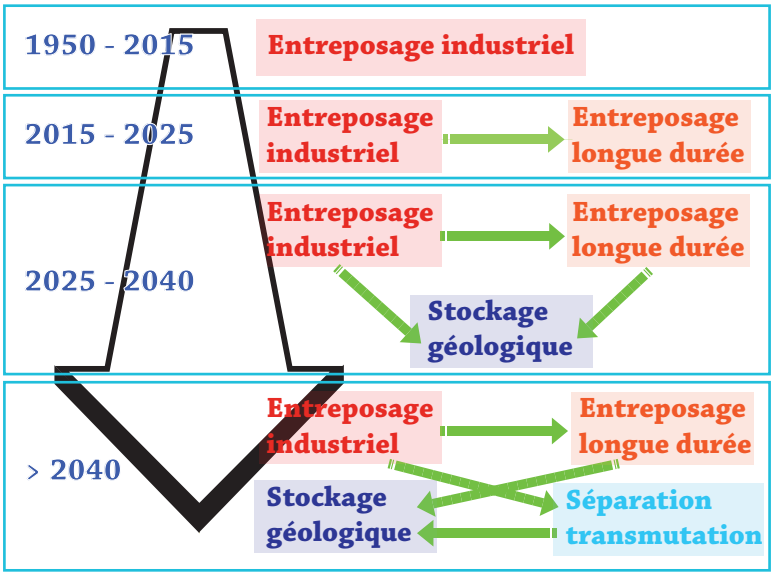


FIGURE 1.9: Calendrier prospectif, envisagé en 2006 par l'OPCST, des différentes options ouvertes dans le cadre des recherches de la loi Bataille de 1991.

installations dédiées à l'entreposage de longue durée, et 2025 pour le stockage géologique profond. Concernant la transmutation industrielle, la loi demande que les études soient menées en relation avec celles sur les nouvelles générations de réacteurs nucléaires y compris les ADS. Une évaluation des perspectives industrielles des différentes filières devra être réalisée en 2012 et un prototype d'installation devra voir le jour avant 2020.

1.4 Les années 2010 - vers la maturité ?

Comme vu dans les parties précédentes de ce chapitre, la communauté de recherches sur les données nucléaires pour les réacteurs a su, au fil des années et grâce au soutien fort de l'IN2P3, se constituer et profiter des différents outils de structuration nationale et européenne pour asseoir ses activités. Depuis 1996, sept postes "chargé de recherche 2nd classe" au CNRS ont été ouverts sur cette thématique. L'entrée dans les années 2010 s'annonçait donc favorable à la poursuite des activités. Pourtant des changements, notamment la disparition du GdR GEDEPEON en 2013, et la tension grandissante sur les postes CR ouverts au concours allaient déstabiliser l'équilibre.

1.4.1 De GEDEPEON à NEEDS

En 2013, le CNRS décide de remplacer les programmes de recherches interdisciplinaires par la mission pour l'interdisciplinarité (MI) [39]. PACEN et ses différents GDR dont GEDEPEON, disparaissent donc cette année là. Le défi NEEDS (Nucléaire, Energie, Environnement, Déchets, Société) est alors créé au sein de la MI, sur le constat que les recherches sur l'énergie nucléaire et l'amélioration de cette technologie ne peuvent se faire sans rapprochement tangible des différentes disciplines impliquées comme les sciences/technologies du nucléaire, les sciences naturelles mais également les sciences humaines et sociales tant les enjeux de société sont importants dans cette thématique. Aujourd'hui, le défi NEEDS [40] fait partie de la cellule Energie du CNRS [41] et vise "à améliorer la visibilité et la cohérence entre recherches entreprises et assurer une meilleure intégration des sciences humaines et sociales". Il permet l'élaboration de programmes scientifiques, en proposant des appels à projets, concernant l'énergie nucléaire et les questions environnementales et de société qui s'y rattachent. Cinq organismes nationaux et deux organismes privés(ANDRA, BRGM, CEA, CNRS, IRSN, EDF et AREVA) se sont associés pour devenir partenaires du défi NEEDS et financer les programmes de recherches. Pour organiser les recherches, le défi est structuré en 7 projets fédérateurs (PF), chacun soutenu par les partenaires concernés.

- **Systèmes nucléaires et scénarios** - CNRS, CEA, AREVA, EDF, IRSN
- **Ressources : mines, procédés, économie** - CNRS, CEA, AREVA
- **Traitement et conditionnement des déchets radioactifs (Déchets)** - CNRS, ANDRA, EDF,CEA, AREVA, IRSN
- **Comportement à différentes échelles des matériaux pour le stockage (MIPOR)** - CNRS, ANDRA, CEA, EDF, IRSN, BRGM
- **Impact des activités nucléaires sur l'environnement (Environnement)** - CNRS, ANDRA, EDF, IRSN
- **Nucléaire, risques et société** - CNRS, ANDRA, EDF, IRSN
- **Matériaux pour l'énergie nucléaire** - CNRS, CEA, EDF, AREVA

Les activités autour des données nucléaires s'inscrivent dans le PF "Systèmes nucléaires et scénarios" qui regroupe, à l'exclusion des activités matériaux, les thématiques présentes dans l'ancien GDR GEDEPEON. Les disciplines mises en jeu dans le PF sont donc la physique nucléaire, la neutronique, la mécanique des fluides, mais également des

disciplines comme la simulation numérique et le calcul scientifique, les techniques de réduction de données, d'analyse statistique et d'estimation d'erreur, le génie énergétique, le génie des procédés,... Entre 2013 et 2017, chaque année, le PF organise un appel à projet où les équipes de recherches en collaboration ou pas, peuvent déposer leur proposition de projet. Ces réponses doivent s'inscrire dans les 3 grands axes soutenus par le PF :

- Approches méthodologiques originales, expériences, acquisition de données de base pour améliorer les modèles et les simulations, évaluations d'incertitudes ;
- Technologies et instrumentations innovantes, cycles innovants, conversion d'énergie ;
- Etudes de systèmes nucléaires et scénarios : analyses comparatives, études d'impact technico-économique, méthode des scénarios.

Les activités de données nucléaires pour les réacteurs émargent évidemment dans l'axe 1 qui montre une volonté d'étendre les activités de mesures de données jusqu'à l'évaluation et met en avant la problématique cruciale de la maitrise des incertitudes. Malgré une volonté de structuration et de pilotage très marquée par la mise en place des PF, les équipes concernées -CNRS et CEA - (au niveau données nucléaires) ont très rapidement regretté le GDR GEDEPEON. Finalement, la complexité et le nombre important de PF semblaient cloisonner les activités. L'animation ne semblait pas non plus au rendez vous dans un premier temps, même si les dernières années ce rôle avait été aussi plus difficile à tenir par GEDEPEON. NEEDS pouvait alors être vu comme une simple "agence de moyen" pour obtenir des financements annuels. Cela nécessitait du temps de préparation et de justification qui devenait compliqué à maintenir au vu des sommes "modestes" obtenues lors des appels. Ce nouvel outil de structuration et de source de financements, pourtant créé pour stimuler les recherches, ne faisait donc pas l'unanimité chez les acteurs des données nucléaires et n'a pas contribué, à ses débuts, à renforcer les liens entre les équipes.

1.4.2 La structuration des activités à l'IN2P3

Au début des années 2010, on constate un relâchement du lien entre les chercheurs de la communauté "énergie" de l'IN2P3. Les occasions de rencontre entre les différents acteurs, systèmes/scénarios, physique des réacteurs et données nucléaires se font plus rares et les interactions entre les disciplines, pourtant primordiales et justifiées, s'étiolent. A cette période, la génération des chercheurs qui a créé cette thématique à l'IN2P3, quinze ans auparavant, part à la retraite petit à petit, et ce sont des figures motrices et référentes

qui sortent du paysage. Au niveau même des chercheurs des données nucléaires, les interactions entre les équipes diminuent et chacun poursuit ses projets respectifs au sein des collaborations internationales qu'il a montées ou rejointes. On peut noter également qu'après des campagnes de recrutement "chargé de recherche" au CNRS soutenues jusqu'en 2005 (5 postes ouverts en l'espace de 8 ans), les profils des postes ouverts ensuite s'orientent sur les autres thématiques systèmes/scénarios et physique des réacteurs. Alors qu'un nouvel espoir de recrutement naît en 2014 avec l'ouverture d'un poste fléché "données nucléaires", un coup de semonce va secouer la communauté. En effet, la commission 01 estime que les candidats qui se sont présentés au concours cette année ne sont pas au niveau pour prétendre être recrutés au CNRS. Le poste restera vacant. Cela va déclencher une forte colère nourrie par un sentiment d'injustice vis à vis des reproches que l'on fait implicitement à notre communauté. Pourtant cet épisode révéla bel et bien les faiblesses de notre thématique. D'autant qu'à cette période, les activités aux interfaces de la recherche fondamentale/appliquée étaient fragilisées et moins soutenues par la commission par rapport aux activités dite "cœur de métier" dans un contexte de diminution du nombre de postes ouverts au concours. On nous reprochait donc un manque de visibilité, de lisibilité et de stratégie commune. J'ai alors pris en charge la coordination des différents échanges qui ont suivi avec la direction de l'IN2P3 et la commission 01. Lors de l'entretien avec la direction de l'IN2P3 en juillet 2014, qui nous a assuré de son soutien, et suite au constat que NEEDS ne jouait pas le rôle fédérateur et structurant attendu, il a été décidé, à défaut de pouvoir créer un nouveau GDR, de mettre en place une structure interne IN2P3 de la thématique énergie où les activités données nucléaires seraient affichées clairement comme la communauté "Données nucléaires France". Un schéma de la structure envisagée en 2014 est présenté Figure 1.10. Un coordinateur, représentant des équipes, serait désigné et devrait assurer l'interface avec la direction ainsi que l'animation scientifique. Lors de cette réunion, nous avons également acté la rédaction d'une feuille de route qui décrirait nos activités ainsi que nos projets à 10-15 ans. Compte tenu du travail que j'avais effectué suite au non pourvoi du poste, j'ai proposé mes services pour prendre en charge la coordination de la communauté données nucléaires et j'ai reçu l'aval de mes collègues pour assurer cette fonction. Mon premier travail a donc été de rédiger, en collaboration avec les équipes, notre feuille de route. Nous y avons décrit le contexte général et les objectifs de nos recherches ainsi que nos liens avec les organisations internationales. Nous avons ensuite décrit nos activités en les regroupant sous deux axes :

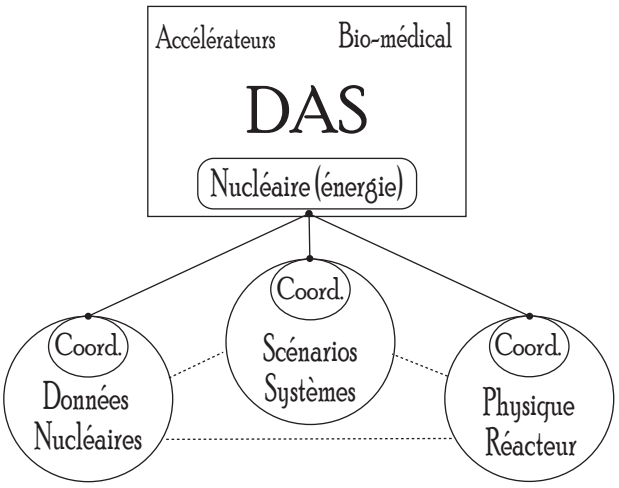


FIGURE 1.10: Proposition de structure de la thématique Energie à l'IN2P3 soumise à la direction en 2014. DAS : Directeur Adjoint Scientifique

- L'étude des réactions nucléaires via les mesures de sections efficaces : i.e. l'étude expérimentale et la modélisation des probabilités des différents processus nucléaires entrant en jeu dans un réacteur.
- L'étude des produits de réactions : i.e. l'étude expérimentale et la modélisation des conséquences des réactions, à savoir, les émissions des particules (chargées ou neutres), des produits de fission, et les mesures de leurs propriétés cinématiques, de leurs rendements, de leur décroissance...

Il était aussi important de mentionner que notre thématique, bien que nourrie des besoins applicatifs, est pourtant bien ancrée dans la physique nucléaire fondamentale tant sur les aspects des techniques expérimentales que les problématiques de modélisation des processus physiques. Enfin, nous avons affiché notre volonté de consolider nos liens entre équipes, de maintenir un haut niveau de développement instrumental ainsi que notre capacité à lancer de nouvelles procédures expérimentales et enfin, de renforcer nos collaborations avec les communautés des évaluateurs, des théoriciens et des physiciens des réacteurs afin de devenir des acteurs à part entière du processus général de la production de données nucléaires évaluées. J'ai ensuite organisé, en décembre 2014, un premier workshop intitulé "Données nucléaires à l'IN2P3 pour les réacteurs du futur"(cf. programme en annexe A) où j'avais invité également les représentants des 2 autres pôles (systèmes/scénarios et physique des réacteurs) à présenter leurs programmes de recherches afin de "re"-nouer le contact entre nos activités. Un des objectifs de ce workshop était également de fournir, à nos doctorants et post-doctorants, un panorama clair et exhaustif

de nos activités afin de les préparer plus efficacement au prochain concours. Parallèlement à cela, j'ai mis en place des rencontres régulières (environ 3 fois par an) avec les représentants des équipes afin d'échanger sur nos activités quotidiennes, nos projets, nos éventuelles difficultés et de transmettre toutes les informations qui nous sont utiles à la bonne conduite de nos projets.

Avec la mise en place de la nouvelle direction de l'IN2P3 en 2015 et la structuration des programmes de recherches en master projet (MP), les activités données nucléaires constituent le master projet OPALE (des dOnnées exPérimentAles à l'évaLuation pour les réactEurs) qui appartient lui même au programme de Recherches INET (Innovative Nuclear Energy production Techniques). J'ai été nommée par la direction de l'IN2P3, responsable du MP OPALE qui regroupe 7 projets.

Aujourd'hui, le bilan de nos actions de structuration me semble positif. Nous avons pu montrer la cohérence de nos différents projets dans le contexte des données évaluées pour les réacteurs. Nous avons su aussi mettre en avant les enjeux de notre thématique et nos projets à court et moyen termes ont été clairement identifiés. Nous avons de nouveau trouvé un équilibre qui doit nous permettre de travailler dans un climat serein. Et finalement, en 2015, malgré un démarrage décevant, NEEDS nous a permis de renforcer encore un peu plus cette visibilité et cette structuration, comme je le décris dans la section suivante.

1.4.3 Le projet structurant NEEDS-NACRE

En 2015, la direction de NEEDS a mis en place les projets structurants qui permettent de regrouper les travaux de plusieurs équipes autour d'objectifs communs et qui sont alors soutenus pour une durée de deux ans. Ce type de réponse est particulièrement adaptée aux activités de données nucléaires et nous avons donc été fortement incités à proposer un projet structurant "données nucléaires" en réponse à l'appel 2016. Suite au travail déjà réalisé dans le cadre de la rédaction de la feuille de route IN2P3 (cf section précédente), j'ai pris en charge la préparation du montage de ce projet, dans un premier temps en concertation avec les collègues de l'IN2P3. Nous nous sommes d'abord basés sur les activités communes IN2P3-CEA qui émargeaient aux défis NEEDS et avons construit un squelette de projet répondant aux critères de NEEDS décrits dans l'appel à projets 2016 et dont un extrait est reproduit ici : "Le PF encourage les actions qui recourent à des

approches originales pour accéder à des données incomplètes ou de qualité insuffisante et/ou difficiles à obtenir. On encouragera les actions démontrant l'impact des incertitudes sur les résultats et permettant les rapprochements entre mesure, évaluation et utilisation des données. Ce thème comprend en particulier des actions de mesures (différentielles, semi-intégrales, intégrales), et d'évaluation de données nucléaires en vue d'améliorer les fichiers évalués (JEFF) prioritaires pour les simulations de réacteurs et cycles, et à fédérer durablement plusieurs équipes autour d'objectifs partagés." Le projet NACRE (Le Noyau Au Cœur du RéactEur) est donc né en collaboration avec les collègues du CEA et de l'IRSN et je partage la responsabilité du projet avec un collègue du CEA, Cyrille De Saint Jean. Le détail du projet, son ambition, sa structure et son budget sont détaillés dans l'annexe B. On peut noter cependant que NACRE a pour "objectif principal de créer les conditions d'une collaboration étroite entre les expérimentateurs, théoriciens et évaluateurs des trois instituts CNRS-IN2P3, CEA et IRSN". Avec un budget global d'environ 120 kEuros, les différents acteurs du projet s'impliquent afin d'une part, de fournir des réponses concrètes sur l'évaluation pour quelques "systèmes" cruciaux pour les réacteurs et d'autre part, de participer à l'amélioration des méthodes et techniques employées à différents stades de la chaîne de l'évaluation des données nucléaires. Tant les aspects instrumentaux et la maîtrise des incertitudes que les développements théoriques et les méthodes d'évaluation sont parties intégrantes de ce projet. Ce projet tire parti des savoir-faire de nos différentes collaborations, des installations/modèles/outils auxquelles elles ont accès ou qu'elles développent, en recentrant les objectifs sur l'amélioration des bases de données évaluées (cf. Figure 1.11).

Enfin, NACRE doit permettre de créer un espace de rencontre et de travail favorable à l'élaboration de projets futurs cohérents et concertés de notre communauté." (extrait du formulaire de réponse à l'appel à projet 2016, annexe B). Notre volonté en tant que porteurs du projet NACRE, est de favoriser les actions qui s'inscrivent nettement dans la chaîne complète de l'évaluation. Pour cela, outre le suivi des projets internes à NACRE, nous encourageons l'animation et les discussions entre les acteurs du projet et avons organisé 3 ateliers entre mars 2016 et mai 2017. Le premier, qui peut être considéré comme un atelier de lancement, intitulé "Données nucléaires IN2P3-CEA" avait pour but de réunir les deux communautés IN2P3 et CEA travaillant sur les données nucléaires afin d'explorer les possibilités de rapprochement entre les équipes des deux instituts. La première journée du workshop était consacrée à la présentation des activités

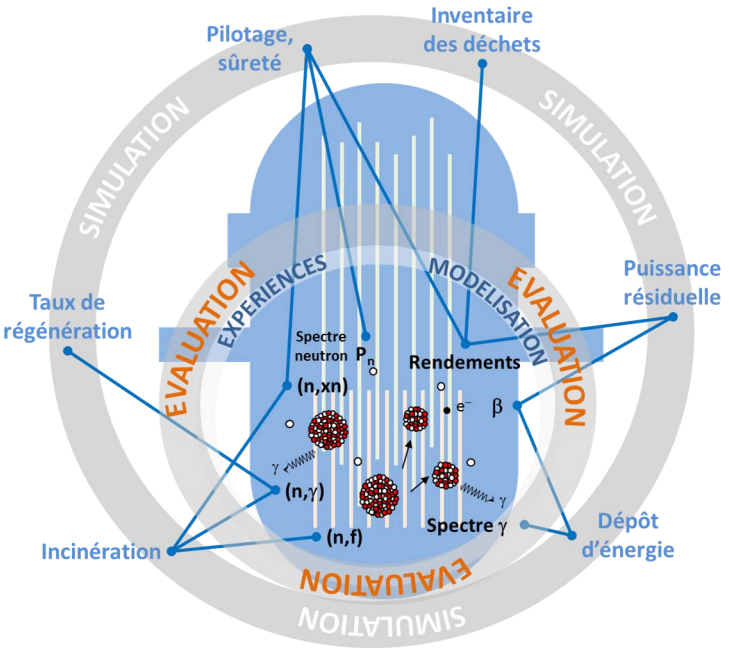


FIGURE 1.11: Schéma résumant le cycle de l'évaluation dans le cadre des données nucléaires pour les réacteurs et dans lequel le projet NACRE s'inscrit.

de chaque équipe et s'est conclue par une discussion où l'avenir de notre communauté et les opportunités de structuration offertes par NEEDS par exemple, ont été abordés. Lors de la seconde journée, la complémentarité des activités expérimentales et d'évaluations ont été discutée au cours de deux ateliers. Le premier portait sur la manière de construire un espace de travail commun, le second était orienté sur les objectifs de précisions à atteindre pour les évaluations, les verrous techniques à lever et les nouvelles générations d'expériences à envisager pour répondre aux questions de la thématique. Puis nous avons organisé deux ateliers prospectifs ciblés sur les activités respectives des workpackages 1, "les sections efficaces de réaction", et 2, "les produits de la réaction de fission", afin de préparer la poursuite du projet dans le cadre de l'appel NEEDS 2018. Une synthèse des deux workshops a été produite regroupant la compilation des différentes interventions et constituant un document de travail pour l'élaboration de la suite de NACRE en 2018.

NEEDS nous a donc finalement donné une réelle opportunité de fédérer et structurer nos activités en commun avec les collègues du CEA et nous permet de renforcer nos collaborations de façon plus visible et efficace. Les différentes compétences complémentaires de chacun des acteurs français (expérimentales, théoriques et évaluation) se trouvent justement mises à profit dans NACRE.

1.4.4 De la mesure à l'évaluation, les activités actuelles

Enfin, après avoir décrit les moyens structuraux que nous avons mis en place ou dont nous avons bénéficié pour améliorer notre visibilité au sein de l'institut et au delà, je termine cette section par un tour d'horizon des activités de recherches et projets suivis dans les différentes équipes de l'IN2P3 aujourd'hui. En reprenant la classification des activités présentée dans la feuille de route, quatre équipes portent des projets de mesures de section efficaces et quatre sont engagées dans l'étude des produits de fission.

Étude des réactions, mesure de sections efficaces

L'équipe du LPC Caen, historiquement engagée dans les mesures de production de particules chargées aux énergies intermédiaires, maintient une activité autour de cette problématique et plus particulièrement avec des expériences prévues auprès de la future installation SPIRAL2-NFS. L'équipe travaille notamment au développement d'une chambre à ionisation ("SCALP" - Scintillating ionization Chambers for ALpha Particle detection in neutron induced reaction) dédiée à la mesure particulière de la réaction $^{16}O(n,\alpha)$ [42].
L'équipe de l'IPNO, depuis les années 2000 s'est concentrée sur les mesures de section efficace de fission et de distribution angulaire des produits de fission [43] auprès de N-TOF. Elle a développé une chambre à réaction composée d'un assemblage de détecteurs PPAC (Parallel Plate Avalanche Counters) qui lui a permis de réaliser des mesures sur ^{238}U, ^{235}U, ^{234}U, ^{232}Th et projette prochainement la mesure sur ^{231}Pa puis dans un second temps, sur ^{232}U. Ce type d'expérience nécessite de disposer de très fines cibles d'actinides (de l'ordre de μm pour le matériaux radioactifs et le support en Aluminium) et en plusieurs exemplaires (une dizaine). Cela peut être un facteur bloquant pour la réalisation des expériences.
L'équipe du CENBG, quant à elle, a continué à travailler autour de la mise au point de la méthode de substitution (utilisation des voies de réaction différentes mais qui produisent le même noyau composé que la voie neutronique) pour les réactions de fission mais aussi pour les réactions de capture [44]. Les collègues ont pu cerner les limitations de cette méthode quand elle est appliquée à la réaction de capture. Ils s'attachent aujourd'hui à comprendre les défauts du modèle statistique qui est utilisé pour extraire les sections efficaces "neutroniques" et ont pu mettre en évidence le rôle prépondérant des distributions de spin calculées. Une autre activité de l'équipe concerne la mise au point d'un

détecteur de flux de neutrons relatif à la section efficace de diffusion élastique (n,p) en vue de mesurer des sections efficaces de fission indépendantes de la section efficace de fission de l'^{235}U. Un dernier projet concerne la mesure de la section efficace de capture de noyau fissile dans le domaine épithermique [45]. Ce projet difficile a malheureusement été mis en veille en 2017.

Enfin, l'équipe de l'IPHC, dont je fais partie, poursuit son travail sur les mesures de réactions (n,xn) sur les actinides par la méthode indirecte de la spectroscopie γ prompte auprès de GELINA (EC-JRC/Geel) [46]. Ce thème sera détaillé dans les chapitres suivants.

Etude des produits de la réaction de fission

En 2010, une équipe du LPSC s'est engagée dans les mesures des rendements de produits de fission auprès du réacteur de l'ILL (Grenoble) en utilisant le spectromètre Lohengrin. Cette installation permet la détermination des rendements en masse et en charge et la mesure de rapports isomériques [47]. L'équipe est aussi fortement engagée aujourd'hui dans l'étape d'évaluation des quatre principaux noyaux fissiles des cycles électronucléaires. Enfin, elle travaille au développement d'un nouvel instrument FIPPS (FIssion Product Prompt gamma-ray Spectrometer), complémentaire de Lohengrin, qui couplera des détecteurs neutrons et gamma à un filtre de fragments de fission [48].

La participation du laboratoire SUBATECH aux activités de données nucléaires pour les réacteurs a évolué au cours de la dernière décennie puisqu'une nouvelle équipe a pris en charge l'étude de la décroissance β et des émissions retardées neutron et gamma [49]. Elle étudie notamment leur impact sur la chaleur résiduelle dans les réacteurs et met en œuvre de nouvelles mesures en utilisant la méthode de la spectroscopie γ à absorption totale. L'équipe développe aussi les outils de simulations qui lui permettent de tester la qualité des données expérimentales dans ce domaine et travaille en étroite collaboration avec les évaluateurs. Une partie de leurs travaux concerne également la problématique des spectres d'antineutrinos qui sont évidemment liés à la décroissance β, et qui sont utilisés pour surveiller la composition isotopique des combustibles en réacteurs (aspect de non-prolifération).

L'équipe du CENBG, en plus des activités expérimentales mentionnées précédemment, contribue également au développement du code GEF (GEneral Fission code) [50] qui permet de produire les distributions des produits de fission selon leur masse, charge,

énergie cinétique et d'excitation et leur spin, puis simule leur désexcitation. Ce code est aujourd'hui un outil utilisé pour le travail d'évaluation.
On peut mentionner aussi des activités autour des rendements de fission auprès du spectromètre VAMOS à GANIL (équipe IPNO, GANIL) [51] et une implication de plusieurs équipes (IPNO, qui contribue à des développements instrumentaux, CENBG, LPSC) dans la collaboration SOFIA (Study Of FIssion with Aladin) qui mesure également des rendements de fission à GSI [52].

Aujourd'hui, notre communauté compte 20 chercheurs dont 11 enseignants chercheurs qui portent des projets variés et représentatifs de la thématique des données nucléaires pour les réacteurs. Nous collaborons activement avec nos collègues du CEA et sommes impliqués également dans des collaborations internationales.
Depuis quelques années, une vraie volonté est affichée, pour la plupart des équipes, d'aller au delà de la mesure et de s'impliquer plus en profondeur dans le processus d'élaboration des données évaluées. Ceci représente un véritable défi car l'évaluation est un domaine en soi et nous ne disposons pas historiquement de ces compétences à l'IN2P3, ce qui signifie que nous devons nous tourner vers nos collègues du CEA, de la AEN et de l'AIEA. Les ateliers communs JEFF-NEEDS, organisés chaque année, nous permettent de lier des contacts de plus en plus productifs avec la communauté européenne des évaluateurs. Ainsi des projets plus ambitieux de la mesure à l'évaluation vont pouvoir voir le jour dans les années à venir.
Un autre défi que devra relever notre communauté est la carence récurrente en matière radioactive et les problèmes techniques ou administratifs liés à la fabrication des cibles. Le réseau des cibles mis en place dans le projet européen CHANDA est une première étape mais ne résout pas tous les problèmes. Nous devons donc soutenir fortement et exprimer de façon claire nos besoins en terme de cible afin de favoriser toute velléité de recherche et de prise en charge de cette problématique au niveau français ou européen.
Les bilans réalisés ces derniers mois dans le cadre des workshops de NACRE ont montré que de nouvelles générations d'expériences seraient indispensables pour résoudre les verrous que notre thématique rencontre encore. Se pose alors la question des effectifs des équipes et des ressources, dans un contexte toujours plus contraint, pour pouvoir nous lancer dans des projets très innovants. On a montré également le fort besoin en mesures d'observables plus fondamentales pour contraindre les modèles théoriques utilisés dans

les codes de réactions nucléaires sous-jacents aux évaluations. La question pourrait alors se poser de nous tourner vers nos collègues physiciens nucléaires impliqués dans des mesures de structures ou de mécanismes de réaction afin de profiter de leur expertise. Mais seraient-ils intéressés de revenir ponctuellement à des noyaux "moins exotiques" que ceux qui les occupent actuellement ?
Les défis sont donc encore nombreux et les projets ambitieux, mais les équipes de l'IN2P3, des universités et écoles associées ont le dynamisme et de bons atouts pour continuer à œuvrer efficacement dans cette thématique.

1.5 Conclusion

Depuis 20 ans et la création de la thématique énergie à l'IN2P3, la communauté des données nucléaires pour les réacteurs a su évoluer, se renouveler, se structurer et se positionner au sein des programmes de recherches de l'IN2P3. Elle tient aussi une place non négligeable sur la scène internationale et participe notamment activement aux programmes européens. La Figure 1.12 résume, au fil du temps, les différents outils de structuration nationaux et européens auxquels les activités données nucléaires ont émargé. Aujourd'hui, même si un équilibre a été trouvé et au delà des défis scientifiques listés dans la section précédente, il reste des défis à relever pour asseoir et pérenniser cette situation dans un contexte (financier et ressources humaines) de plus en plus contraint. En effet, au niveau de l'IN2P3, il nous manquait encore un outil de structuration et d'animation de la communauté Énergie. La création récente du GDR SciNEE (Sciences Nucléaires pour l'Energie et l'Environnement) regroupant les équipes de physique nucléaire et de radiochimie de l'IN2P3 et de l'INC permettra de retrouver un degré d'animation, au sein du pôle 1 "Systèmes nucléaires et scénarios associés", entre les 3 acteurs des données nucléaires, des systèmes et scénarios et de la physique des réacteurs. Enfin, la fin du programme européen CHANDA programmée pour 2018, nous oblige dès à présent à préparer une action pour pérenniser le soutien de l'Europe dans les années à venir.

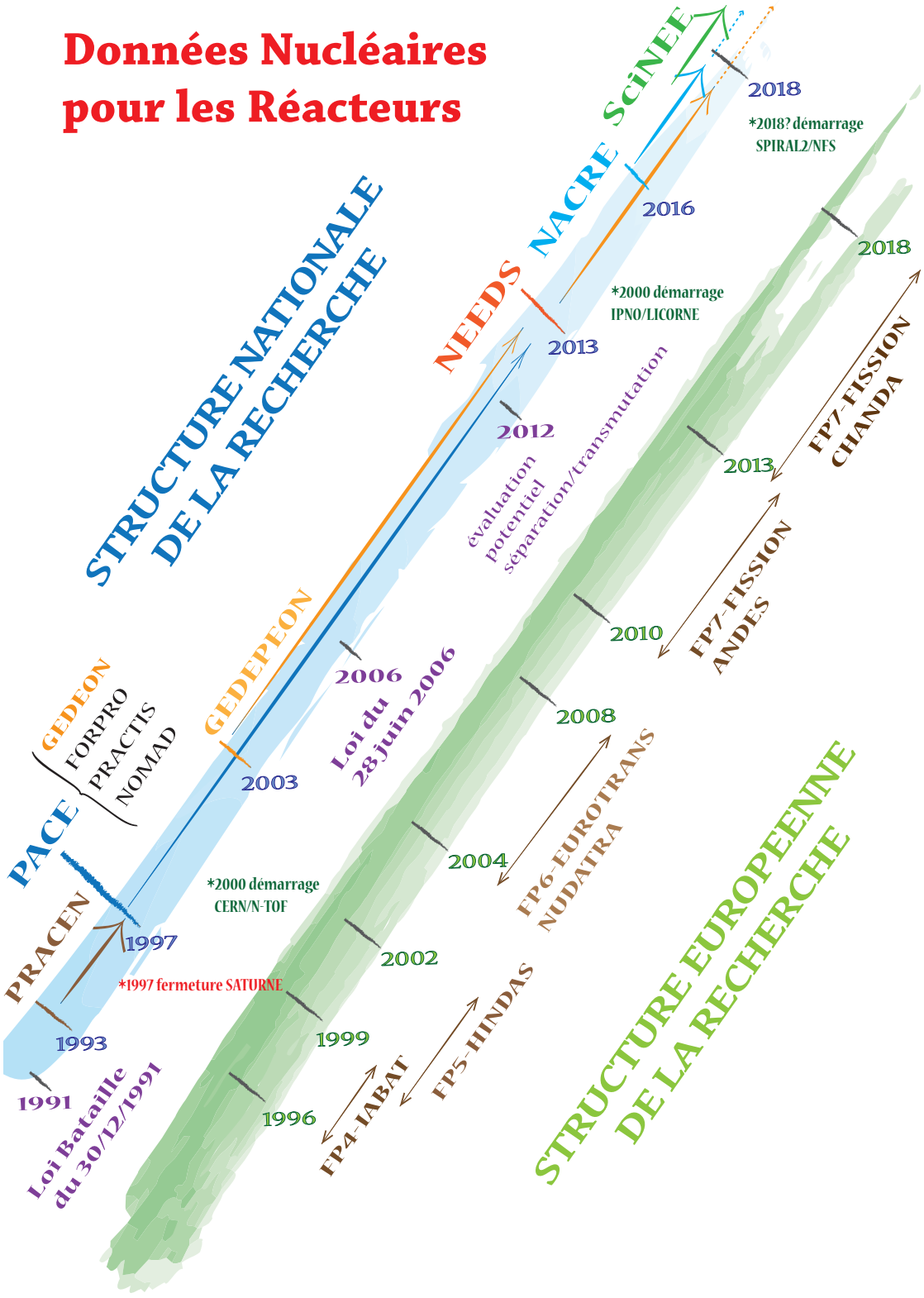


FIGURE 1.12: Les outils nationaux et européens dédiés aux recherches sur les données nucléaires pour les réacteurs depuis la loi Bataille de 1991.

Chapitre 2

L'étude des réactions (n,xn)

En 1999, alors que l'IN2P3 développait ses activités autour de l'étude des ADS et du cycle du thorium, G.Rudolf initia une nouvelle activité expérimentale à l'IPHC (à l'époque IReS) dédiée à l'étude des réactions (n,2n) et plus particulièrement celle sur l'^{233}U. A mon arrivée à l'IReS en 2002, l'équipe cherchait à démontrer la faisabilité de la méthode de la spectroscopie gamma prompte pour l'étude des réactions (n,xn) auprès de différents faisceaux de neutrons et en particulier auprès des sources de neutrons blanches de N-TOF@CERN et GELINA@EC-JRC-Geel (Belgique). Finalement, il s'est avéré que ce type de méthode était impossible à mettre en œuvre à N-TOF mais qu'elle était tout à fait adaptée à l'installation GELINA. Une collaboration est alors née entre l'équipe d'Arjan Plompen et l'équipe Strasbourgeoise pour développer deux instruments de mesure, l'un GAINS (Gamma Array for Inelastic Neutron Scattering) dédié aux mesures des réactions (n,xn γ) sur des éléments stables et l'autre GRAPhEME (GeRmanium array for Actinides PrEcise MEasurements) spécialement développé pour les mesures sur les actinides. GAINS a été construit et financé par le EC-JRC-Geel sous la responsabilité d'Arjan Plompen, GRAPhEME a été développé par notre équipe et il a été largement financé par le GDR GEDEPEON et l'IN2P3. Nous avons obtenu un financement ANR en 2007 pour permettre l'étude des cibles très radioactives. Nos implications dans les différents projets européens ont également permis l'achat d'équipement supplémentaire (système d'acquisition) ou le financement des missions d'expérience.

Dans ce chapitre, je présente, tout d'abord, les motivations liées à la physique des réacteurs qui justifient le développement de dispositifs de mesures des réactions (n,xn). Dans la seconde partie, les différentes méthodes expérimentales sont passées en revue

et la description précise du dispositif GRAPhEME et de ses performances sont décrites. Cette partie s'inspire largement d'un article de revue [46], publié en 2015, suite à une invitation à présenter nos activités sur l'étude de la diffusion inélastique du neutron lors de la seconde édition du workshop "Perspectives on Nuclear Data for the Next Decade". Ce workshop est organisé par le CEA/DAM et a lieu tous les 9 ans à Bruyères-le-Châtel.

2.1 Importance des réactions (n,xn) dans les réacteurs

Dans le cœur d'un réacteur nucléaire, la population des neutrons évolue en fonction des différentes réactions qu'ils vont engendrer. Les réactions de fission (n,f) contribuent à l'augmentation du nombre de neutrons puisque le nombre de neutrons prompts émis par les noyaux qui fissionnent est toujours supérieur à 1. En revanche, les réactions de capture (n,γ), comme leur nom l'indique, font décroitre la population de neutrons ainsi que les réactions produisant des particules chargées légères (n,pcl). La diffusion élastique (n,n) est neutre quant à la population de neutrons mais son rôle est important pour leur ralentissement (impact important sur les noyaux légers) et donc par la suite sur les réactions qu'ils pourront préférentiellement engendrer. Les réactions (n,xn) quant à elles, sont neutres vis à vis de la population neutronique si x=1 (diffusion inélastique notée (n,n')) ou productrices de neutrons si x>1. Les réactions (n,xn), quelle que soit la valeur de x, contribuent également à la modification de la distribution en énergie des neutrons. Ce potentiel de ralentissement de la diffusion inélastique est décrit par la formule 2.1 donnant le rapport entre l'énergie finale (E_{fin}) et initiale (E_{ini}) d'un neutron lors d'une diffusion inélastique [53].

$$\frac{E_{fin}}{E_{ini}} = \frac{\gamma^2 + 1 + 2\gamma\cos(\theta_{inel}^{CoM})}{(A+1)^2} \tag{2.1}$$

avec

$$\gamma = A\sqrt{1 - \frac{(A+1)}{A}\frac{Q_{inelastic}}{E_{ini}}} \tag{2.2}$$

et où θ_{inel}^{CoM} est l'angle d'émission du neutron dans le centre de masse, A est le rapport de la masse du noyau cible à celle du neutron et $Q_{inelastic}$ est l'énergie d'excitation du noyau cible. Le pouvoir de ralentissement de la diffusion inélastique est illustré sur la Figure 2.1 [54] dans le cas de l'uranium 238. On voit en effet que pour des neutrons de 1.5 MeV, leur énergie peut décroitre de 50 à 10% selon le niveau d'excitation atteint (respectivement

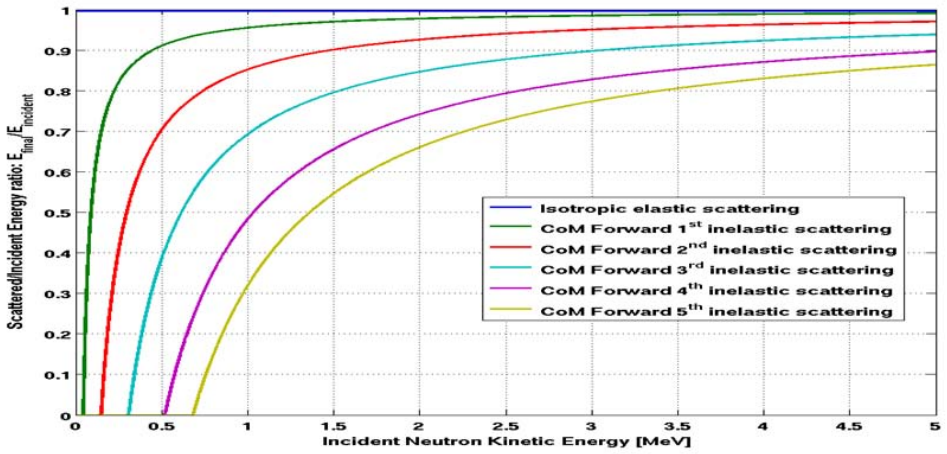


FIGURE 2.1: Rapport énergie finale sur énergie initiale en fonction de l'énergie incidente du neutron pour les chocs élastiques et inélastiques.

du $5^{ème}$ au $2^{ème}$) dans l'uranium 238 alors que lors d'un choc élastique, ces mêmes neutrons ne perdraient que 1% de leur énergie. L'impact des réactions (n,xn) sur le fonctionnement d'un cœur de réacteur n'est donc pas négligeable. En effet, si la section efficace de diffusion inélastique est plus ou moins grande, les neutrons de fission seront plus ou moins ralentis et voyageront alors plus ou moins loin dans le cœur du réacteur, influençant ainsi différemment les taux de fuites et les distributions de puissance. Les études de sensibilité [55] ont montré de façon explicite le besoin de connaître précisément ces sections efficaces afin d'atteindre les précisions requises sur les paramètres de cœur comme le k_{eff}. Dans les deux paragraphes suivants, des exemples plus précis concernant le besoin d'amélioration des connaissances des sections efficaces (n,n') et (n,xn) sont détaillés.

2.1.1 La diffusion inélastique

Pour illustrer l'importance de la diffusion inélastique dans la physique des réacteurs, le cas de l'uranium 238 est très significatif. Ce noyau est majoritaire dans le cœur d'un réacteur puisqu'il constitue plus de 90% du combustible. Pourtant la connaissance actuelle de la diffusion inélastique sur ^{238}U ne permet pas d'atteindre les objectifs de précision demandés par les applications comme on le verra par la suite. La Figure 2.2 [46] montre l'importance de la section efficace de diffusion inélastique comparée à la fission et à la

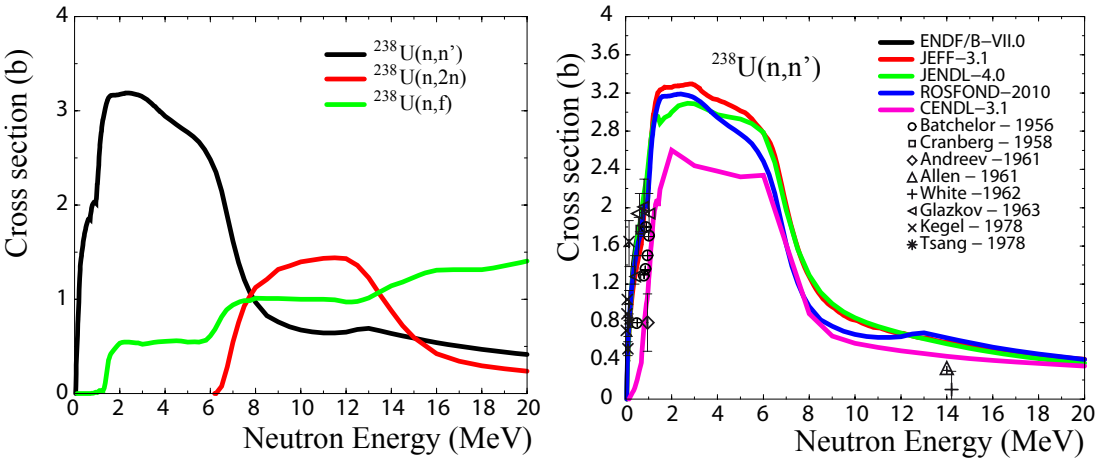


FIGURE 2.2: Section efficace de diffusion inélastique, de fission et de réaction (n,2n) sur ^{238}U (gauche) et comparaison des bases de données expérimentales aux bases de données évaluées.

réaction (n,2n), et l'état de l'art des mesures et évaluations pour cette réaction. On remarque d'abord que la réaction de diffusion inélastique domine largement les réactions jusqu'à 8 MeV et que peu de mesures directes existent au delà de 2 MeV, particulièrement au niveau du maximum de la section efficace. Quant aux évaluations, il n'est alors pas surprenant d'observer leur forte divergence due aux différentes approches théoriques qu'elles mettent en œuvre et qui peinent encore aujourd'hui à prédire les sections efficaces. Cette dispersion amène aujourd'hui à considérer que la diffusion inélastique du neutron sur ^{238}U n'est connue qu'à 20% comme cela est présenté sur la Figure 2.3 [56]. L'impact de cette incertitude est discuté dans de nombreuses références. On peut commencer par citer des travaux anciens (1990-1999) [57] du sous groupe 4 du WPEC (Working Party on International Evaluation Co-operation) de l'AEN qui mettaient déjà en avant le problème de la méconnaissance de la section inélastique de l'^{238}U et qui se traduisait par de grandes dispersions entre les différentes bases de données (ENDF/B-VI, JEFF-2, JENDL-3 disponibles à l'époque). Dans le rapport, les auteurs mentionnent les difficultés qu'ils ont rencontrées pour résoudre les différences entre les bases de données en utilisant les données expérimentales et les calculs théoriques disponibles à l'époque. Ils mettent en avant, également, la difficulté d'obtenir des données expérimentales et le besoin de connaître précisément non seulement la section efficace inélastique totale mais aussi la distribution en énergie des neutrons émis. De nouvelles campagnes de mesures (détection des neutrons émis) avaient alors été lancées (pour des énergies neutrons incidentes jusqu'à quelques MeV) et avaient permis finalement de résoudre certains problèmes à basse énergie de

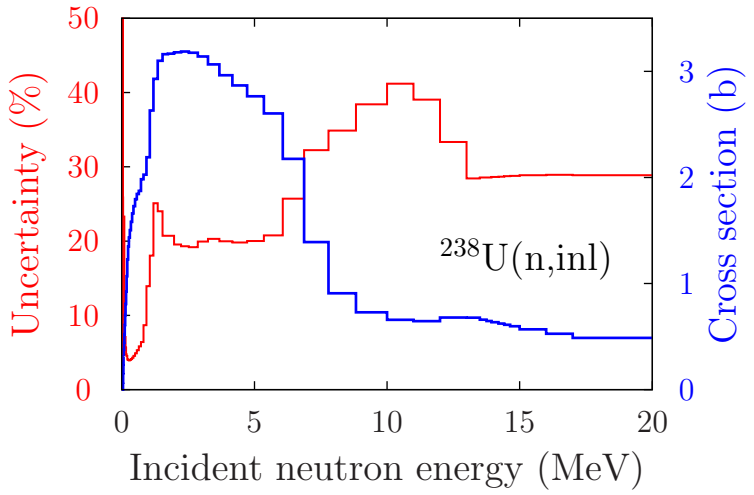


FIGURE 2.3: Section efficace de diffusion inélastique sur ^{238}U provenant de la base de données ENDF/B-VII.1. L'ordonnée à gauche correspond aux incertitudes et l'ordonnée à droite à la section efficace.

neutrons. Dix ans plus tard (2008), le rapport du sous-groupe 26 du WPEC de l'AEN publiait un document intitulé "uncertainty and target accuracy assessment for innovative systems using recent covariance data evaluations" [55]. Ce travail était axé sur le développement d'une approche systématique pour définir les besoins en données nucléaires pour les réacteurs innovants et ceux proposés pour la quatrième génération (Gen IV). Une étude de sensibilité et d'incertitude a donc été réalisée pour évaluer l'impact de l'incertitude des sections efficaces neutroniques sur les paramètres intégraux les plus significatifs des coeurs de réacteurs et du cycle de combustible pour quelques systèmes nucléaires typiques (advanced breeder test reactor (ABTR), sodium-cooled fast reactor (SFR), European fast reactor (EFR), the gas-cooled fast reactor (GFR), lead-cooled fast reactor (LFR), accelerator-driven minor actinide burner (ADMAB), very high-temperature reactor (VHTR) et pressurised water reactor with extended burn-up (PWR)). Ces systèmes correspondaient aux études menées dans les cadres du forum Génération-IV, du Global Nuclear Energy Partnership (GNEP), de l'Advanced Fuel Cycle Initiative (AFCI), et des études avancées du cycle du combustible et de la séparation/transmutation au Japon et en Europe. Ce rapport est devenu un document de référence pour tous les expérimentateurs qui y trouvaient alors une étude très complète leur permettant d'argumenter et de défendre leurs expériences auprès des PAC des différentes installations nucléaires. Les besoins de précision pour chaque isotope et chaque réaction y sont clairement énoncés. Par exemple, concernant la diffusion inélastique du neutron sur l'uranium 238, on voit

Isotope	σ_{cap}	σ_{fiss}	ν	σ_{el}	σ_{inel}	$\sigma_{n.2n}$	Total
^{235}U	0.01	–	–	–	–	–	**0.01**
^{238}U	0.33	0.03	0.11	0.16	0.79	–	**0.88**
^{238}Pu	0.02	0.12	0.09	–	–	–	**0.15**
^{239}Pu	0.23	0.18	0.11	0.01	0.07	–	**0.32**
^{240}Pu	0.24	0.26	0.24	–	0.04	–	**0.43**
^{241}Pu	0.02	0.35	0.02	–	–	–	**0.36**
^{242}Pu	0.06	0.07	0.02	–	0.01	–	**0.09**
^{237}Np	–	–	–	–	–	–	**0.01**
^{241}Am	0.04	0.04	0.01	–	–	–	**0.06**
^{242m}Am	–	0.03	–	–	–	–	**0.03**
^{243}Am	0.01	0.01	–	–	–	–	**0.01**
^{242}Cm	–	–	–	–	–	–	–
^{243}Cm	–	0.01	–	–	–	–	**0.01**
^{244}Cm	0.01	0.06	0.01	–	–	–	**0.06**
^{245}Cm	–	0.05	0.01	–	–	–	**0.06**
^{246}Cm	–	0.01	–	–	–	–	**0.01**
^{56}Fe	0.06	–	–	0.01	0.25	–	**0.26**
^{52}Cr	0.01	–	–	0.01	0.01	0.01	**0.01**
^{58}Ni	0.07	–	–	–	0.03	–	**0.08**
^{23}Na	0.01	–	–	0.02	0.13	–	**0.14**
^{16}O	0.26	–	–	0.06	0.03	–	**0.27**
Total	**0.55**	**0.51**	**0.30**	**0.17**	**0.84**	**0.01**	**1.18**

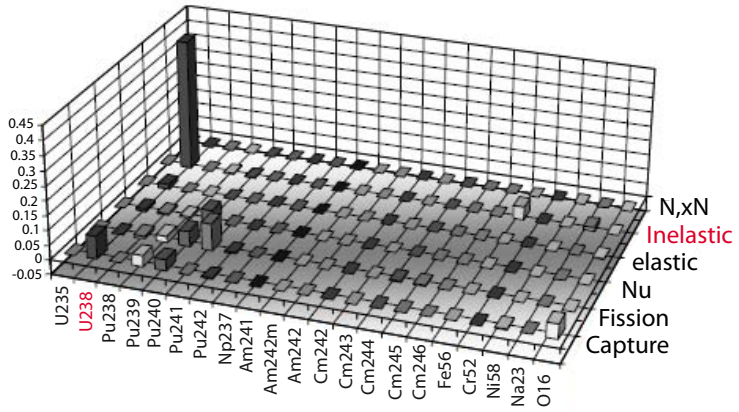


FIGURE 2.4: Contribution des incertitudes sur les sections efficaces des réactions à l'incertitude sur le k_{eff} du système EFR et ce pour 21 isotopes.

de façon très simple la contribution de l'effet de l'incertitude sur le k_{eff}, sur la distribution de puissance, sur l'effet doppler ou de vide, pour les systèmes ABTR, EFR, GFR, LFR et PWR. La Figure 2.4 extraite du rapport ([55] p.310) montre la contribution des incertitudes sur les sections efficaces des réactions à l'incertitude sur le k_{eff} du système EFR et ce pour 21 isotopes. On y voit clairement que la contribution de l'incertitude sur la section efficace inélastique domine toutes les autres contributions. Et finalement,

Table 10. ABTR, SFR, EFR, GFR, EFR, ADMAB target accuracy results

Isotope	Cross-section	Energy range	Uncertainty (%)	
			Initial	Required λ=1
^{234}U	σ_{capt}	67.4-24.8 keV	22.7	19.2
		24.8-9.12 keV	19.2	18.0
	σ_{fiss}	1.35-0.498 MeV	38.0	28.2
^{235}U	σ_{capt}	183-67.4 keV	30.6	23.8
		67.4-24.8 keV	32.9	23.4
		24.8-9.12 keV	34.0	23.9
		9.12-2.03 keV	33.9	14.8
^{238}U	σ_{capt}	24.8-9.12 keV	9.4	1.8
		9.12-2.03 keV	3.1	1.8
	σ_{inel}	19.6-6.07 MeV	29.3	9.0
		6.07-2.23 MeV	19.8	2.0
		2.23-1.35 MeV	20.6	2.1
		1.35-0.498 MeV	11.6	2.3
		498-183 keV	4.2	3.8
		183-67.4 keV	11.0	4.2
^{237}Np	σ_{capt}	1.35-0.498 MeV	10.3	4.7
		498-183 keV	5.8	2.9
		67.4-24.8 keV	6.7	2.7
		24.8-9.12 keV	5.3	2.8
		9.12-2.03 keV	5.3	2.9
		2.03-0.454 keV	5.5	3.6
		6.07-2.23 MeV	7.9	3.0
		2.23-1.35 MeV	7.6	2.4
		[illegible] MeV	5.8	1.5

FIGURE 2.5: Incertitudes cibles pour l'uranium 238 dans 6 types de systèmes nucléaires (ABTR, SFR, EFR, GFR, LFR, ADMAB).

les auteurs du rapport donnent des recommandations sur les incertitudes que l'on devrait atteindre pour chaque réaction/isotope selon la gamme en énergie neutron. Pour l'uranium 238, et pour 6 systèmes étudiés les incertitudes cibles sont compilées dans le tableau de la Figure 2.5 ([55] p.448). On y découvre le saut quantitatif à franchir pour atteindre les incertitudes requises qui sont extrêmement réduites (inférieures à 5%) et qui représentent de vrais défis pour les expérimentateurs ! On retrouve également ces incertitudes cibles dans la High Priority Request List de l'AEN [58] qui analyse, filtre et compile les demandes de nouvelles mesures, avec les incertitudes cibles, provenant de la communauté travaillant sur les réacteurs nucléaires.

Plus récemment, d'autres groupes de travail ont "planché" sur la diffusion inélastique du neutron et notamment celle sur les actinides. Une réunion technique s'était tenue en 2011 à l'AIEA dans le cadre de l'INDC (International Nuclear Data Committee) [59]. Cette approche a permis de refaire un point sur l'avancée des modèles ainsi que les efforts expérimentaux en cours. Les auteurs ont là encore pointé le besoin de nouvelles mesures avec différentes techniques et auprès des nouvelles installations disponibles (n_TOF (EAR-2), J-PARC, LANSCE, nELBE). Pour alimenter quelques discussions des chapitres suivants, je relève que les auteurs ont aussi mentionné l'importance pour les expérimentateurs de documenter précisément leurs données expérimentales dans la base de données EXFOR

afin de permettre aux évaluateurs de mieux comprendre tous les enjeux de l'expérience (corrections apportées aux données brutes, incertitudes, ...). Le problème de l'obtention des cibles d'actinides a été, de plus, souligné.

Encore plus récemment (2014), une étude réalisée par les collègues du CEA/DEN de Cadarache [60] a montré que la section efficace de diffusion inélastique du neutron sur ^{238}U de la librairie JEFF-3.1.1 serait surestimée de (11±3)% dans la gamme en énergie de 2 à 5 MeV. Cette étude était basée sur la modélisation, avec le code TRIPOLI4 et la base de données JEFF-3.1.1, d'une sélection d'expériences intégrales particulièrement sensibles à la section efficace ^{238}U(n,n'). Elle a permis de montrer également que cette surestimation de la section efficace était aussi pénalisante pour l'étude des réacteurs commerciaux à gros cœurs.

En 2014, la collaboration CIELO (Collaborative International Evaluated Library Organization) [61, 62], mise en place pour faciliter les travaux internationaux d'avancement de l'évaluation des données nucléaires, a sélectionné un petit nombre de noyaux de haute importance pour focaliser les efforts de la communauté. Parmi les trois actinides (communément appelés les "big three") choisis figure l'uranium 238, les deux autres étant l'^{235}U et le ^{239}Pu. Là aussi le besoin de nouvelles mesures et d'amélioration de la modélisation est mis en avant.

Enfin, une récente étude (2017) [63] sur la sensibilité aux données nucléaires et aux incertitudes liées, du coefficient de multiplication des neutrons dans le réacteur MYRRHA (Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications) pour différentes configurations de cœur a montré que l'incertitude sur la section efficace ^{238}U(n,n') contribuait de façon significative à l'incertitude sur le k_{eff}. Les auteurs de l'article recommandent donc une amélioration des données évaluées pour, entre autres, l'uranium 238.

Dans les paragraphes précédents, je me suis restreinte à montrer l'importance de la diffusion inélastique dans la modélisation des réacteurs dans le cas de l'uranium 238. Malgré les efforts réalisés par la communauté internationale depuis plus de 20 ans, cette section efficace n'est toujours pas assez bien connue. Cela révèle le besoin de travailler conjointement entre expérimentateurs, théoriciens et évaluateurs pour continuer à améliorer l'évaluation de cette réaction. Ceci dit, si je me suis concentrée sur l'^{238}U, cela ne doit pas occulter le fait que la réaction de diffusion inélastique doit être aussi étudiée pour

d'autres actinides (^{235}U, ^{239}Pu, ^{232}Th, ^{233}U, ...), des matériaux de structure (Fe, W, Zr, ...) ou d'autres éléments présents dans le cœur d'un réacteur dont les évaluations posent aussi questions.

2.1.2 Les réactions (n,xn)

L'intérêt de bien connaître les réactions (n,xn) avec x> 1 dans un réacteur est moins bien documenté dans la littérature que dans le cas de la diffusion inélastique. Cependant leur importance existe bel et bien, malgré leur section efficace plus faible et leur seuil de réaction plus élevé. Le premier exemple qui peut être évoqué, et qui a été le moteur du démarrage de l'activité des données nucléaires pour les réacteurs par G.Rudolf à l'IReS, était la mesure de la section efficace de la réaction ^{233}U(n,2n). En effet, l'^{232}U ($T_{1/2}$=68.9 ans) produit par la réaction précédemment citée, après 6 désintégrations alpha, décroit sur le ^{208}Tl qui décroît lui même sur le plomb 208 par désintégration β^- et qui aboutit à l'émission d'un γ de 2.6 MeV (1^{er} état excité du ^{208}Pb). L'énergie de ce rayon gamma peut poser des problèmes de radioprotection notamment lors du démantèlement des réacteurs. Les réacteurs fonctionnant au cycle du thorium seraient évidemment très concernés par ce problème. Il faut aussi noter qu'en 2005, à la conférence "International Symposium on Neutrons in Basic Science and Nuclear Technologies" au CERN à Genève, une équipe du CEA présentait une des préoccupations d'EDF relatives à la sous estimation de la production d'^{232}U présent dans des combustibles non irradiés âgés et irradiés. Différents canaux de production ont été identifiés et les réactions (n,xn) jouent alors un rôle important dans cette production. Les réactions (n,2n) sur ^{238}U, ^{237}Np, ^{232}Th et ^{233}U et (n,3n) sur ^{234}U et ^{238}Pu aboutissent toutes à la production d'^{232}U. Nombre de ces réactions sont très mal connues expérimentalement et les évaluations divergent fortement entre elles pour toutes ces réactions. Par exemple, la Figure 2.6 montre l'état des lieux pour la réaction (n,2n) sur ^{232}Th et ^{233}U. Si de nombreuses mesures existent sur le ^{232}Th, aucune n'est répertoriée pour l'^{233}U. L'exemple de la réaction (n,2n) sur ^{238}U est aussi intéressant car les motivations sont un peu différentes de la simple application réacteur. En effet, cette réaction est utilisée comme une réaction dosimétrique dans l'évaluation de la partie haute énergie du spectre de fission prompte. Comme le montre la Figure 2.7, malgré un grand nombre de mesures, on constate une dispersion des points expérimentaux et des évaluations qui peut aller jusqu'à 10%.

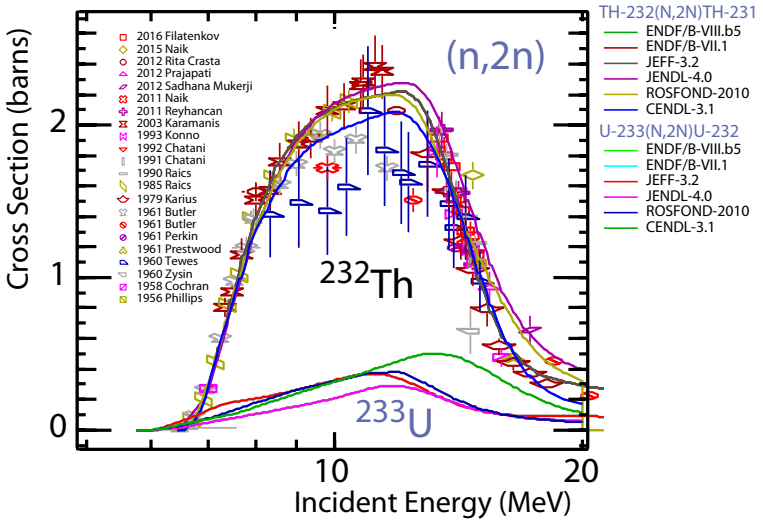


FIGURE 2.6: Bases de données expérimentales et évaluées pour les réactions (n,2n) sur ^{232}Th et ^{233}U.

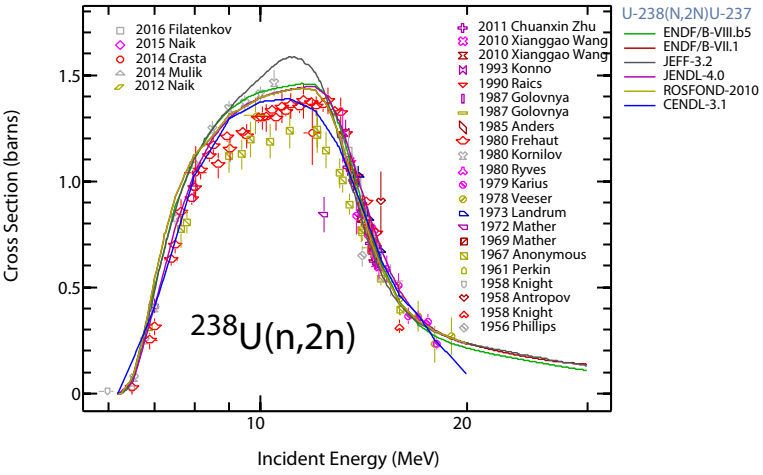


FIGURE 2.7: Bases de données expérimentales et évaluées pour la réaction (n,2n) sur ^{238}U.

Après cette revue, non exhaustive, des besoins d'améliorations des connaissances des réactions (n,xn), et en préambule de la partie suivante qui expose nos activités expérimentales autour de la spectroscopie gamma prompte, je décris les différentes méthodes expérimentales permettant la mesure de ces réactions.

2.2 Méthodes expérimentales

2.2.1 Mesures directes et indirectes

Les études sur la diffusion inélastique du neutron et des réactions (n,xn) ont commencé dès les années 30, avec la mise en évidence expérimentale de la diffusion inélastique du neutron par Seaborg, Gibson et Grahame [64] qui utilisaient un bloc de plomb et un compteur Geiger-Mueller. Depuis, différentes méthodes expérimentales, directes ou indirectes, ont été développées et utilisées par les physiciens nucléaires. On appellera les méthodes directes celles qui s'appuient sur la détection des neutrons et les méthodes indirectes celles qui s'appuient sur la détection de particules secondaires comme les gammas. Dans les années quarante-cinquante, les physiciens mettaient en évidence les niveaux d'excitation des noyaux via la diffusion inélastique en observant le recul des protons provoqué par les neutrons diffusés dans des chambres à brouillard [65] ou des émulsions NTB [66]. On peut citer aussi les travaux de Allen *et al.* qui mesuraient la section efficace non élastique par transmission des neutrons dans une sphère creuse [67]. Les premières mesures en coïncidence de neutrons et de gammas ont été réalisées par Garret *et al.* en 1953 [68] grâce à un scintillateur organique au stilbene pour la détection des neutrons et un cristal de NaI(Tl) pour celle des gammas. Dans les années 70, le CEA/DAM a développé un détecteur, basé sur un scintillateur liquide chargé en Gadolinium, permettant la mesure des sections efficaces des réactions (n,2n) et (n,3n) [69]. Puis dans les années 90, suite aux travaux du sous groupe 4 du WPEC de l'AEN, de nombreuses mesures [70–72] ont été effectuées en utilisant des scintillateurs NE213 et la méthode du temps de vol pour déduire les sections efficaces doublement différentielles en angle et en énergie d'émission des neutrons. La technique du temps de vol a permis d'augmenter significativement la résolution en énergie des neutrons détectés et donc des niveaux excités observés. L'intégration de la distribution angulaire permet de déduire ensuite la section efficace totale. A la fin des années 70 et au début des années 80, la méthode indirecte de la spectroscopie gamma prompte est apparue pour la mesure des sections efficaces (n,n' γ) auprès de faisceaux de neutrons quasi mono-énergétiques [73] mais aussi auprès de source de neutrons blancs [74, 75]. Lors de ces mesures, c'est le gamma prompt de désexcitation du noyau formé par la réaction (n,xn) qui est détecté. Cette technique a ensuite été employée de nouveau entre 1995 et 2005, avec le multi-détecteur GEANIE (GErmanium Array for Neutron Induced Excitations) auprès de l'installation temps de vol LANSCE

de Los Alamos (USA) et de nombreuses campagnes de mesures ont été effectuées sur un grand nombre de noyaux (cf. partie suivante). Enfin, la technique dite d'activation peut également être employée pour mesurer une section efficace totale dans le cas où la durée de vie du noyau formé par la réaction (n,xn) permet une mesure hors-faisceau de sa désexcitation [76].

Grâce à toutes ces méthodes, différentes observables peuvent être mesurées comme les sections efficaces partielles et/ou totale de réaction et les spectres et distributions angulaires des neutrons émis. Malgré des décennies d'études de la diffusion inélastique et malgré l'amélioration des techniques expérimentales et des moyens d'analyse de données, la connaissance de cette réaction n'est pas, aujourd'hui, au niveau attendu pour les besoins applicatifs. En effet, mesurer la section efficace de diffusion inélastique reste un vrai challenge, aucune méthode, qu'elle soit directe ou indirecte n'étant parfaite. Dans les méthodes directes, il faudra toujours résoudre la difficulté de différencier l'origine des neutrons (fission, diffusion élastique ou inélastique) et cela engendre des corrections non négligeables. La résolution en énergie des neutrons détectés est aussi insuffisante pour extraire une mesure des états discrets des bandes rotationnelles dans les actinides par exemple. Quant aux mesures indirectes et plus particulièrement la spectroscopie gamma prompte, bien qu'elles fournissent des informations exclusives contraignantes, elles sont aussi dépendantes de corrections et de la connaissance de la structure du noyau étudié. Ces aspects sont décrits dans la suite de ce chapitre.

2.2.2 La spectroscopie γ prompte

Comme mentionné précédemment, un moyen d'étudier les réactions (n,xn), en s'affranchissant de la difficulté de détecter les neutrons émis et d'identifier leur mode de production (fission, processus élastique, inélastique...), est de tirer partie de la haute sélectivité de la spectroscopie γ pour identifier le canal de réaction. En effet, en général, l'interaction d'un neutron avec un noyau laisse celui-ci dans un état excité qui reviendra à son état fondamental en émettant une cascade de quelques gammas. La distribution en énergie initiale sur un large nombre de niveaux de haute énergie est finalement collectée, après la cascade, sur les quelques premiers niveaux qui décroissent ensuite sur le niveau fondamental. Le développement des détecteurs Germanium à haute résolution permet la détection précise de cette cascade γ et donc d'identifier le noyau formé par la réaction

induite par neutron. On mesure ainsi les sections efficaces de réaction (n,xn γ) exclusives pour un grand nombre de transitions. Un des avantages de cette méthode est qu'elle peut être couplée à des mesures de temps de vol et ainsi être utilisée auprès de faisceaux de neutrons blancs. Dans ce cas, en une mesure, les fonctions d'excitation (n,xn γ) sont déterminées sur une large plage en énergie neutrons. Ces sections efficaces donnent alors des informations sur la structure du noyau et sur les mécanismes de réactions mais peuvent aussi être utilisées pour déduire les sections efficaces de production des niveaux excités et les sections efficaces totales inélastique ou de réaction (n,xn), comme cela sera décrit plus en détail dans le chapitre suivant. Dès les années soixante-dix, cette méthode a été utilisée par Voss *et al.* [75, 77] au cyclotron de Karlsruhe (KIT) pour l'étude des réactions (n,n' γ) sur l'uranium 238, le fer 56 et l'aluminium 27. Des mesures ont été également réalisées auprès de l'accélérateur linéaire du Oak Ridge National Laboratory (ORELA), par Dickens *et al.* et Olsen *et al.* sur des noyaux plus légers comme ^{7}Li, ^{24}Mg, ^{28}Si, ^{65}Zn, ^{208}Pb, etc [74, 78]. Dans les années 90 et 2000, la méthode de la spectroscopie γ prompte a été intensivement employée avec le spectromètre à haute résolution GEANIE auprès de la source de neutron blanc (WNR - Weapons Neutron Research) de LANSCE - Los Alamos Neutron Science CEnter (LANL, US). Cet instrument a permis la réalisation de nombreuses campagnes de mesures sur des noyaux variés (Pb, Al, Pt, Mo, Ti, Sm, U, Pu, etc) et sur une plage en énergie neutrons allant de quelques MeV à 400 MeV [79–88]. Ces travaux de référence ont donc permis la production de nombreuses sections efficaces (n,xn γ) mais également celles pour les processus (n,x γ). De plus, ces données expérimentales ont été utilisées pour tester les prédictions de modèles théoriques via le code de réaction nucléaire GNASH et en déduire ainsi les sections efficaces totales inélastique et (n,xn) [89, 90]. Elles ont été également intégrées dans de nouvelles évaluations [91].

Pour développer notre dispositif expérimental GRAPhEME (GeRmanium array for Actinides PrEcise MEasurements), nous nous sommes bien évidemment inspirés de ces précédents travaux, mais avant de présenter GRAPhEME plus en détail dans la partie suivante, voici comment extraire une section efficace (n,xn γ) à partir de la détection des γ de désexcitation du noyau formé par la réaction (n,xn). Ces gammas provenant de la cible d'intérêt sont détectés par des détecteurs Germanium qui enregistrent l'énergie du γ et son temps d'arrivée par rapport à la pulsation du faisceau. Une chambre à fission placée en amont de l'échantillon à étudier permet, via la détection des produits de fission et grâce à la bonne connaissance de la section efficace de fission, de déterminer le

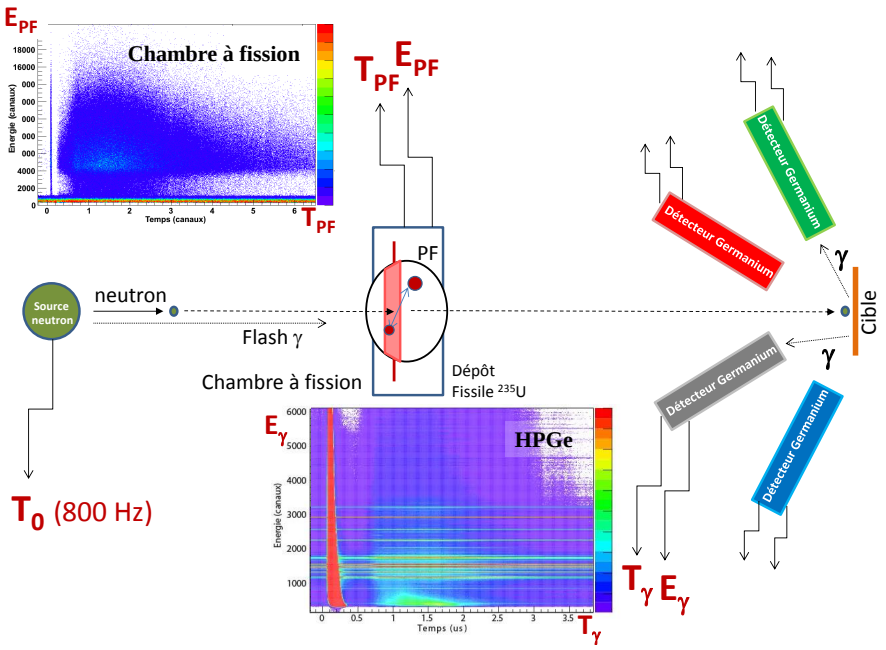


FIGURE 2.8: Schéma de principe du système de détection pour la méthode de la spectroscopy γ prompte couplée à des mesures de temps de vol. Le schéma n'est pas à l'échelle et ne respecte pas les proportions.

nombre de neutrons incidents. L'énergie et le temps d'arrivée des produits de fission sont également enregistrés. Le schéma 2.8 permet de visualiser le principe de la mesure où les spectres bidimensionnels (temps, énergie) obtenus résument toute l'information disponible dans ce type d'expérience. A partir de ces spectres, les distributions en énergie γ sont extraites pour des plages en temps de vol (et donc en énergie neutron) afin de décrire la dynamique en énergie de l'expérience. Les transitions γ d'intérêt sont identifiées et la distribution en énergie des sections efficaces différentielles en angle est ensuite extraite, pour chaque détecteur Germanium et chaque transition γ, suivant l'équation 2.3.

$$\frac{\mathrm{d}\,\sigma}{\mathrm{d}\,\Omega}(\theta_i, E_n) = \frac{1}{4\pi}\frac{N_{GE}(\theta_i, E_n)}{N_{FC}(E_n)}\frac{\varepsilon_{FC}}{\varepsilon_{GE}}\frac{\varsigma_{FC}}{\varsigma_{sple}}\,\sigma_F(E_n) \tag{2.3}$$

où N_{GE} représente le nombre de coups, corrigé du temps mort du système d'acquisition, pour une transition γ donnée dans le spectre en énergie enregistré par le détecteur HPGe. N_{FC} représente le nombre de coups dans la chambre à fission au dessus du seuil de discrimination. ε_{GE} et ε_{FC} sont les efficacités de détection des compteurs Germanium et de la chambre à fission, σ_F la section efficace de fission de ^{235}U et ς_{FC} et ς_{sple} la densité surfacique (atomes/cm^2) du dépôt de la chambre à fission et de la cible à étudier. A partir de ces sections efficaces différentielles en angle, il est possible de calculer, par

intégration sur l'angle solide, la section efficace totale de transition (n,xn γ) en prenant en compte la distribution angulaire de l'émission γ. Pour cela les détecteurs sont placés à des angles spécifiques qui permettent la détermination précise de l'intégrale. En effet, les distributions angulaires pour les transitions γ entre états bien définis peuvent s'exprimer comme une somme finie de polynômes de Legendre de degré pair. Positionner les détecteurs à des angles correspondant aux nœuds de ces polynômes (par exemple 125° pour le second ordre, 110° et 150° pour l'ordre 4) permet une intégration exacte de la distribution angulaire pour des transitions de multipolarité allant jusqu'à 3, grâce à la quadrature de Gauss [92, 93]. Cette méthode permet d'éliminer les contributions des degrés 2, 4 et 6 des polynômes en utilisant des coefficients d'intégration adéquats. Dans notre cas, les détecteurs sont positionnés à 110° et 150° et les sections efficaces sont intégrées via la formule suivante

$$\sigma_{tot}^{(n,xn\gamma)} = 2\pi \left[w_1 \frac{\mathrm{d}\,\sigma}{\mathrm{d}\,\Omega}(\theta_1) + w_1 \frac{\mathrm{d}\,\sigma}{\mathrm{d}\,\Omega}(\theta_2) \right] \tag{2.4}$$

où $w_1 = 0.69571$ et $w_2 = 1.30429$ sont les poids associés respectivement aux angles 150° et 110°. Pour plus de détails, le lecteur peut se référer aux publications suivantes [46, 94].

Preuve de faisabilité

Avant d'installer définitivement notre dispositif expérimental à GELINA, nous avons testé cette méthode auprès de différentes sources de neutrons. Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet européen EURATOM FP5, N-TOF-ND-ADS et plus particulièrement au sein du workpackage (WP) 16 dédié aux mesures de sections efficaces de réaction (n,xn) [95]. Dans ce WP, l'objectif était de mesurer ces sections efficaces précisément, par les méthodes d'activation et de la spectroscopie γ prompte, pour les isotopes suivants : ^{233}U, ^{232}Th, ^{231}Pa, ^{232}U, ^{239}Pu, ^{241}Pu, ^{241}Am, ^{243}Am, ^{237}Np et ^{205}Pb. L'enjeu de ce type de mesures employant des cibles actives, est de pouvoir utiliser des sources de neutrons instantanées intenses afin que le signal provenant de la réaction soit "visible" dans le fond radioactif. Les deux grandes installations "temps de vol" en Europe sont les faisceaux N-TOF du CERN et GELINA du EC-JRC-Geel dont les caractéristiques sont décrites dans le tableau 2.1. On voit que le faisceau de neutrons de N-TOF est très intense mais son cycle utile est faible. Dans les deux installations, un flash "γ" provenant de la source et inhérent au processus de formation des neutrons, est produit.

TABLE 2.1: Caractéristiques des deux installations "temps de vol" Européennes majeures.

	N-TOF@CERN	**GELINA@EC-JRC-Geel**
production des neutrons	spallation p+Pb	photo-fission e^-+U
faisceau primaire	20 GeV protons, 3. 10^{13} p/pulse	0.15 GeV électrons, 7.5 10^{11} e^-/pulse
taille et fréquence du pulse	6 ns, 0.4 Hz	1 ns, 800 Hz
taux de production des Neutrons (@source)	2. 10^{15} n/pulse, $\sim 10^{15}$ n/s	4. 10^{10} n/pulse, $\sim$3. 10^{13} n/s
bases de vol	185 m et 20 m	plusieurs stations de 10 m à 400 m
Energy neutron	0.1 à 250 MeV	10 meV à 20 MeV

Ce flash précède les neutrons et est observé dans les détecteurs Germanium. Avec une électronique dite "classique" le temps de mise en forme des signaux n'est pas assez court pour pouvoir enregistrer le γ-flash puis un événement γ provenant d'une réaction (n,xn γ). La première étape du projet a donc été de tester différentes électroniques digitales permettant ce traitement rapide des signaux. Ce travail a fait l'objet de la thèse de Strahinja Lukic soutenue en 2004 [96]. Après avoir testé des cartes d'acquisition digitale provenant "du commerce", nous avons, avec l'aide du service électronique de l'IPHC (IReS à l'époque), contribué au développement de la première génération des cartes d'acquisition digitale TNT spécialement adaptées au détecteur Germanium. En effet leur large dynamique (14 bits) permet d'obtenir une excellente résolution en énergie et la fréquence d'échantillonnage de 65 MHz nous permet d'atteindre une résolution en temps de 15 ns. De plus, le traitement en ligne des oscillogrammes a permis de réduire de façon significative la quantité de données à stocker qui s'avère importante dans ce type de mesure nécessitant des longs temps de faisceau. Ces développements nous ont donc permis de mesurer à GELINA les premières sections efficaces (n,xn γ) sur le plomb naturel à 200 m de la source de neutrons avec un détecteur Germanium de type "clover" (quatre détecteur Germanium co-axiaux). Parallèlement à ce travail auprès de GELINA, nous avons effectué la même démarche auprès du faisceau N-TOF du CERN. Malheureusement, aucune mesure n'a été possible car le détecteur Germanium était aveuglé par une très forte radiation qui saturait le signal comme le montre la Figure 2.9. Malgré nos efforts pour blinder le détecteur, l'éloigner du faisceau, utiliser un Germanium planaire moins sensible aux gammas de haute énergie, la saturation du signal était toujours présente. Nous en avons déduit que cette radiation devaient provenir

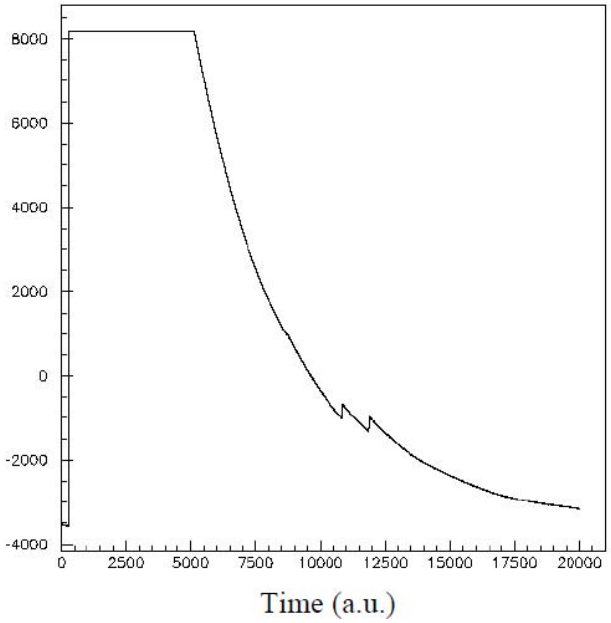


FIGURE 2.9: Exemple d'oscillogramme du signal à la sortie du pré-amplificateur enregistré lors de tests à n-TOF. La saturation correspond à une énergie d'environ 3.5 MeV et dure 75 μs.

de particules très pénétrantes. En extrapolant la décroissance du signal au temps t=0, l'énergie déposée dans le cristal de Germanium pouvait atteindre jusqu'à 150 MeV ce qui bloquait l'électronique pendant au moins une milliseconde. Un dernier test a été effectué en modifiant le pré-amplificateur pour permettre l'injection d'un courant inverse qui a réduit le temps de blocage à environ 20 μs. Malheureusement, ce temps était encore bien trop important pour pouvoir détecter les événements issus des réactions induites par des neutrons de 20 MeV qui arrivent sur la base de vol (185 m) après seulement 2.5 μs. En 2004, des transformations du blindage de la source de spallation ont permis d'améliorer encore la situation mais toujours pas au niveau de pouvoir détecter des gammas d'énergie de quelques centaines de keV avec une résolution de 1 keV et cela seulement 2.5μs après le γ-flash.

En plus des tests auprès des installations "temps de vol", nous avons également testé, à la même période, la méthode auprès du faisceau de neutrons quasi-monoénergétique du cyclotron de Louvain-la-Neuve qui délivre des neutrons d'énergie allant jusqu'à 65 MeV. L'application de la spectroscopie γ auprès de cette installation requiert une autre stratégie que celle adoptée auprès des installations "temps de vol" car, d'une part la fréquence du faisceau est très élevée (13.8 MHz) ce qui empêche de réduire le bruit de fond par

des sélections en temps sur les paquets de neutrons, et d'autre part, la base de vol étant très courte (3.28 m), les mesures de temps de vol ne sont pas possibles avec des détecteurs Germanium compte tenu de leur résolution en temps. Nous avons donc choisi, pour effectuer la mesure de la réaction (n,5n γ) sur le thorium 232, d'alterner les mesures avec faisceau et sans faisceau afin de pouvoir soustraire le bruit de fond provenant de la radioactivité et des produits de fission. Le flux de neutrons a été, quant à lui, mesuré précisément par nos collègues du PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) de Braunschweig (Allemagne) qui ont enregistré pour chaque énergie neutron, non seulement le nombre de neutrons mais également leur distribution en énergie. Cela nous a permis de déconvoluer les sections efficaces (n,5n γ) pour extraire les valeurs à 5 énergies neutrons entre 29 et 42 MeV. Les résultats de cette expérience ont été publiés dans la référence [97].

2.3 GRAPhEME à GELINA@EC-JRC-Geel

2.3.1 Dispositif GRAPhEME

Une fois la démonstration faite que nous pouvions utiliser la spectroscopie γ prompte à GELINA et pas à N-TOF, il nous fallait alors développer un instrument pour pouvoir utiliser cette méthode pour l'étude des réactions (n,xn) sur les actinides. L'emploi de cibles radioactives engendre nécessairement des contraintes expérimentales. La première de toute est incontestablement l'approvisionnement de la matière. Un compromis doit donc être trouvé entre la quantité maximum de matière (disponible et pour limiter le taux de radioactivité) et le nombre de neutrons incidents afin d'optimiser les temps de faisceau. Un des avantages de l'installation GELINA est la présence de différentes bases de vol allant de 10 m à 400 m. On peut donc adapter l'intensité des neutrons en choisissant une base de vol plus ou moins loin de la source de neutrons. Un autre critère très important est la résolution en énergie neutron nécessaire pour le type de réaction étudiée. Plus la base de vol sera longue et plus la résolution en énergie neutron sera importante. Compte tenu de tous ces critères et de la disponibilités des cabines à GELINA, nous avons choisi de développer notre instrument sur une base de vol à 30 m de la source de neutrons de GELINA. La résolution en énergie neutron obtenue avec notre dispositif à cette distance de la source est présentée sur la Figure 2.10. La gamme en temps des neutrons incidents

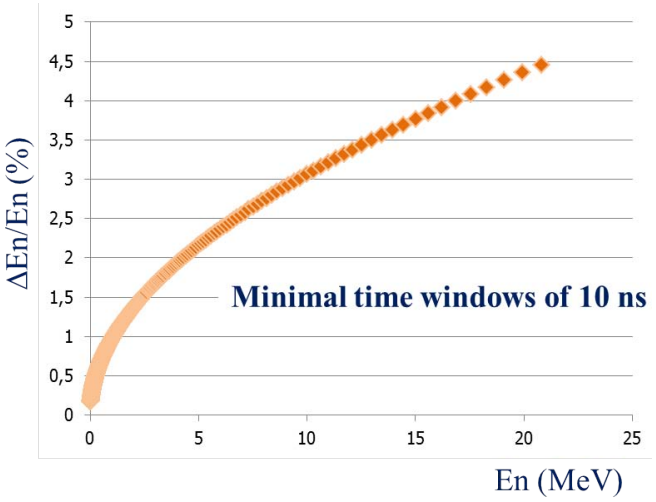


FIGURE 2.10: Evolution de la résolution en énergie neutron en fonction de l'énergie neutron à 30 m de la source de production.

s'étend alors de 473 ns pour les neutrons de 20 MeV jusqu'à 12 μs pour des neutrons de 30 keV. Durant les thèses d'Habib Karam [98] et de Jean Claude Thiry [99], nous avons développé, petit à petit, le système GRAPhEME dans le but de rendre possible la mesure des sections efficaces (n,xn γ) sur des noyaux très radioactifs. Cela a donc nécessité le développement d'un système d'acquisition adapté, la caractérisation précise des performances de nos détecteurs (Germanium et chambre à fission), le développement des méthodes d'analyse et la minimisation du bruit de fond. Cette optimisation a été réalisée lors de différentes campagnes de mesures avec des cibles d'isotopes stables de tungstène et avec des cibles d'actinides peu radioactifs (^{235}U, ^{238}U et ^{232}Th).

Le système d'acquisition digital

Le système d'acquisition digital TNT2 [100], développé à l'IPHC et spécialement dimensionné pour les études de spectroscopie γ, est couplé au dispositif GRAPhEME. L'amplitude des signaux est codée sur 14 bits avec une fréquence d'échantillonnage de 100 MHz ce qui permet d'atteindre une résolution en temps de 10 ns. Le traitement des oscillogrammes peut s'effectuer en ligne grâce au FPGA (Field Programmable Gate Array). Les signaux issus des détecteurs sont traités en parallèle dans une voie "temps" qui applique la méthode dite du CFD (Constant Fraction Discriminator) et une voie "énergie" qui applique la méthode de traitement du signal dite de Jordanov. La première permet la détermination du temps d'arrivée des événements dans le détecteur relativement au

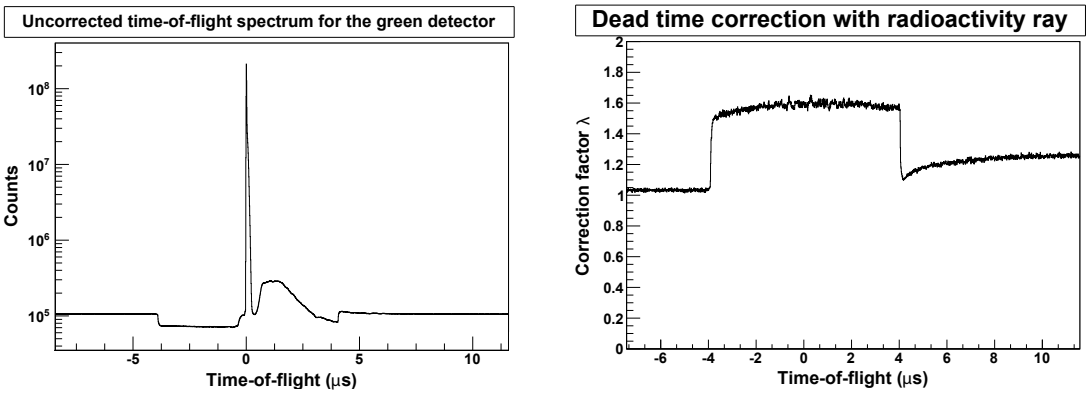


FIGURE 2.11: A gauche : Spectre temps de vol obtenu pour un détecteur Germanium où les événements "pile-up" ne sont pas considérés. A droite : le facteur de correction du temps mort et du "pile-up" en fonction du temps obtenu en suivant une raie de radioactivité.

signal de l'accélérateur et la seconde permet la détermination de l'énergie déposée par la particule. Un aspect important et qui doit être bien maîtrisé, est la connaissance du temps mort du système d'acquisition. Dans notre cas, on peut différencier deux types de temps mort. Le premier est dû aux événements qui arrivent dans un intervalle de temps très court et pour lequel la toute première étape de traitement (TFA) qui dure entre 0.3 et 0.4 μs, ne peut avoir lieu pour chacun. L'acquisition ne retourne alors qu'une seule information en temps. Un autre type de temps mort est dû à la méthode de traitement des signaux pour la détermination de l'information énergie. En effet, la construction du signal trapézoïdal dans la méthode de Jordanov nécessite quelques μs. Si un deuxième signal arrive pendant le traitement du trapèze, son temps d'arrivée est enregistré correctement mais l'énergie n'est pas correcte. L'événement est alors étiqueté par le système d'acquisition comme un événement pile-up. Ce taux de pile-up est donc facile à extraire et à corriger. En revanche, le temps mort de la voie temps doit être déterminé expérimentalement. L'utilisation de cible radioactive est alors un avantage car nous pouvons suivre une transition γ de radioactivité tout au long du temps et déterminer le facteur de correction à appliquer. Ceci est illustré dans la Figure 2.11 [99] sur le spectre de droite. Le spectre de gauche, quant à lui, correspond au temps de vol enregistré pour un détecteur Germanium. On y distingue le niveau de radioactivité constant avant l'arrivée des événements neutrons (bosse) eux mêmes précédés par le γ-flash (pic au temps 0). Et on voit clairement apparaître le temps mort introduit par le temps de traitement de l'énergie sur les événements empilés, pendant 4 μs avant et après, sur le γ-flash .

La caractérisation des détecteurs

La caractérisation des détecteurs utilisés est aussi une étape incontournable. Pour la chambre à fission, ces études et son optimisation ont été réalisées dans le cadre de la thèse de Jean Claude Thiry. La chambre à fission, qui est utilisée pour déterminer le nombre de neutrons incidents, est composée d'un dépôt d'$^{235}UF_4$ d'une densité surfacique de 0.324(2) mg/cm^2. Pour optimiser le fonctionnement de la chambre nous avons varié différents paramètres comme le volume actif et la polarisation, afin de permettre une bonne séparation des alphas et des produits de fission. Il a fallu ensuite estimer la perte des produits de fission dans le dépôt d'uranium ainsi que celle introduite par le seuil en énergie que nous appliquons pour séparer les alphas des produits de fission. Tout ce travail a été réalisé en combinant des mesures et des simulations utilisant le logiciel GEANT4 ce qui a permis d'estimer l'efficacité de la chambre à fission. Pour valider notre méthode, une mesure de l'efficacité a été réalisée auprès de l'accélérateur Van de Graaff et avec les instruments du PTB de Braunschweig.

Pour les détecteurs Germanium, nommés par une couleur dans GRAPhEME, le paramètre "clé" est leur efficacité de détection en fonction de l'énergie γ. Pour déterminer cette efficacité nous avons mis en œuvre une procédure robuste mêlant mesures en sources et simulations MCNPX. La géométrie de chaque détecteur HPGe est entrée dans une simulation MCNPX. Autant de détails que possible sont décrits dans le fichier pour tenir compte au mieux de toutes les absorptions dans le détecteur. L'émission γ de la source d'europium est simulée et les résultats sont comparés à la mesure. Il faut noter également que pour simuler l'extension spatiale du faisceau de neutrons ($\emptyset$= 5.5 cm), une source ponctuelle, placée à différents endroits de la cible, et une source étendue sont utilisées. La géométrie du cristal, sa distance à la fenêtre d'entrée et les zones mortes sont ainsi ajustées pour reproduire au mieux les résultats expérimentaux. Une fois le rapport C/E (nombre de gamma simulés -C- sur le nombre de gamma détectés -E- pour une transition donnée) ajusté à 1, sur toute la plage en énergie, la géométrie du détecteur est alors considérée comme validée et les efficacités peuvent être déterminées à quelques pourcents près. Cette procédure est illustrée dans la Figure 2.12 où le rapport C/E obtenu (gauche) pour un détecteur après optimisation de la géométrie (droite) est présenté. Les efficacités sont ensuite calculées pour chaque transition γ d'intérêt en prenant en compte l'absorption des gammas dans la cible.

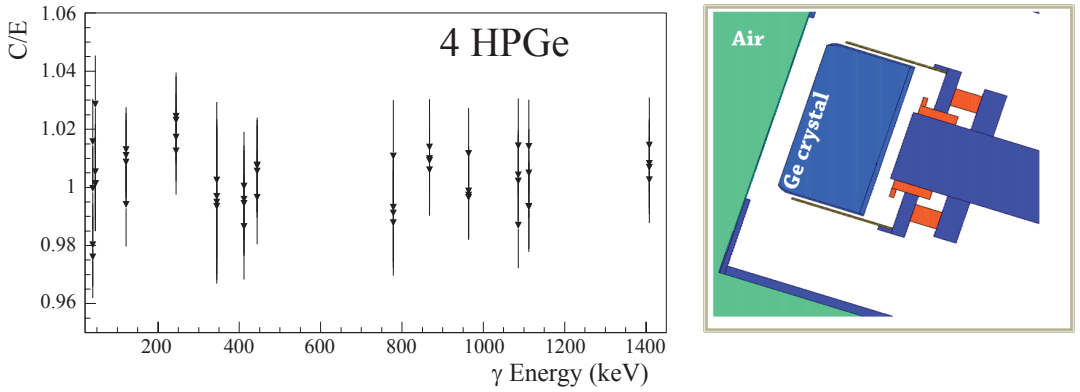


FIGURE 2.12: Rapport C/E (gauche) obtenu pour un détecteur après optimisation de sa géométrie (droite).

La minimisation du bruit de fond

Dans toute expérience, la minimisation du bruit de fond est aussi un enjeu crucial. Sur cet aspect, nous avons travaillé à améliorer les conditions de mesures dans la cabine du FP16/30 m. Bien entendu pour pouvoir effectuer une séparation et une identification fine des transitions γ dans les distributions en énergie et extraire le plus précisément possible leur nombre de coups associé, le bruit de fond doit être le plus faible possible. De plus, à courte base de vol, la séparation entre les événements γ-flash et les neutrons les plus rapides (20 MeV) doit être la meilleure possible pour effectuer une sélection non contaminée des événements neutrons de haute énergie. La Figure 2.13 illustre l'environnement de notre aire expérimentale FP16/30 m et les spectres en énergie et en temps pour un détecteur Germanium obtenus avant la réduction du bruit de fond. On constate la présence d'un bruit de fond à basse énergie γ dans la distribution en énergie et un recouvrement entre les événements γ-flash et neutrons dans le spectre en temps. La fermeture de la base de vol 12, pourtant à l'opposé de la base de vol 16, permet de réduire immédiatement le bruit de fond γ dans les spectres temps et énergie comme il est montré sur la Figure 2.14. Le blindage du "nez" du détecteur (avec un cristal BGO par exemple) permet de réduire ce bruit de fond même pendant l'ouverture de la base de vol 12. Nous avons donc mis en œuvre un château de plomb entourant les "nez" de tous les détecteurs afin de les protéger de ce fond extérieur. Les spectres ainsi obtenus sont montrés sur la Figure 2.15 [99].

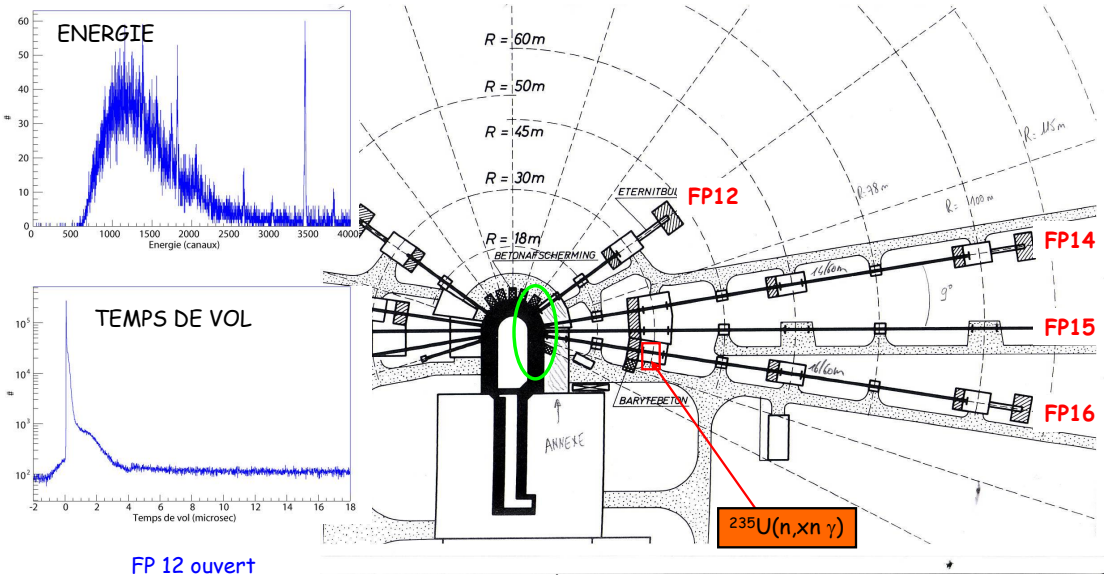


FIGURE 2.13: Environnement de notre aire expérimentale FP16/30 m et les spectres en énergie et en temps pour un détecteur Germanium obtenus avant la réduction du bruit de fond.

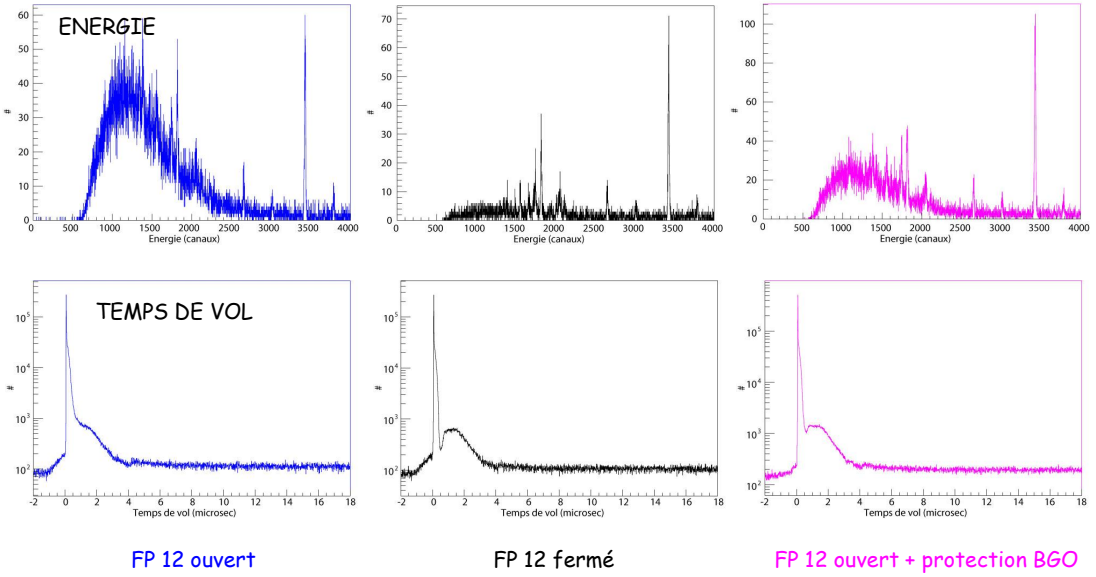


FIGURE 2.14: Mise en évidence de l'influence de l'environnement des autres bases de vol sur notre aire expérimentale (FP16/30 m) et de l'effet de protection d'un cristal BGO entourant le cristal de Germanium.

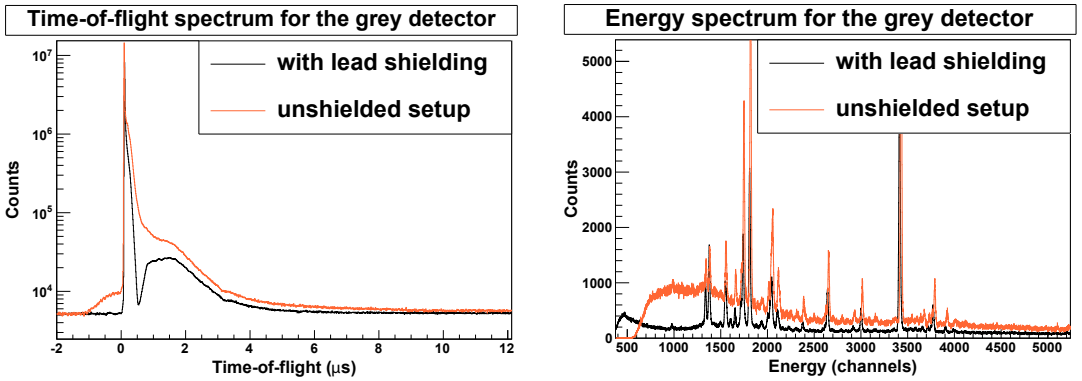


FIGURE 2.15: Distribution en temps (droite) et énergie (gauche) des *gamma* détectés par un détecteur Germanium avant et après l'installation du blindage en plomb.

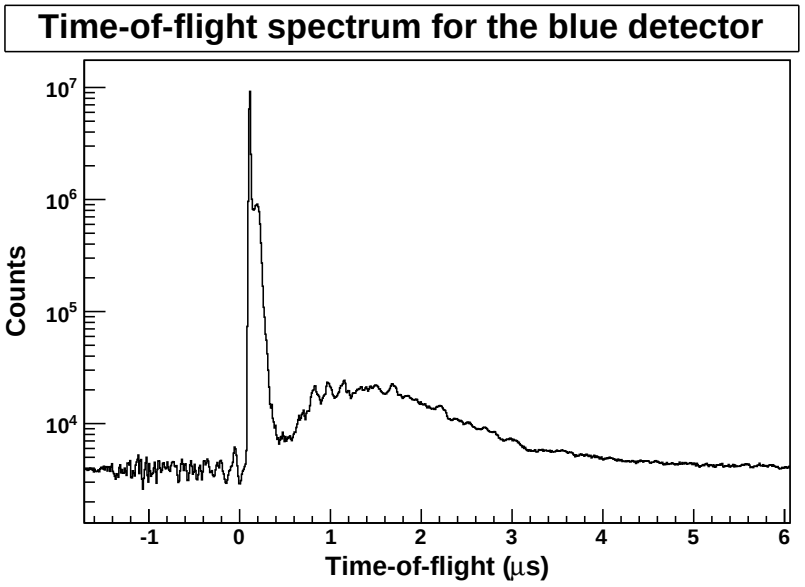


FIGURE 2.16: Distribution en temps d'un détecteur Germanium affectée par des oscillations dues au rayonnement électromagnétique généré par les klystrons de GELINA.

Un autre effet contre lequel nous avons dû nous protéger était les rayonnements électromagnétiques générés par les klystrons de l'accélérateur qui induisaient des interférences dans les spectres en temps des détecteurs comme l'illustre la Figure 2.16 [99] où l'on voit clairement des oscillations apparaître sur la distribution en temps d'un détecteur Germanium. La solution à ce problème a été la mise à la masse de façon méticuleuse du dispositif GRAPhEME. Il faut cependant noter que malgré cela, certains compteurs sont restés sensibles à des effets intermittents que nous n'avons pu résoudre.

Après 4 ans de construction et d'optimisation de GRAPhEME, nous avons pu, en 2009,

TABLE 2.2: Campagnes expérimentales pour chaque isotope entre 2009 et 2014, statut et référence associée.

années	**isotopes**
2009-2010	^{235}U [94]
2009 ;2010 ;2013	^{232}Th (analyse en cours) [101]
2009-2014	^{nat,182,183,184,186}W (analyse en cours) [102]
2010-2013	^{238}U (analyse en cours) [103]

lancer les premières campagnes de mesures sur des actinides peu actifs et des isotopes de tungstène. Ces campagnes sont résumées dans le tableau 2.2.

L'histoire de GRAPhEME en image

Les 6 figures (2.17, 2.18, 2.19, 2.20, 2.21, 2.22) qui suivent retracent l'histoire du montage et de l'évolution de GRAPhEME de 2005 à 2016. On y voit, entre autres, les tout premiers tests avec un seul compteur Germanium, la chambre à fission et deux cartes d'acquisition TNT. Au fil des ans, GRAPhEME s'est enrichi de nouveaux détecteurs Germanium financés quasi principalement par le GDR GEDEPEON. En 2008-2009, le château de plomb est monté et le travail sur la compatibilité électromagnétique est réalisé. En 2011, le support mécanique est agrémenté d'un support supérieur pour permettre l'accueil de nouveaux détecteurs HPGe ainsi que du détecteur segmenté (cf. chapitre 4) qui sera installé en 2014 avec "l'upgrade" de l'acquisition TNT2. Enfin, en 2015 et 2016, les travaux de rénovation des bases de vol sud de GELINA ont nécessité le démontage/déplacement/stockage et remontage de GRAPhEME. Tout au long de cet "album photos" apparaissent les différents acteurs, collègues, étudiants et post-doc, qui ont contribué à la mise au point de notre dispositif expérimental.

2.3.2 Analyse de données

Dans cette partie, je précise les principales étapes de l'analyse de données en m'attachant à mettre en avant les performances de notre méthode et en discutant également les difficultés auxquelles nous devons faire face. Les détails de l'analyse se trouvent dans la thèse de J.C. Thiry [99] et dans les références [94] et [46]. La première étape de l'analyse est la sélection des lots de données utilisables pour constituer des distributions en temps et en énergie de qualité suffisante pour être exploitable. Cela est d'autant plus crucial dans le



FIGURE 2.17: Histoire de GRAPhEME, 2005-2006.



FIGURE 2.18: Histoire de GRAPhEME, 2006-2007.



FIGURE 2.19: Histoire de GRAPhEME, 2007-2009.

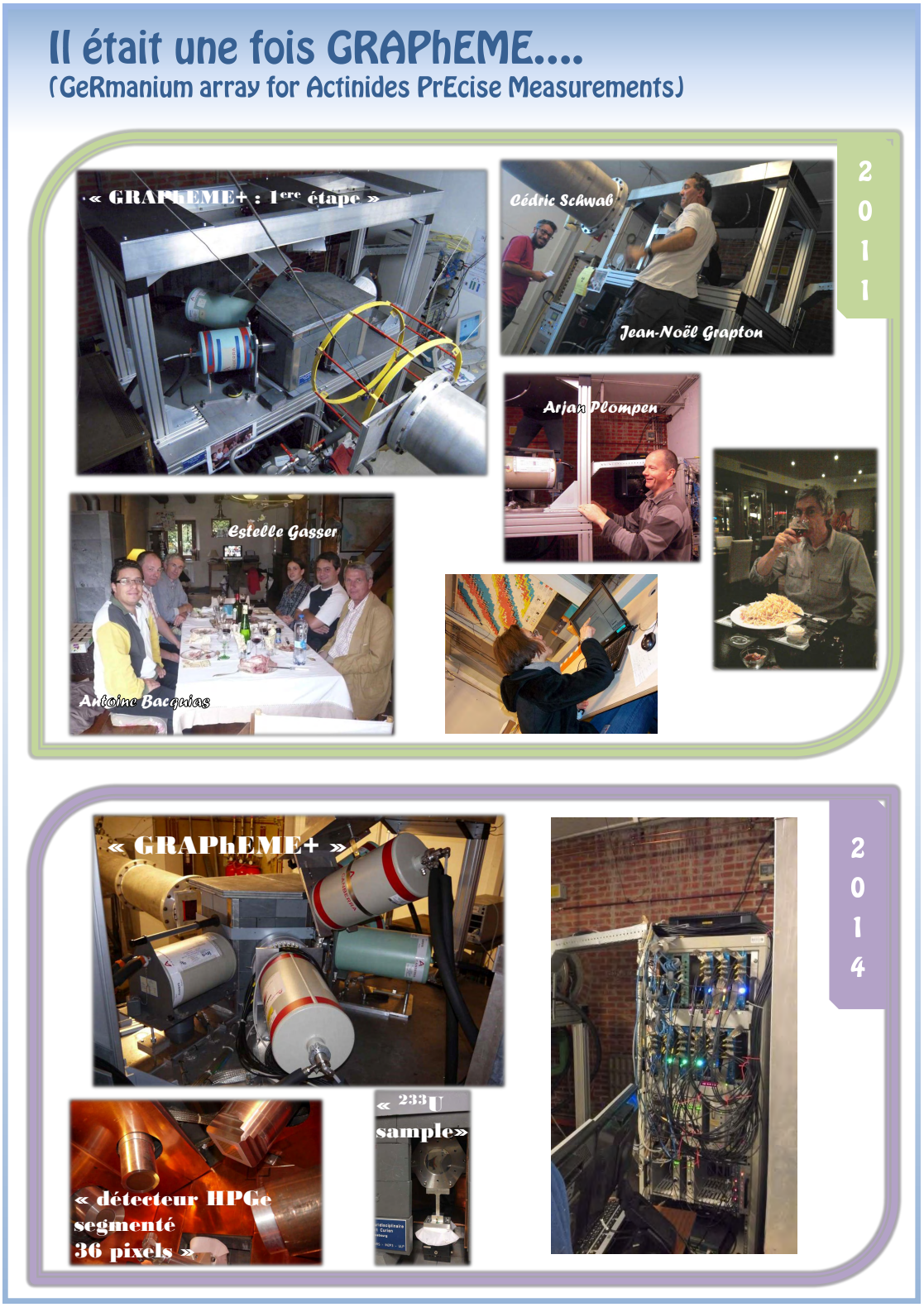


FIGURE 2.20: Histoire de GRAPhEME, 2011-2014.



FIGURE 2.21: Histoire de GRAPhEME, 2015-2016.



FIGURE 2.22: Histoire de GRAPhEME, 2016.

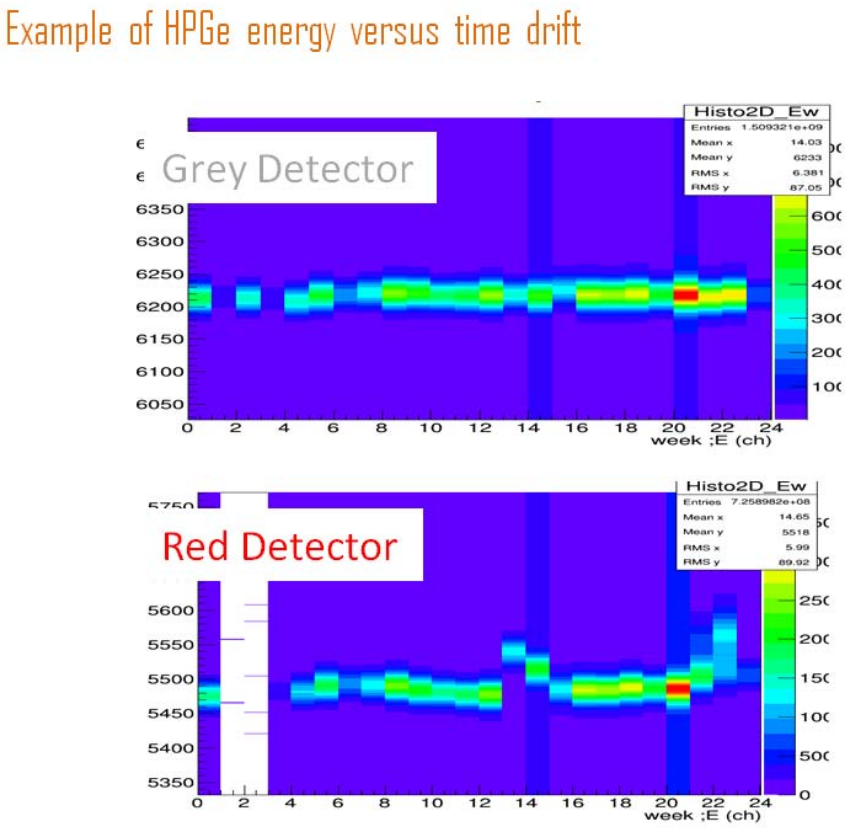


FIGURE 2.23: Suivi de la position (en canal) du pic à 511 keV en fonction des semaines de prise de données pour le détecteur gris et rouge.

cas de longue campagne de mesure telle que celle réalisée sur ^{238}U où presque 3000 h de faisceau ont été délivrées en différentes périodes sur 4 ans. Une vérification scrupuleuse de la stabilité des données doit alors être effectuée avant de sommer les lots, afin de les corriger ou de rejeter ceux jugés inutilisables. Cette vérification concerne la stabilité des gains et des résolutions en énergie et en temps pour les détecteurs Germanium et chambre à fission. Pour illustrer cette étape de vérification, deux figures sont présentées concernant la stabilité du gain en énergie (Fig. 2.23 et 2.24). Sur la Figure 2.23 où la position du pic à 511 keV est suivie au cours du temps de prise de données, on voit apparaître des changements de positions du pic pour les deux détecteurs considérés. Si la dérive du gain n'entraine pas de perte de résolution, comme pour le détecteur GRIS sur la Figure 2.23, les données brutes peuvent être corrigées en les calibrant sur un lot de référence. En revanche si la résolution est dégradée, comme dans le cas du détecteur BLEU présenté sur la Figure 2.24, le lot est alors inutilisable et ne peut pas être sommé aux autres. Ce travail de sélection est donc indispensable et peut amener à rejeter un

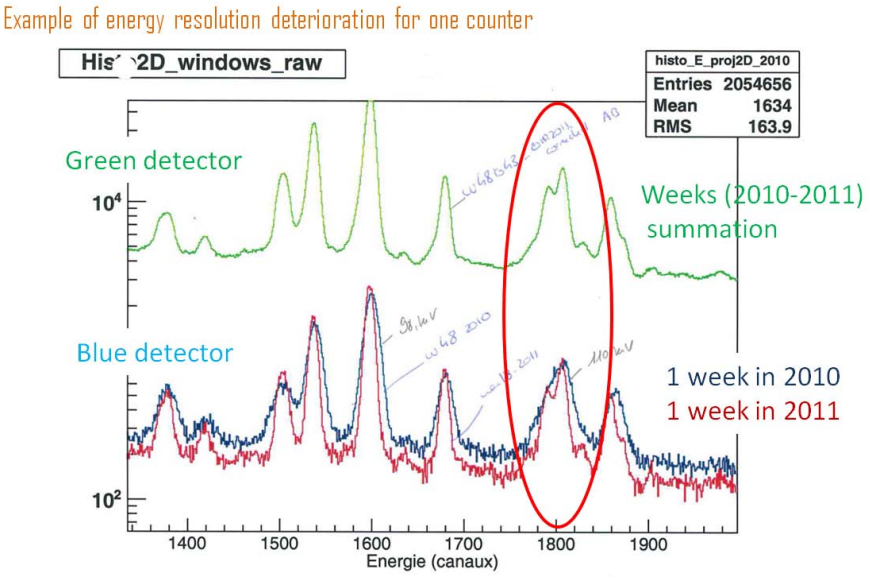


FIGURE 2.24: Portion des distributions en énergie γ pour le détecteur VERT (ligne verte) pour un lot de plusieurs semaines sommées et pour le détecteur BLEU pour deux semaines distinctes de 2010 (ligne bleue) et de 2011 (ligne rouge). On voit la perte de résolution sur le lot de 2010, particulièrement visible pour les pics présents autour du canal 1800.

nombre non négligeable d'heures de faisceau si un détecteur a des problèmes de stabilité. Par exemple pour la mesure sur ^{238}U, la statistique accumulée sur les détecteurs BLEU et ROUGE est respectivement de 33% et 55% par rapport à celle des détecteurs VERT et GRIS qui ont montré une très bonne stabilité.

Une fois la sélection des données brutes réalisées, et comme mentionné dans la section 2.2.2, l'information de base donnée par GRAPhEME est constituée des distributions en temps et en énergie des γ émis par la cible et des produits de fission créés dans la chambre à fission. A partir de la sélection des produits de fission, la connaissance précise de la section efficace ^{235}U(n,f) qui est un standard [104], nous permet de déterminer le flux de neutrons disponible (fig. 2.25 [94]) dans l'aire expérimentale FP16/30 m. A partir des spectres bi-dimensionnels (temps - énergie) des événements γ, les distributions en énergie sont constituées pour différentes fenêtres en temps afin de décrire la dynamique en énergie de la réaction. Un exemple de distribution est donné dans la Figure 2.26 qui présente les distributions en énergie obtenues pour trois fenêtres en temps lors de la campagne de mesure sur ^{235}U. Une première fenêtre concerne les énergies de 1 à 6 MeV (processus (n,n') dominant), une deuxième concerne les énergies de 6 à 20 MeV (processus

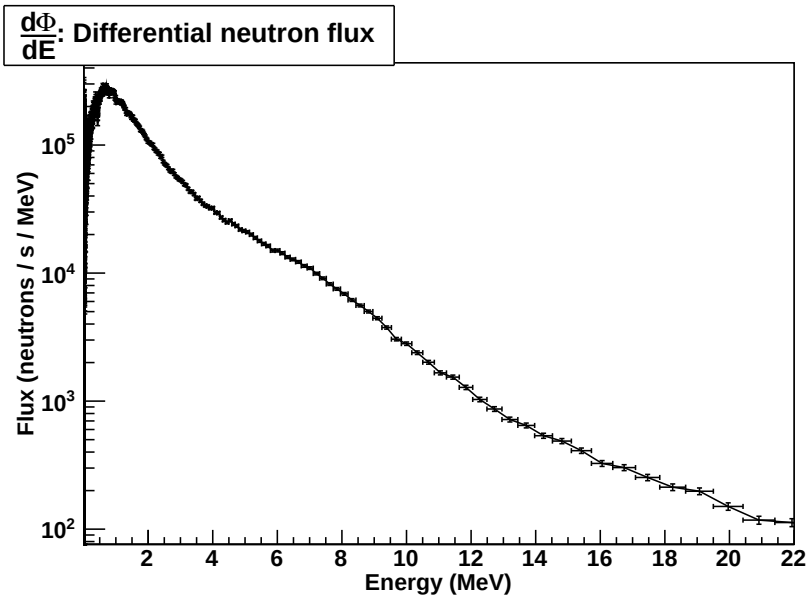


FIGURE 2.25: Flux de neutrons différentiel mesuré avec GRAPhEME dans l'aire expérimentale FP16/30 m de GELINA.

(n,2n) dominant) et enfin une troisième correspond aux événements de radioactivité (en dehors des bouffées de neutrons). Une fois les distributions en énergie déterminées, la phase d'identification des pics peut commencer. Dans le cas de noyaux radioactifs qui présentent une forte section efficace de fission, cette identification peut être délicate car les nombreux γ issus de la désexcitation des produits de fission peuvent se "mélanger" à ceux émis lors des réactions (n,xn) d'intérêt. Cela a été notamment le cas lors de la mesure sur l'^{235}U où la combinaison de cet effet avec la "dilution" de la cascade γ émise par l'^{235}U excité (structure d'un noyau impair), ne nous a pas permis d'extraire des sections efficaces pour plus d'une transition γ [94].

Un dernier effet "intrinsèque", lié au système d'acquisition de GRAPhEME, pénalise notre méthode. Il s'agit de la non-linéarité de la réponse en temps du CFD en fonction de l'énergie détectée. Ceci est illustré sur la Figure 2.27 qui est la représentation bi-dimensionnelle de l'énergie γ en fonction du temps de détection. La ligne rouge verticale correspond aux événements du γ-flash et l'on voit que pour les faibles énergies la ligne s'écarte de la verticale. Cela introduit un biais dans la mesure du temps et donc dans la détermination de l'énergie incidente des neutrons. Pratiquement, les événements sont alors affectés à des énergies neutrons plus basses que celles qui les ont réellement créés. L'intensité et la plage en énergie de cet effet sont variables selon les détecteurs et la correction doit donc être définie et appliquée individuellement à chaque détecteur. Cet

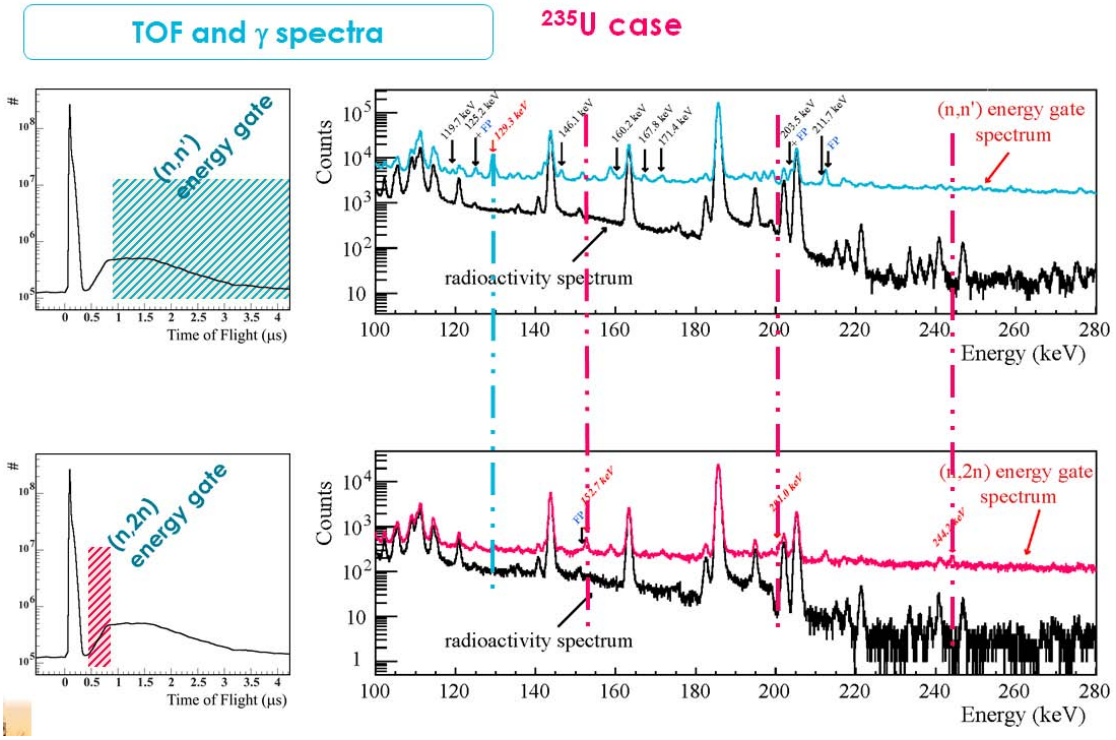


FIGURE 2.26: Illustration de la génération des distributions en énergie γ (spectres de droite) à partir des fenêtres en temps appliquées sur la distribution en temps (spectres de gauche) obtenues pour les données de l'^{235}U.

effet devient doublement pénalisant, dans le cas des mesures sur des actinides, car il affecte alors les transitions à faible énergie provenant de la décroissance du premier état excité, état qui emporte une large part de la section efficace inélastique totale dans les isotopes pairs comme l'uranium 238. Ces transitions γ sont déjà difficiles à extraire compte tenu du fort taux de conversion interne (~600 dans le cas du 45 keV de l'uranium 238) et de leur présence sur un endroit du spectre où le bruit de fond est aussi important (cf. Figure 2.28) - dû aux diffusions (n,n') sur le Ge - et sont alors, en plus, affectées d'une correction qui augmentera l'imprécision de notre mesure.

2.4 Conclusion

Afin de répondre aux besoins d'amélioration de la connaissance des sections efficaces (n,xn), nous avons développé l'instrument GRAPhEME pour mesurer, par la méthode de la spectroscopie γ-prompte, les sections efficaces de réactions (n,xn γ) auprès du faisceau de neutrons blanc du EC-JRC-GELINA. Nous avons travaillé pour caractériser précisément notre dispositif ce qui nous permet de produire des sections efficaces avec

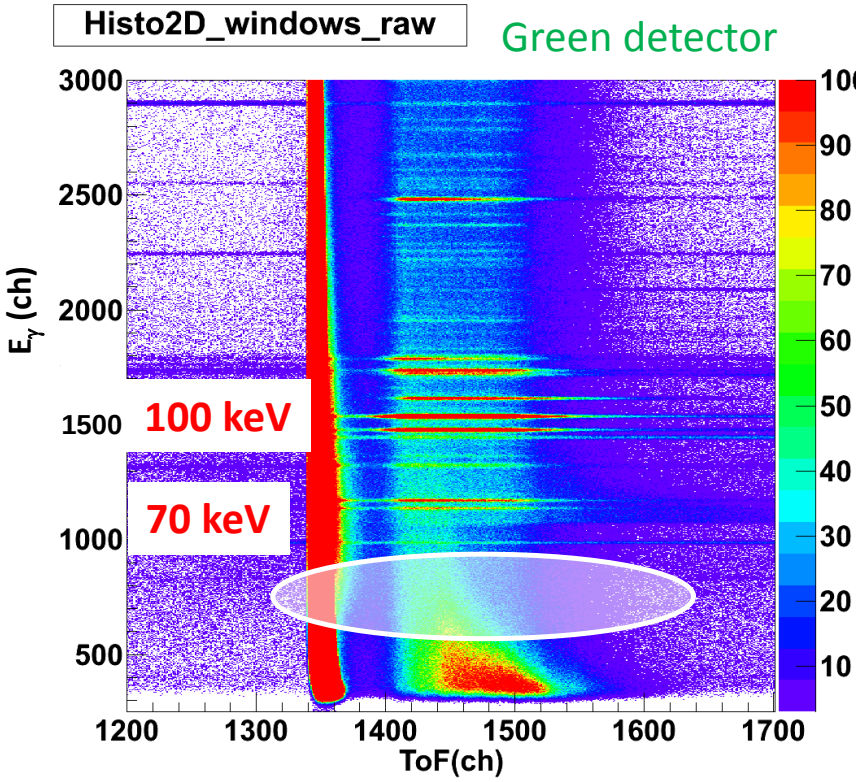


FIGURE 2.27: Spectre bi-dimensionnel de l'énergie γ en fonction du temps de détection pour le détecteur vert obtenu avec la cible d'^{238}U. On voit clairement la contribution de γ-flash et les différentes transitions γ.

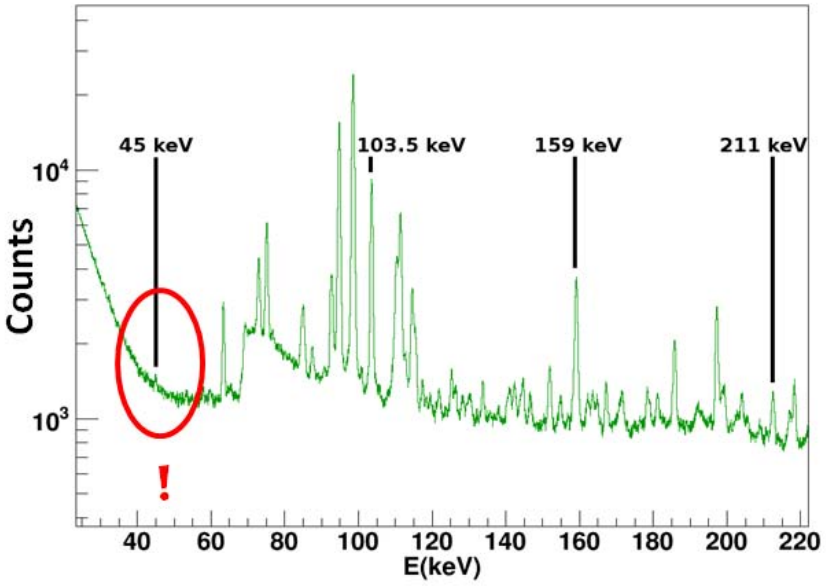


FIGURE 2.28: Portion de la distribution en énergie-γ, dans le cas de la réaction ^{238}U(n,n'), centrée sur les faibles énergies. On voit apparaître faiblement la transition à 45 keV (2^+-0^+) par rapport aux transitions provenant des niveaux supérieurs de la bande du fondamental.

une précision allant de 3-4% (au maximum des sections efficaces et du flux de neutrons, c'est à dire autour de 1 à 2 MeV) à une vingtaine de % dans les conditions les moins favorables. Notre limite de détection se situe actuellement autour de quelques mb. Dans cette partie, j'ai décrit uniquement les développements instrumentaux de GRAPhEME relatifs aux mesures sur des actinides peu actifs. La deuxième phase du développement de GRAPhEME concerne son adaptation à la mesure des réactions (n,xn γ) sur des actinides très actifs, projet initial lancé par G.Rudolf en 1999. Cet aspect sera développé plus en détail dans le dernier chapitre consacré aux perspectives. Cependant, à partir des sections efficaces (n,xn γ) mesurées par GRAPhEME sur des noyaux peu actifs ou stables, l'enjeu est ensuite de déduire les sections efficaces (n,xn) totales en atteignant les précisions cibles demandées par les applications. Cet aspect et les développements qu'il engendre sont discutés dans le chapitre suivant.

Chapitre 3

Des sections efficaces (n,xn γ) aux sections efficaces (n,xn)

Comme cela a été expliqué dans le chapitre précédent, la méthode de la spectroscopie γ-prompte est une méthode indirecte permettant de déduire les sections efficaces de réactions (n,xn). A partir des sections efficaces (n,xn γ) mesurées, deux stratégies sont alors possibles pour calculer les sections efficaces totales, mais quelle que soit celle choisie, elle requiert au moins de connaître la structure du noyau étudié. Dans la pratique, le recours aux codes de réactions nucléaires pour extraire les sections efficaces totales sur toute la plage en énergie de la réaction est obligatoire. Selon la structure du noyau étudié, la composante théorique dans le calcul de la section efficace totale sera plus ou moins importante par rapport à la composante expérimentale. Ce chapitre est donc consacré aux enjeux théoriques de la méthode du point de vue de l'expérimentateur qui cherche à produire une section efficace de réaction (n,xn) la plus précise possible à partir de ses mesures (n,xn γ). Cette question a notamment été discutée lors du "covariance workshop" 2017 et publiée sous la référence [105].

3.1 Déduire les sections efficaces (n,xn)

Le schéma de la Figure 3.1 résume les deux stratégies pouvant être appliquées pour calculer les sections efficaces totales (n,xn) à partir des sections efficaces (n,xn γ) mesurées. La première, correspondant au cercle intérieur de la Figure 3.1, permet de combiner les

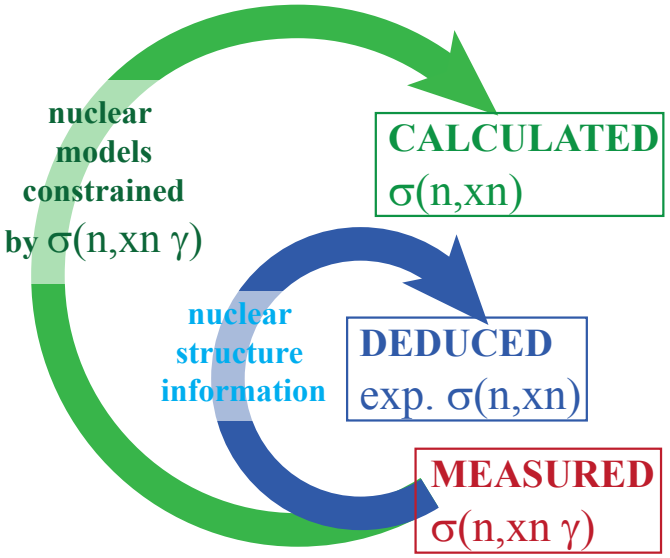


FIGURE 3.1: Schéma des deux stratégies possibles pour déduire les sections efficaces (n,xn) totales des sections efficaces (n,xn γ) mesurées.

sections efficaces des transitions-γ suivant le schéma de niveau du noyau considéré et en corrigeant si besoin de la partie décroissance en conversion électronique interne. En effet [93], la section efficace (n,xn) σ_{nxn} est la somme des sections efficaces de production $\sigma_{nxn,L_i(E)}$ des niveaux individuels L_i suivant l'équation 3.1 :

$$\sigma_{nxn}(E) = \sum_{i=1}^{E_x(L_i)\leq E'} \sigma_{nxn,L_i(E)} \tag{3.1}$$

où E_x est l'énergie d'excitation du niveau L_i et E est l'énergie du neutron incident dans le centre de masse et $E' = E - S_xn$, S_xn étant l'énergie de séparation de x neutrons. Comme la section efficace de production d'un niveau peut aussi être exprimée en fonction des sections efficaces des transitions γ, $\sigma_{nxn,\gamma}(E, L_i \rightarrow L_{k_i})$ du niveau L_i vers le niveau L_{k_i}, alors σ_{nxn} peut être exprimée de la façon suivante :

$$\sigma_{nxn}(E) = \sum_{i=1}^{E_x(L_i)\leq E'} \sigma_{nxn,\gamma}(E, L_i \rightarrow L_{k_i}) \frac{p(L_i \rightarrow g.s.)}{p_\gamma(L_i \rightarrow L_{k_i})} \tag{3.2}$$

où p et p_γ sont respectivement les probabilités totale (décroissance γ et conversion interne) et d'émission γ pour une transition d'un niveau L_i à L_{k_i}. g.s. est l'état fondamental. Cette méthode permet de déduire la section efficace totale à partir de la connaissance expérimentale d'au moins une transition γ par niveau d'excitation. Dans cette approche,

la section efficace totale déduite sera toujours une limite inférieure dans le cas des réactions (n,xn) puisque la production du noyau dans son état fondamental ne peut être mesurée. Cet effet sera essentiellement sensible près du seuil de la réaction. Dans le cas de la diffusion inélastique, la section efficace totale déduite est exacte jusqu'à une certaine énergie neutron incidente correspondante à l'énergie du dernier niveau excité qui décroit vers le niveau fondamental et dont on ne peut mesurer la désexcitation. Cette méthode est employée couramment pour les données acquises avec le spectromètre GAINS par nos collègues Belges et Roumains sur de nombreux isotopes : ^{23}Na [106], ^{24}Mg [107], ^{28}Si [108], ^{52}Cr [109], ^{56}Fe [110], ^{76}Ge [111], ^{208}Pb [112] et ^{209}Bi [113]. Dans ces mesures, les sections efficaces inélastiques totales déduites sont exactes jusqu'à des énergies allant de ∼2.2 MeV (^{76}Ge) à ∼7.7 MeV (^{24}Mg) ce qui couvre une plage non négligeable de la fonction d'excitation. Pour les mesures sur les actinides, la situation est bien différente car le schéma de niveau de ces noyaux est plus compact et l'énergie maximum pour laquelle la section efficace inélastique peut être considérée comme exacte ne dépasse pas 1 à 2 MeV. Il est alors intéressant de recourir à la seconde méthode qui correspond au cercle extérieur de la Figure 3.1, pour déterminer la section efficace totale à partir des sections efficaces partielles. Cette approche fait intervenir les codes de réactions nucléaires pour calculer la section efficace totale (n,xn). Une fois les modèles ou leurs paramètres libres ajustés de telle sorte que les sections efficaces (n,xn γ) calculées par le code présentent le meilleur accord possible avec les données mesurées, la section efficace (n,xn) produite par le code peut être alors considérée comme fiable. Cette méthode est d'ailleurs la seule alternative dans certains cas, comme celui des actinides pairs-pairs, où la décroissance du premier niveau excité est difficilement mesurable (faible énergie γ et haut taux de conversion interne) alors qu'elle emporte une large part de la section efficace comme cela est montré sur la Figure 3.2 dans le cas de l'^{238}U. Les sections efficaces (n,xn γ) deviennent alors de sévères contraintes pour les codes de réaction nucléaire puisque ces observables exclusives nécessitent, pour être bien décrites, de maîtriser non seulement les aspects de mécanismes de réaction mais également les paramètres de structure. Dans le cas de noyaux fissibles, la description de la fission doit être également maîtrisée. Cette approche a déjà été employée sur les données acquises avec le détecteur GEANIE à WNR, par exemple sur l'aluminium 27 [80], les plomb 207 et 208 [79] ou l'uranium 238 [86] en combinaison avec le code GNASH [114]. Dans ces études, les prédictions des différents modèles constituant le code étaient testées sur les sections efficaces partielles (n,x γ) et la section efficace totale était ensuite déduite.

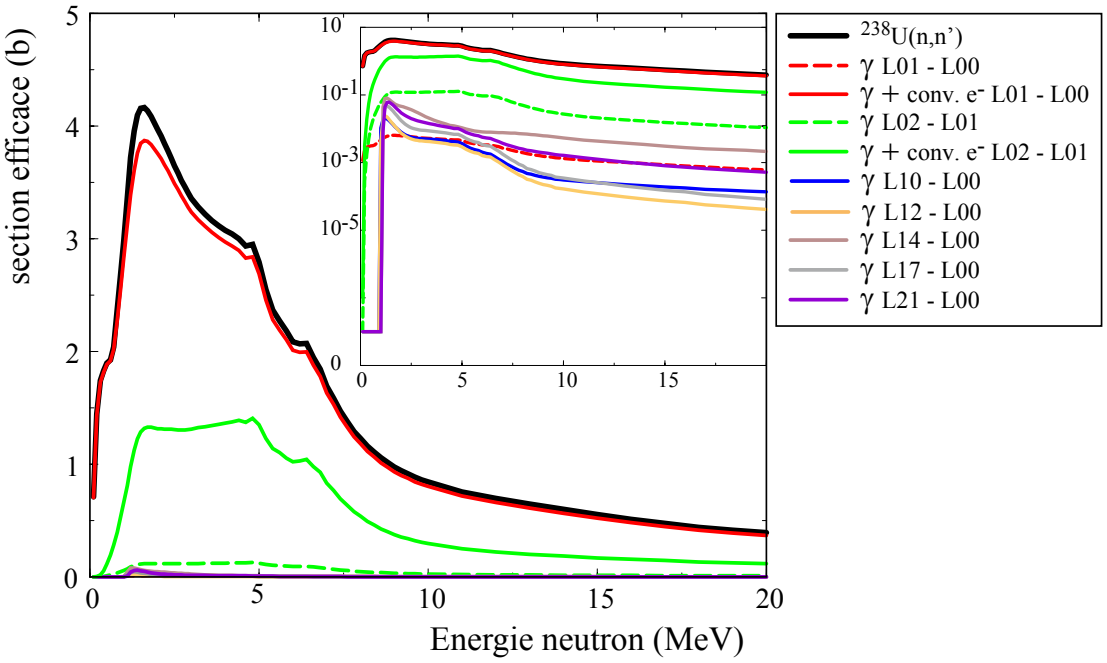


FIGURE 3.2: Section efficace totale ^{238}U(n,n') comparée aux contributions des sections efficaces ^{238}U(n,n' γ) pour les transitions γ rejoignant le fondamental et la transition entre le deuxième et premier niveau. La correction de conversion interne est appliquée pour les transitions entre le premier niveau et le fondamental et le deuxième et le premier niveau. L'insert représente une vue logarithmique. Calculs réalisés avec le code de réaction nucléaire TALYS 1.8.

GRAPhEME produit des mesures principalement sur les actinides, le recours aux codes de réaction nucléaire est alors quasiment inévitable pour produire les sections efficaces (n,xn) totales. La partie suivante du chapitre est donc consacrée à la description des modèles mis en jeu pour prédire les sections efficaces (n,xn γ) ainsi que nos travaux communs avec les théoriciens pour faire progresser le pouvoir prédictif des codes.

3.2 Les codes de réactions nucléaires

Un code de réaction nucléaire est un ensemble de programmes faisant appel à des librairies de paramètres permettant de simuler l'interaction de particules avec un noyau. Ces codes sont développés pour venir en support des mesures de données nucléaires, que ce soit pour la compréhension des processus fondamentaux, l'évaluation où la production de données nucléaires lorsque les données expérimentales n'existent ou ne suffisent pas. Différents modèles théoriques sont inclus dans les programmes pour constituer un outil polyvalent pour la modélisation des réactions nucléaires. Les premiers codes de réaction

nucléaire sont apparus dans les années 70 aux États-Unis. Le tout premier fut le code ALICE développé par M. Blann au Lawrence Livermore National Laboratory [115]. Puis P.G. Young, E.D. Arthur et M.B. Chadwick ont développé le code GNASH [114] qui a été largement utilisé par la communauté des physiciens nucléaires. Aujourd'hui, les codes sont développés de façon libre et pour être facilement utilisables par tout un chacun. Les deux codes majeurs actuellement sont les codes EMPIRE [116], développé initialement par M. Herman du Brookhaven National Laboratory en 1980, et TALYS [117] développé initialement par A. Koning, S. Hilaire et M. Duijvestijn à partir de 1998, dans le cadre d'une collaboration entre le NRG Petten et le CEA. Ils peuvent être utilisés pour simuler les réactions entre des particules légères (n, p, d, t, ^{3}He, ^{4}He, γ) et même des ions lourds pour EMPIRE avec une large gamme de noyaux ($3 \leq Z \leq 110$; $5 \leq A \leq 339$ pour TALYS). L'énergie du projectile peut aller du keV à plusieurs centaines de MeV. De nombreuses observables peuvent être calculées comme les sections efficaces de réaction, totale et de tous les processus dont les voies sont ouvertes (élastique, fission, inélastique, (n,xn), ...). Les distributions angulaires, les spectres de particules légères émises, les sections efficaces différentielles et doublement différentielles, la production de gamma discrète et continue, etc, sont des données de sortie possibles des codes. Pour un physicien nucléaire expérimentateur, ces codes, via leur accessibilité, sont des outils indispensables pour pouvoir préparer leurs expériences et discuter l'interprétation des données mesurées par rapport aux prédictions des modèles.

Structure générale des codes de réactions nucléaires

Avant de revenir sur l'apport des codes de réactions nucléaires dans la détermination des sections efficaces (n,xn) totales à partir des sections efficaces partielles (n,xn γ), je présente ici, de façon synthétique, la structure générale de ces codes ainsi que les modèles théoriques sur lesquels ils s'appuient. Pour cela, je m'inspire largement des présentations de nos collègues théoriciens de la DAM avec qui nous collaborons. Le schéma de la Figure 3.3, emprunté à Marc Dupuis (CEA/DAM), résume les différents processus qui sous tendent les réactions nucléaires et leur contribution dans le spectre des particules émises. Dans ce spectre (cf. Figure 3.4, E. Bauge, [2]), on peut voir apparaître trois zones (haute et basse énergie et énergie intermédiaire) qui correspondent à trois mécanismes de réaction. Les particules émises avec une haute énergie proviennent des processus directs et forment une zone avec des pics. Ils concernent la diffusion élastique (correspondant

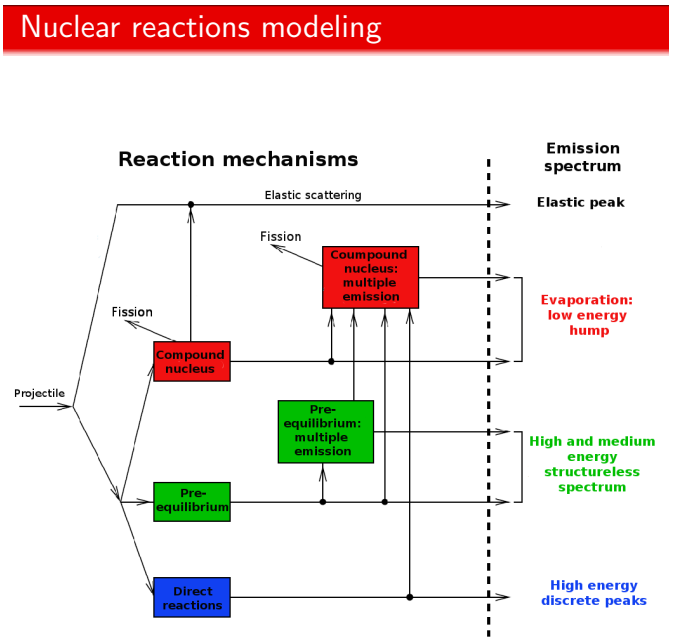


FIGURE 3.3: Schéma de la modélisation des réactions nucléaires.

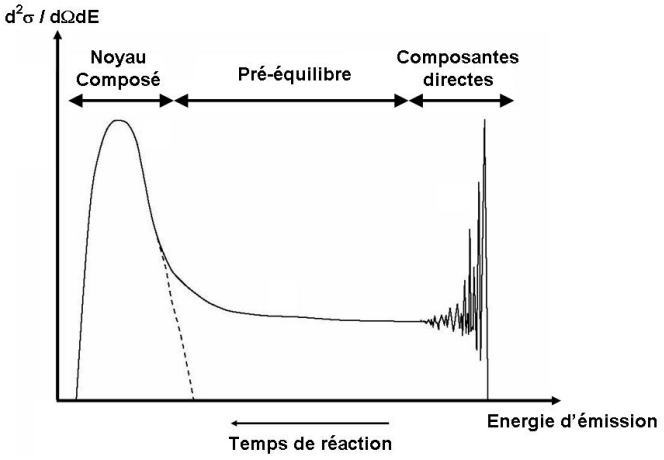


FIGURE 3.4: Spectre caractéristique de l'émission d'un neutron dans le domaine en énergie du continu.

au pic le plus énergétique) et la diffusion sur les états d'excitation de basse énergie du noyau cible (pics inélastiques). Ces deux composantes, essentiellement produites par les processus directs, sont modélisées par le modèle optique. A basse énergie, la composante en forme de maxwellienne correspond à la décroissance du noyau composé qui est un processus d'émission statistique. Enfin, la zone intermédiaire correspond à une émission dite de pré-équilibre. Pour modéliser la réaction dans son ensemble, les différents modèles doivent être enchainés dans le temps et les modèles décrivant les processus d'émission les plus rapides (émettant les particules les plus énergétiques) déterminent alors les états

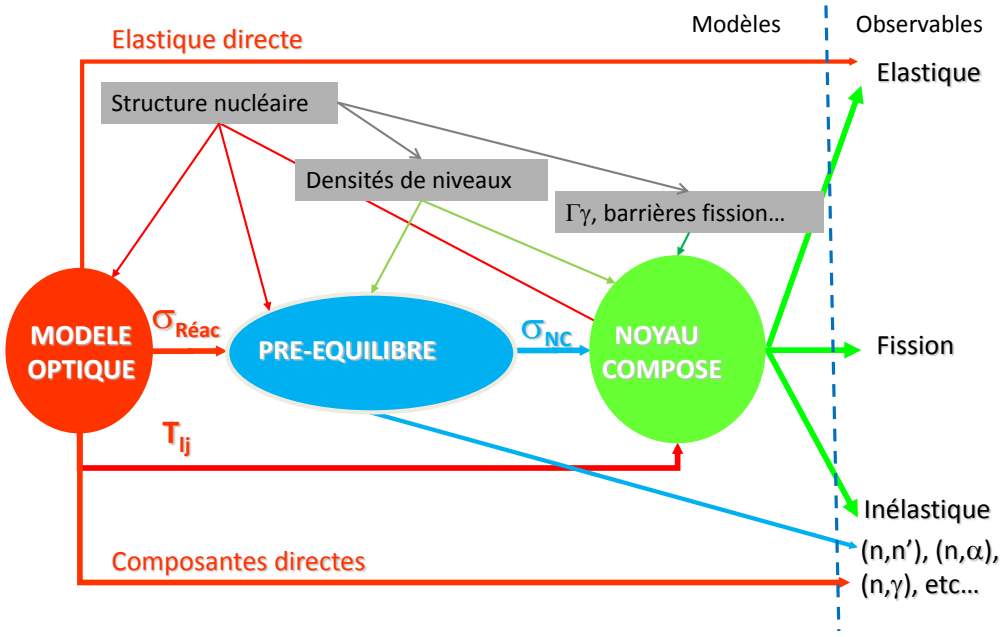


FIGURE 3.5: Exemple d'enchainement des modèles tels qu'ils sont implémentés dans le code de réaction nucléaire TALYS.

initiaux des modèles décrivant les processus plus lents comme cela est décrit sur la Figure 3.5 produite par E. Bauge. Le modèle optique est à la base de tout calcul et produit la section efficace de réaction, la section efficace élastique directe, les contributions des composantes directes et les coefficients de transmission utilisés ensuite par le modèle du noyau composé pour la désexcitation du noyau en une voie donnée. Le modèle de pré-équilibre prend rapidement la suite du modèle optique et permet l'émission de particules dans une zone d'énergie intermédiaire. Ainsi le système peut évacuer rapidement une partie de son énergie d'excitation. Enfin le modèle statistique permet au noyau composé de terminer sa désexcitation via toutes les voies possibles de réaction. L'amplitude de ces différents processus varient en fonction des systèmes et des énergies mises en jeu. Sur la Figure 3.5 apparaissent également les autres ingrédients nécessaires aux modèles comme la structure nucléaire, la description des densités de niveaux, les forces gamma, les barrières de fission, ...

Une fois la structure générale des codes de réactions nucléaires décrites, il faut s'intéresser aux théories qui modélisent les processus puisque c'est sur ces dernières que nos données expérimentales pourront être discriminantes et contraignantes. Je ne passerai pas ici en revue tous les modèles développés et utilisés pour alimenter les codes mais pointerai

plutôt les différents modèles que nous avons testés en comparant les prédictions des codes aux mesures de sections efficaces (n,xn γ) sur les actinides obtenues avec GRAPhEME.

3.3 L'apport des mesures (n,xn γ) pour la modélisation des réactions nucléaires

Les sections efficaces exclusives (n,xn γ) peuvent être des observables très contraignantes pour les modèles puisque pour pouvoir les décrire correctement, les 3 principaux mécanismes de réaction (direct, pré-équilibre et statistique) qui entrent en jeu doivent être correctement modélisés. De plus, les aspects de structure sont aussi primordiaux puisque la cascade γ doit, elle aussi, être correctement simulée. Si on ajoute à cela le cas de noyaux fissibles, alors les barrières de fission et autres paramètres propre au phénomène de fission doivent être également convenablement décrits.

La modélisation des réactions nucléaires peut être réalisée suivant différentes philosophies parmi lesquelles trois principales peuvent se distinguer [2, 118]. Une première s'appuie sur des modèles phénoménologiques dont les paramètres vont être ajustés sur des données expérimentales. Cette méthode permet une bonne prédictibilité au voisinage des noyaux qui ont servis à l'ajustement mais dans les régions plus éloignées où l'information expérimentale manque, cette approche est souvent défaillante. Une seconde méthode est la méthode dite "ab-initio". Elle s'appuie sur le premier principe et part de la description fondamentale de l'interaction nucléon-nucléon en introduisant des approximations contrôlées pour résoudre le problèmes à N-corps. La dernière approche est dite "effective" et est basée sur une interaction à deux corps phénoménologique introduite dans les théories à plusieurs corps pour produire les propriétés de structure et les observables de réactions de façon cohérente. Le développement des méthodes les plus microscopiques permettent de mieux comprendre les processus fondamentaux qui gouvernent l'interaction particule-noyau et devraient ainsi être plus prédictives que les approches phénoménologiques. Par la suite, nous allons voir plus concrètement ce qu'il en est de cette prédictibilité concernant les calculs des sections efficaces (n,xn γ).

Le cas ^{235}U(n,n' γ) et (n,2n γ) [94] - 2013

Les données concernant l'^{235}U ont été les premières sections efficaces que nous avons publiées. Lors de ce travail, nous avons fait appel à nos collègues théoriciens du CEA/-DAM/DIF pour nous épauler dans la comparaison de nos données aux modèles. En effet, ils pouvaient tester TALYS avec des jeux de paramètres d'entrée bien optimisés sur ces noyaux qu'ils étudient depuis longtemps et qui ne sont pas dans la base de données de TALYS. Le cas de l'uranium 235 était un premier cas difficile expérimentalement. En effet, l'étude de la réaction (n,n' γ) est complexe car le noyau est impair et la cascade γ de désexcitation n'est donc pas collectée principalement via la bande rotationnelle du fondamental comme dans le cas d'un noyau pair. Le spectre de radioactivité combiné à la désexcitation des produits de fission ont aussi considérablement noyé les transitions γ de l'^{235}U dans un bruit de fond important. Cette situation est illustrée sur la Figure 3.6 où l'on voit la faible intensité des transitions de l'^{235}U et leur contamination éventuelle avec un produit de fission. Nous n'avons pu alors extraire qu'une transition dans l'^{235}U. Le cas de la réaction (n,2n) est un peu plus favorable quant au schéma de niveau mais nous nous heurtons alors à la plus faible section efficace et au flux de neutrons de GELINA moins intense dans cette région en énergie. Les transitions γ correspondant à la décroissance des 2 premiers niveaux de la bande du fondamental n'ont pas pu être extraites (contamination trop importante et intensité trop faible) et seules les transitions 6^+ - 4^+, 8^+ - 6^+ et 10^+ - 8^+ ont pu être analysées. Les sections efficaces obtenues comparées aux données expérimentales existantes et à différents calculs TALYS sont présentées sur la Figure 3.7. On y remarque que les prédictions de TALYS quelle que soit l'approche adoptée, peinent à reproduire les données expérimentales. Des approches phénoménologiques et microscopiques ont été combinées pour tester la sensibilité des prédictions des modèles aux paramètres d'entrée concernant le potentiel optique et les densités de niveaux et la fonction de force γ. Un potentiel optique global spécifique (cgmr), développé au CEA/-DAM, a été utilisé ainsi que celui de Soukhovitskii (phénoménologique) implémenté dans TALYS par défaut pour les actinides. Des paramètres d'entrée microscopiques (micro) et phénoménologiques (pheno) ont été testés pour les densités de niveaux et forces γ. Dans le cas de l'^{235}U, l'approche pheno-cgmr semble la meilleure même si des différences existent toujours. Notamment pour les transitions (n,2n γ) dans ^{234}U, pour lesquelles le code surestime les sections efficaces. Pour la transition (n,n' γ), l'approche pheno-cgmr reproduit assez bien le pic de la composante directe mais peine cruellement au delà de

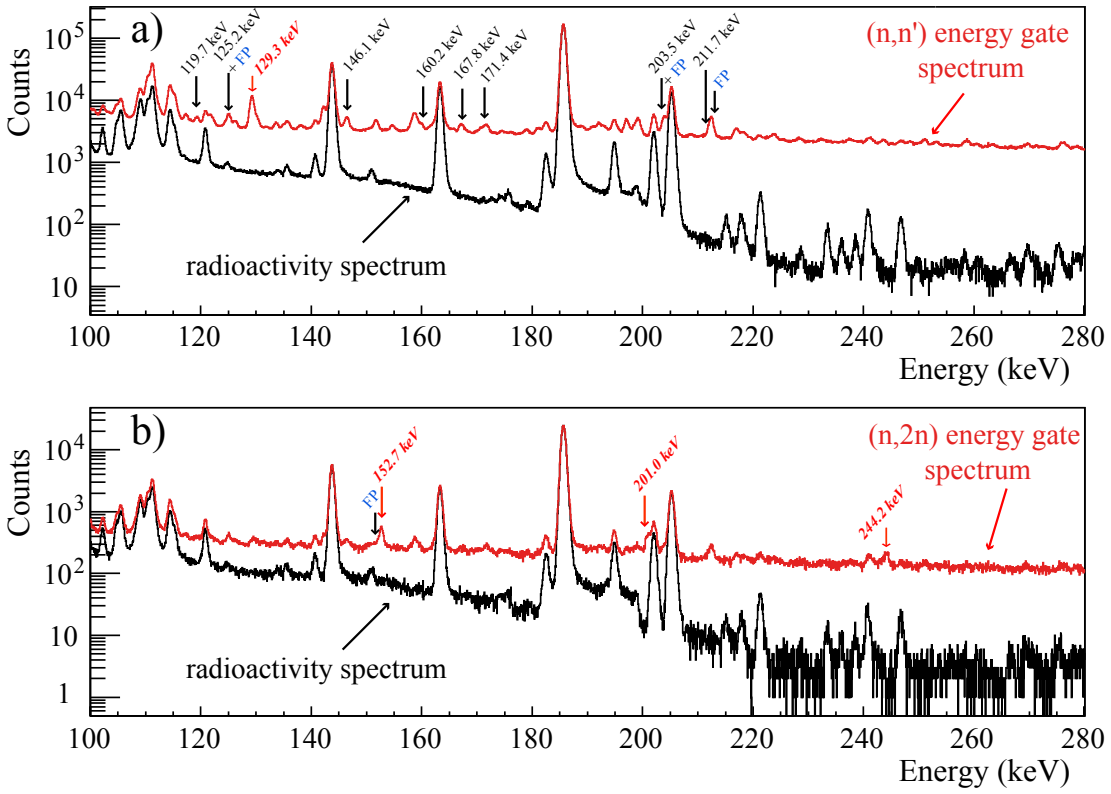


FIGURE 3.6: Portion du spectre en énergie γ pour des fenêtres en temps correspondant aux réactions (n,n')((a), rouge) et (n,2n) ((b), rouge) comparée au spectre de décroissance radioactive (noir) pour la cible ^{235}U. Les transitions analysées sont repérées en italique et en rouge, les transitions provenant de la décroissance des produits de fission sont labellisées "FP" en bleu.

1 MeV. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer ces désaccords. D'abord, les paramètres microscopiques ne permettent pas d'obtenir une description optimisée de la section efficace de fission ce qui pénalise les autres voies de réaction. Pour les réactions (n,2n γ), le mécanisme dominant est le pré-équilibre. Dans TALYS, c'est le modèle semi-classique des excitons qui est implémenté et qui ne donne pas une description réaliste de la population de spin du noyau excité. Cette hypothèse sera confirmée par les travaux de Marc Dupuis sur l'^{238}U.

Ce premier travail nous a permis de prendre conscience que les codes de réaction nucléaire étaient encore loin de pouvoir prédire des sections efficaces (n,xn γ) fiables et qu'un important travail théorique était nécessaire pour améliorer le pouvoir prédictif des modèles. Il apparaissait alors évident que pour relever ces défis, nous devions travailler conjointement avec les théoriciens afin de rendre la méthode de la spectroscopie γ prompte sur les actinides capable de produire des sections efficaces totales les plus précises possibles.

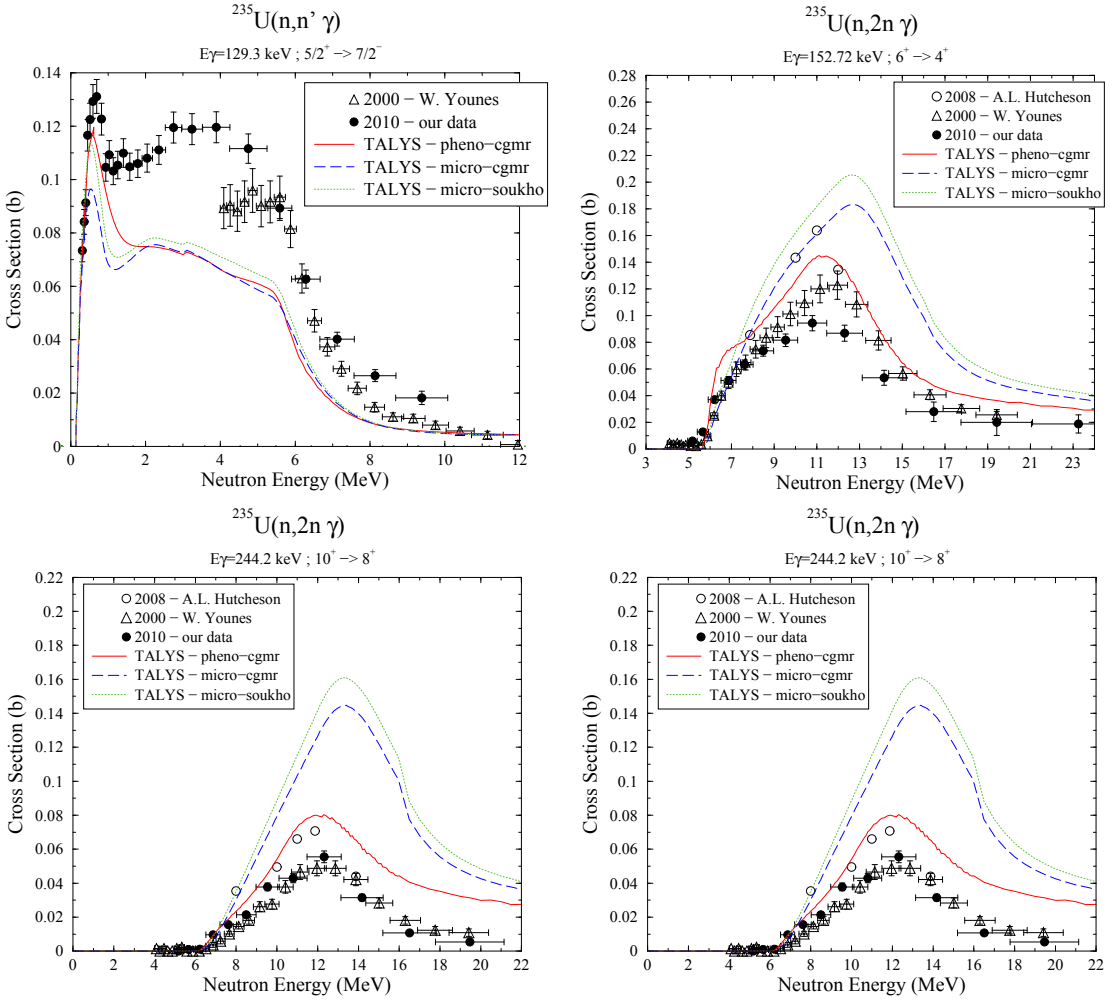


FIGURE 3.7: Sections efficaces ^{235}U(n,n' γ) et ^{235}U(n,2n γ) comparées aux données expérimentales existantes et aux prédictions du code TALYS avec différents modèles et paramètres d'entrée.

Le cas ^{232}Th(n,5n γ) [97] - 2014

En 2014, pour la publication des résultats de l'expérience réalisée auprès du cyclotron de Louvain-la-Neuve en Belgique, et qui visait la mesure des sections efficaces (n,5n γ) sur le thorium 232, j'ai fait appel à Arjan Koning (qui travaillait à l'époque au NRG de Petten), un des auteurs du code TALYS. En effet, les collègues de la DAM ne travaillant pas particulièrement sur cet isotope, ils n'avaient pas de fichier optimisé à tester dans TALYS. Arjan Koning a donc accepté de travailler sur la prédiction de ces sections efficaces en essayant d'optimiser les paramètres d'entrée des différents modèles de TALYS. Lors de cette expérience, trois transitions de la bande du fondamental du ^{228}Th ont pu être analysées : 8^+ - 6^+, 6^+ - 4^+ et 4^+ - 2^+. Les sections efficaces obtenues sont présentées

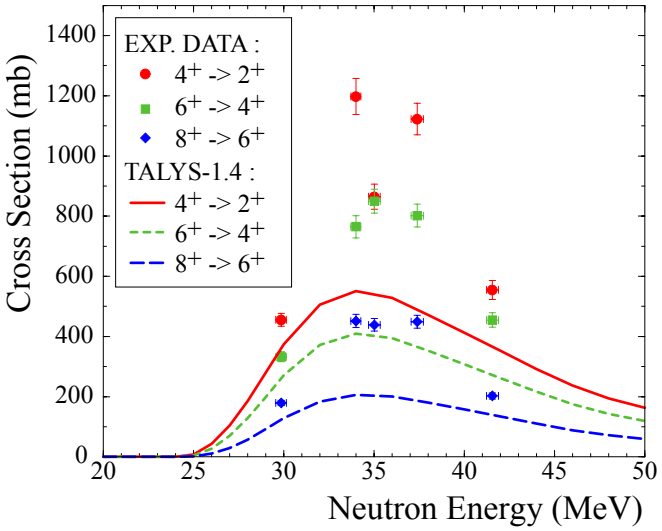


FIGURE 3.8: Sections efficaces ^{232}Th(n,5n γ) pour trois transitions de la bande du fondamentale du ^{228}Th comparées aux prédictions du code TALYS-1.4 (calculs réalisés par A.J. Koning).

sur la Figure 3.8 en comparaison des calculs réalisés avec la version 1.4 de TALYS. On voit que les calculs TALYS sous-estiment fortement (plus de 50%) les sections efficaces mesurées et présentent à haute énergie une décroissance moins abrupte que les données expérimentales. Dans cette version, le potentiel de Soukhovitskii (phénoménologique) a été utilisé et est sensé produire la section efficace totale à quelques pourcents et les sections efficaces non élastiques avec une incertitude de l'ordre de 10-15 %, ce qui n'explique alors pas les désaccords observés. Une des difficultés pour les codes de réactions nucléaires dans le cas de particules incidents énergétiques, est la nécessité d'ajuster correctement les paramètres de barrière de fission et de densité de niveaux tout au long de la chaine des isotopes potentiellement produits, ici du ^{224}Th au ^{233}Th. Pour le thorium 232, la Figure 3.9 montre la section efficace de fission ajustée par A.J. Koning et utilisée dans TALYS. Dans la zone en énergie 30-40 MeV, la section efficace est sous estimée par rapport aux données expérimentales ce qui laisse penser que les autres voies de réactions vont être surestimées. Malgré tout, cette section efficace de fission n'est pas la seule à intervenir et d'autres paramètres sont à prendre en compte dans la chaîne des réactions possibles. Une des dernières hypothèses reste donc la répartition de la cascade γ dans le ^{228}Th. L'hypothèse qui revient est celle de la mauvaise prédiction de la distribution en spin dans le modèle des excitons. De plus, à ces énergies, les effets des émissions de pré-équilibre au delà du premier ordre sont très mal connus. Une amélioration serait donc attendue en incluant dans TALYS ces contributions des modèles FKK par exemple. Lors

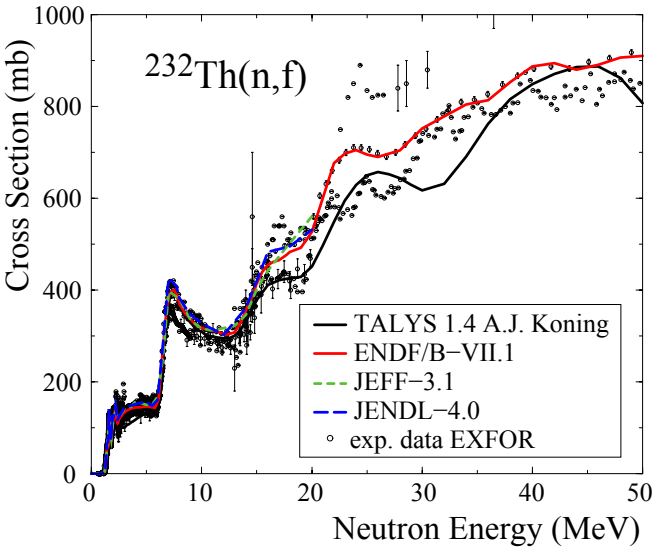


FIGURE 3.9: Section efficace de fission du Thorium 232 expérimentale, évaluée et calculée par TALYS-1.4.

de ce travail, il s'est donc avéré difficile de conclure précisément sur les désaccords entre la modélisation et les données mesurées. Le peu de transitions extraites ne donnaient pas non plus un cadre très contraignant aux modèles. En revanche, les mesures effectuées à GELINA sur le thorium vont pouvoir apporter un maximum de contraintes puisque 48 sections efficaces ^{232}Th(n,n' γ), 6 (n,2n γ) et 6 (n,3n γ) ont été extraites. Cette analyse fait l'objet de la thèse d'Eliot Party et des calculs TALYS, effectués par Marc Dupuis (CEA/DAM), sont prévus pour la finalisation de son travail de thèse.

Le cas ^{238}U(n,n' γ)

L'analyse de données de l'uranium 238 est en phase de finalisation, mais depuis plus de 4 ans nous travaillons en collaboration avec les théoriciens de la DAM (Marc Dupuis, Stéphane Hilaire, Pascal Romain), avec Roberto Capote de l'AIEA et depuis deux ans avec Toshihiko Kawano du LANL (US) pour l'interprétation de nos résultats. En effet, le cas de l'^{238}U est très intéressant car sa faible radioactivité et son nombre pair de nucléons en font un bon candidat pour l'application de la méthode de la spectroscopie γ prompte à la détermination de la section efficace inélastique. Nous avons pu mettre en évidence, dans le spectre γ, 36 transitions dont nous pouvons extraire une section efficace. Cela représentera alors un jeu très complet de contraintes pour les modèles. La collaboration avec les théoriciens dans le cadre de l'étude de ce noyau permet de

confronter les prédictions de trois codes de réactions nucléaires : TALYS, EMPIRE et CoH3. En effet, même si ces trois codes calculent les mêmes observables en se basant sur les descriptions des mêmes mécanismes mis en jeu, des différences dans leurs prédictions sont observées. Cette comparaison permettra de faire ressortir les modèles et paramètres les mieux adaptés à la description des sections efficaces (n,n' γ). Ce travail fera l'objet d'une publication commune une fois l'analyse des données de l'^{238}U finalisée. Dans cette partie, je me focaliserai sur le travail effectué avec nos collègues du CEA/DAM réalisé, depuis 4 ans, dans le cadre du projet collaboratif EEDIN (Etude Expérimentale de la Diffusion Inélastique du Neutron pour les réacteurs du futur) soutenu par le défi NEEDS. Dans cette étude, l'apport de l'approche microscopique des modèles est incontestable [119].

Je décris ici sommairement les principaux ingrédients théoriques introduits dans le code de réaction nucléaire TALYS version 1.82. Le modèle "JLM folding", développé au CEA/-DAM/DIF, est utilisé pour déterminer les potentiels optique et de transition qui sont nécessaires pour décrire la diffusion inélastique directe dans l'approximation DWBA pour les noyaux sphériques et avec le formalisme des canaux couplés pour les noyaux déformés axialement comme les actinides. Les potentiels de transition sont calculés en considérant des corrections de réarrangement pour tenir compte des variations de la densité nucléaire pendant le processus inélastique. Les informations de structure nucléaire comme la densité de matière locale pour l'état fondamental du noyau, les énergies, spins, parités et les densités de transitions locales pour chaque cible et excitation, sont calculées avec le modèle QRPA implémenté avec l'interaction de Gogny D1S. Un des premiers effets mis en évidence et produit par l'approche microscopique a été l'amélioration significative du calcul des sections efficaces (n,n' γ) pour les transitions de spins élevés dans la bande du fondamental comme cela est montré sur la Figure 3.10. Cette amélioration provient de la meilleure description de la distribution en spin du noyau résiduel formé après l'émission de pré-équilibre d'un neutron obtenu avec un calcul microscopique par rapport à un calcul classique d'excitons. Les distributions en spin calculées par les deux méthodes sont montrées sur la Figure 3.11 [119]. L'approche microscopique peuple les états à plus bas spins et défavorise donc les transitions à partir de niveaux à haut spin contrairement au modèle des excitons. Un autre ingrédient des modèles a été testé et concerne la description des forces γ E1-M1 pour lesquels une description microscopique QRPA a été développée. La Figure 3.12 montre les différences obtenues dans le calcul des sections

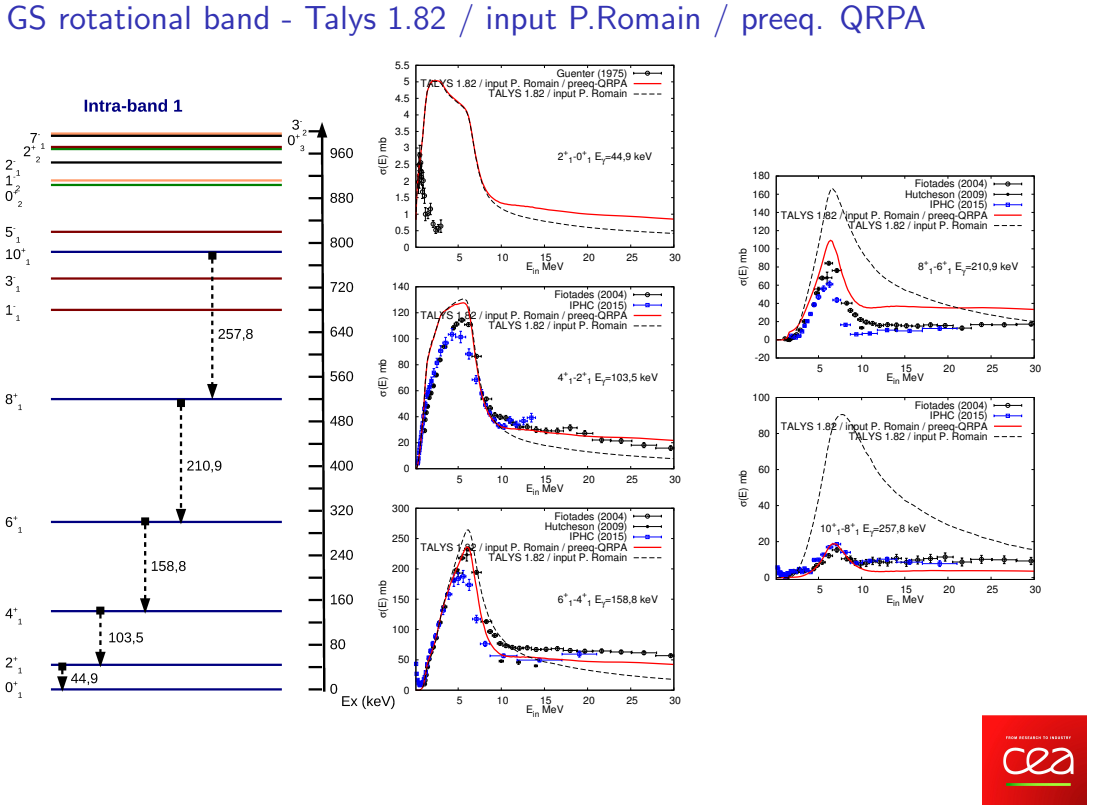


FIGURE 3.10: Sections efficaces ^{238}U(n,n' γ) expérimentales et calculées pour les transitions dans la bande du fondamental. La différence entre le calcul microscopique (QRPA) ou classique (excitons) pour le pré-équilibre est clairement visible sur les transitions au delà du spin $4\hbar$. Figure Marc Dupuis.

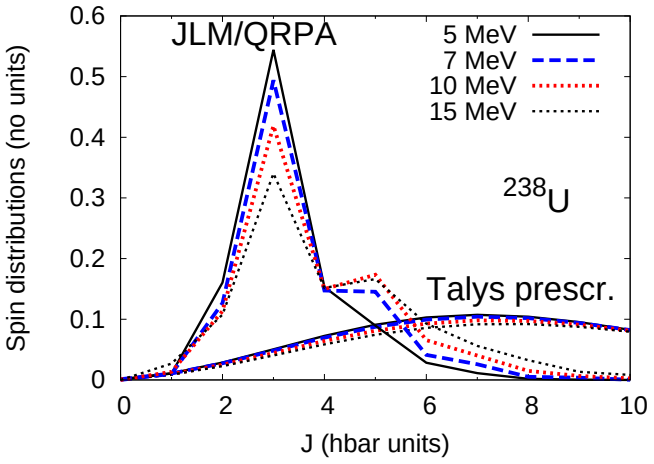


FIGURE 3.11: Distributions en spin du noyau résiduel formé après l'émission de pré-équilibre d'un neutron, pour la réaction n+^{238}U, obtenues avec un calcul microscopique (JLM/QRPA) par rapport à un calcul classique d'excitons (Talys Presc.).

Inter-band transitions

Direct + Preequilibrium from JLM+QRPA

E1-M1 response functions: RIPL ⟶ QRPA : S. Goriely PL002, I387 (S. Hilaire).

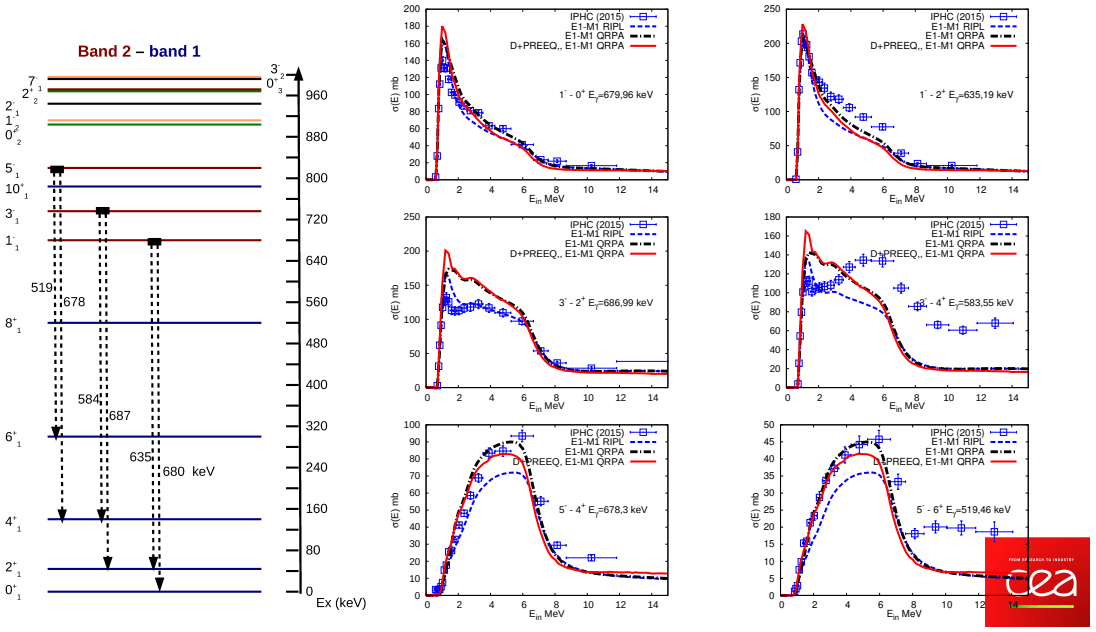


FIGURE 3.12: Sections efficaces ^{238}U(n,n' γ) expérimentales et calculées pour les transitions inter-bande (2-1). Trois approches pour les fonctions de force γ sont étudiées. La première (RIPL) décrit un calcul classique. E1-M1-QRPA est la combinaison d'un calcul classique avec une force γ microscopique et D+PREEQ, E1-M1 QRPA correspond à un calcul complet microscopique. Figure Marc Dupuis. Il faut noter que la transition à 584 keV (3^- - 4^+) est contaminée par une transition du plomb 208 à 583.19 keV à partir de 3 MeV.

efficaces ^{238}U(n,n' γ) pour des transitions inter-bande. Pour certaines transitions, les différentes approches classique/microscopique produisent des résultats différents en amplitude et en forme. Pour d'autres, l'effet n'est pas flagrant. D'une façon générale, pour les transitions inter-bande, une description microscopique des fonctions de force γ aura tendance à augmenter l'amplitude de la section efficace comme cela est illustré sur les Figures 3.13 et 3.14. On constate donc, que même si des progrès importants ont été réalisés pour améliorer les prédictions des modèles, il reste encore une marge de progression importante. Plusieurs pistes doivent être explorées. Tout d'abord, une étude rigoureuse des rapports d'embranchement et, si possible, une vérification expérimentale doivent être effectuées pour s'assurer que la description de la cascade γ s'effectue correctement. En effet, comme illustré sur la Figure 3.15, on a déjà trouvé une erreur dans la base de données NNDC [120] pour l'^{238}U concernant la décroissance du niveau 1^- à 680 keV.

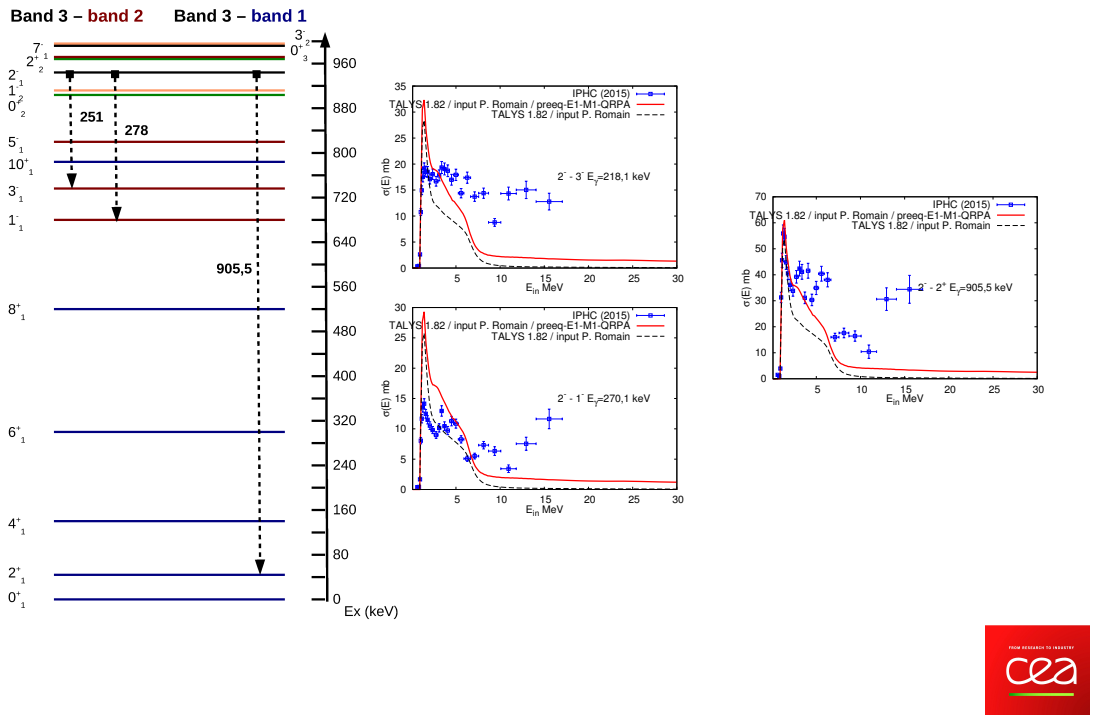


FIGURE 3.13: Sections efficaces ^{238}U(n,n' γ) expérimentales et calculées pour les transitions inter-bande (3-1 et 3-2). Deux approches pour les fonctions de force γ sont étudiées. la première décrit un calcul classique (Input P.romain) et preeq-E1-M1-QRPA correspond à un calcul complet microscopique. Figure Marc Dupuis.

Le rapport d'embranchement mesuré dans notre expérience correspond en revanche à celui mesuré par Govor *et al.* [121]. De plus, nous avons observé pour plusieurs noyaux des différences entre la structure utilisée par TALYS et les bases de données. Une étude bibliographique détaillée du schéma de niveaux des noyaux doit donc être réalisée.

Concernant la structure du noyau, à partir d'une certaine énergie d'excitation où les états deviennent très nombreux et leur espacement diminue, la description discrète est remplacée par une description continue de densité de niveaux. L'énergie à laquelle se situe cette transition est un point important de la modélisation. Il a été montré qu'inclure un plus grand nombre de niveaux discrets, c'est à dire augmenter l'énergie de transition discret-continuum, et ajouter des niveaux discrets dans le continuum permettaient une meilleure description des sections efficaces (n,n' γ) dans le cas des isotopes du tungstène pairs (182, 184, 186) [102]. Cette approche est notamment réalisée par T. Kawano dans son code CoH3 et devra être testée dans le cas de l'uranium.

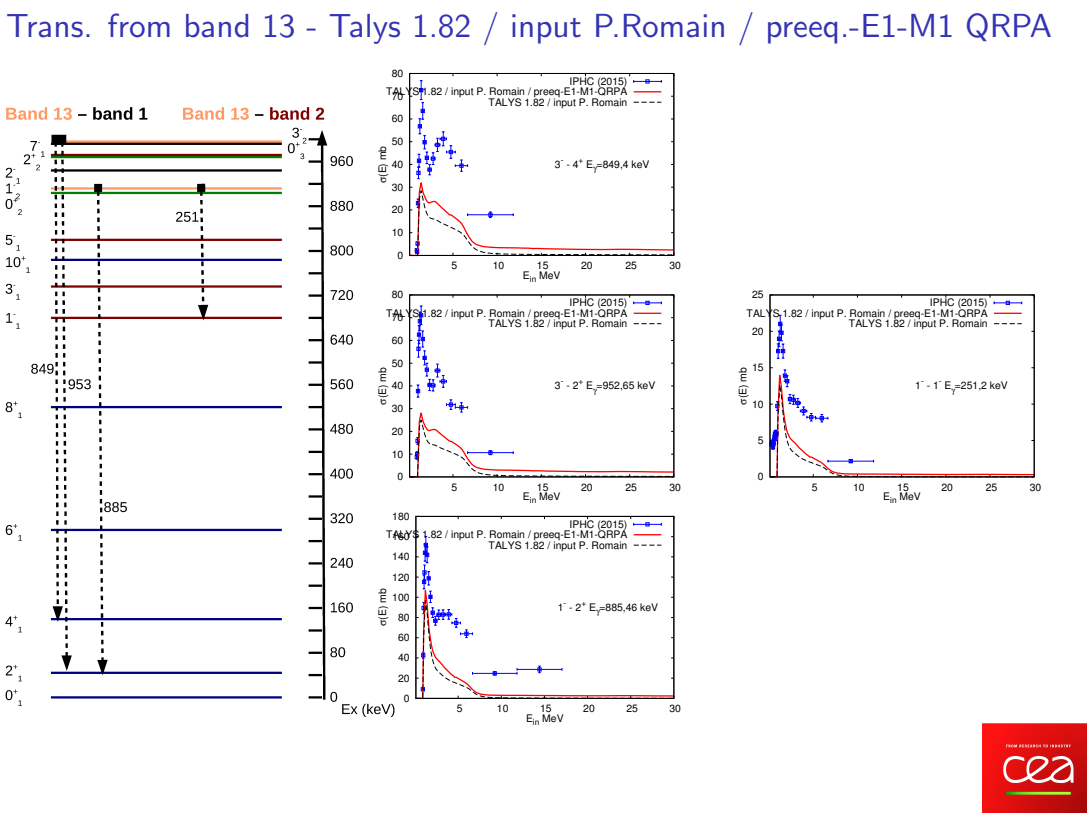


FIGURE 3.14: Sections efficaces ^{238}U(n,n' γ) expérimentales et calculées pour les transitions inter-bande (13-1 et 13-2). Deux approches pour les fonctions de force γ sont étudiées. La première décrit un calcul classique (Input P.Romain) et preeq-E1-M1-QRPA correspond à un calcul complet microscopique. Figure Marc Dupuis.

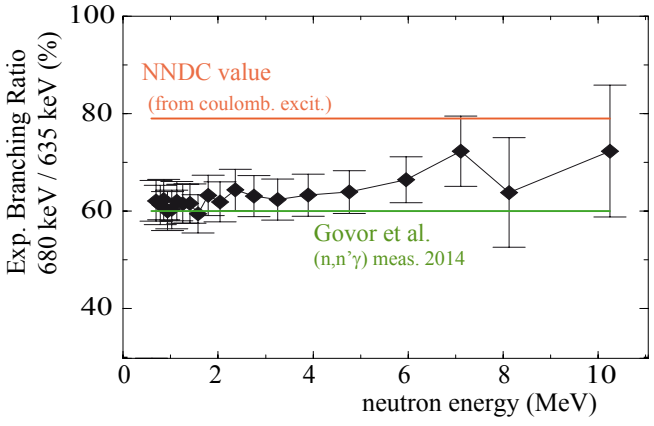


FIGURE 3.15: Rapport d'embranchement expérimental pour la décroissance du niveau 1^- à 680 keV de l'^{238}U comparé au rapport d'embranchement présent dans NNDC et celui mesuré par Govor *et al.*.

Enfin, les densités de niveaux sont aussi un paramètre important qui peut influencer la forme des sections efficaces. Dans l'article [46], Arjan Plompen a montré la sensibilité des calculs des sections efficaces (n,n' γ) aux différents modèles de densité de niveaux présents dans le code TALYS (cf. Figure 3.16). Trois modèles couramment utilisés sont implémentés dans TALYS, le modèle basé sur l'approximation de la température constante (default), le modèle de type modèle de Fermi (backshifted Fermi-gas - BSFG) et le modèle tenant compte de la super fluidité (generalized superfluid model - GSM). Trois modèles microscopiques, basés sur des modèles de champs moyens (HF, HFB), sont également implémentés : le modèle développé par Goriely *et al.* [74] basé sur des calculs Hartree-Fock (HF), le modèle développé par Goriely, Hilaire and Koning basé sur des calculs Hartree-Fock-Bogoliubov et une approche combinatoire (microscopic combinatorial - HFBC) et enfin des densités de niveaux calculées à partir des calculs HFB à température finie (temperature-dependent Hartree-Fock-Bogolyubov) utilisant la force de Gogny (TDHFB). Ces calculs ont été réalisés pour les noyaux ^{23}Na, ^{24}Mg, ^{28}Si, ^{52}Cr, ^{56}Fe, ^{208}Pb et ^{209}Bi et la comparaison est effectuée pour les transitions du premier niveau excité au fondamental et du deuxième niveau au premier niveau excité. On constate que plus la masse du noyau est élevée et plus la sensibilité de la section efficace aux différentes approches diminue. Pour les noyaux légers, l'effet des différents modèles de densité de niveau est important et apparait évidemment à l'énergie du continuum. On ne constate pas d'amélioration notoire des prédictions avec la sophistication des approches microscopiques.

Après cette revue simplifiée où l'on constate les progrès des modèles dans la description des sections efficaces (n,nx γ) sur les actinides mais aussi les marges d'amélioration encore possibles, l'expérimentateur peut légitimement se demander quel en sera l'impact sur la détermination de la section efficace (n,xn) totale via la méthode de la spectroscopie γ prompte. La question sous-jacente, et primordiale, de la précision obtenue fait alors surface...

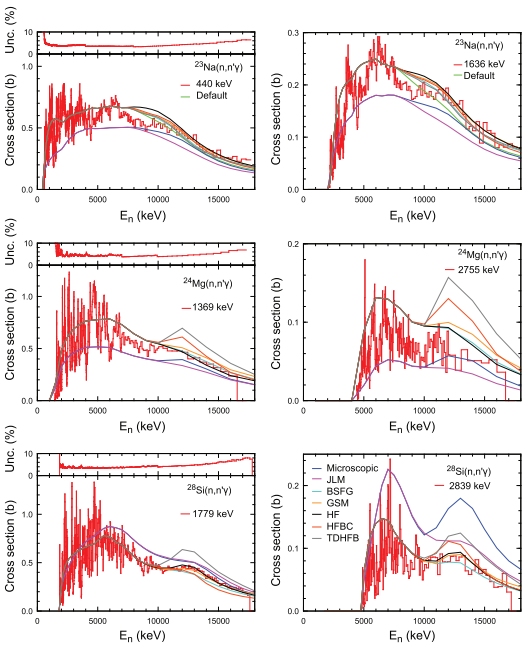


Fig. 22. (Color online) Gamma production cross sections for the transition from the first excited level to the ground state (left column) and from the second level to the 1st excited level (right column) for ^{23}Na, ^{24}Mg, and ^{28}Si. The data in red are compared with various model calculations performed with TALYS-1.6 (see text for details).

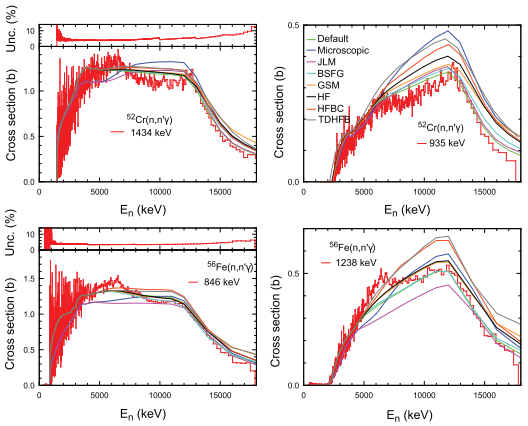


Fig. 23. (Color online) Gamma production cross sections for the transition from the first excited level to the ground state (left column) and from the second level to the 1st excited level (right column) for ^{52}Cr (corrected data) and ^{56}Fe. The data in red are compared with various model calculations performed with TALYS-1.6 (see text for details).

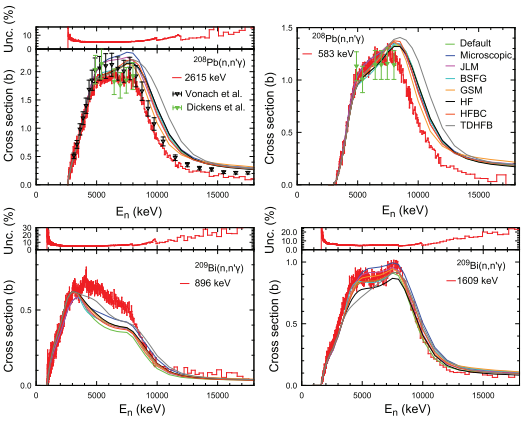


Fig. 24. (Color online) Gamma production cross sections for the transition from the first excited level to the ground state (left column) and from the second level to the 1st excited level or ground state (^{209}Bi) (right column) for ^{208}Pb (corrected data) and ^{209}Bi (corrected data). The data in red are compared with various model calculations performed with TALYS-1.6 (see text for details).

Lejeune-Mahaux nuclear matter potential. It uses adjustment of the potential depths to also reproduce the experimental total and differential scattering cross sections over the whole mass and energy range. All calculations shown use the Koning Delaroche potential except the one labeled JLM and microscopic which use the potential by Bauge *et al.* For the level density we show the constant temperature model [69] (labeled Default), the backshifted Fermi-gas model [70,71] (BSFG), the generalized superfluid model [72,73] (GSM), the level densities by Goriely *et al.* [74] based on Hartree-Fock calculations (HF), the level densities by Goriely, Hilaire and Koning [75] based on the microscopic combinatorial model (HFBC), and level-densities based on temperature-dependent Hartree-Fock-Bogolyubov calculations using the Gogny force [76] (TDHFB, Hilaire *et al.*). For robustness and automated adjustment to experimental low-lying levels and the available s-wave resonance spacing (D0) data TALYS makes a number of practical choices in all cases [55]. This includes an energy dependent change to the microscopic level densities (HF, HFBC and TDHFB). For the calculations shown here only microscopic description has been used all over the energy excitation range. That means the automated adjustments to match the experimental data for levels and D0 has not been used for these three cases (HF, HFBC and TDHFB) in order to obtain a fully microscopic description. Furthermore, the use of Bauge's potential requires imposing a spherical ground state on the nucleus (the option "spherical y" must be set [55]). From the figure several features are observed.

First, considerable resonance like structures are observed in the data at low energy for the ground state transition and other transitions with sufficient statistics in the

FIGURE 3.16: Extrait de l'article M. Kerveno *et al.* EPJA (2015) **51** : 167 où la sensibilité des modèles inclus dans TALYS est discutée en regard des sections efficaces (n,xn γ) mesurées avec le spectromètre GAINS.

3.4 Quel objectif de précision sur les sections efficaces (n,xn) ? "work in progress"

Nous l'avons vu dans les chapitres précédents, les besoins applicatifs réclament une diminution significative des incertitudes sur la connaissance des processus (n,xn) et en particulier sur la diffusion inélastique. Comment la méthode expérimentale de la spectroscopie γ prompte peut-elle atteindre ces objectifs ? Dans le chapitre 2, nous avons vu que nous sommes capables de mesurer avec une précision de quelques pourcents les sections efficaces (n,xn γ). Lorsque la structure du noyau s'y prête, la détermination directe de la section efficace (n,xn) totale via la combinaison des sections efficaces (n,xn γ) avec les informations de structure aboutit à une incertitude de l'ordre de 5% sur une plage en énergie allant du seuil jusqu'à environ 2 MeV ou 8 MeV (cf. les données mesurées sur les noyaux stables avec le spectromètre GAINS précédemment citées, section 3.1). La méthode est alors tout à fait adaptée pour répondre aux besoins applicatifs. Dans le cas des actinides, la situation est plus complexe car la déduction de la section efficace totale n'est pas toujours aussi directe et peut impliquer le recours aux codes de réaction nucléaire comme expliqué en début de ce chapitre. En effet, d'une part, la structure de ces noyaux limite par essence l'énergie maximale jusqu'à laquelle on pourra déduire la section efficace totale en utilisant seulement les informations de structure. D'autre part, la difficulté de mesurer la désexcitation du premier niveau excité pénalise fortement la méthode. Le recours aux modèles peut alors être une alternative, mais dans ce cas, comment peut-on quantifier l'incertitude sur la section efficace totale calculée par le code ? Et peut-on développer une procédure qui permettrait de minimiser cette incertitude ? Ces questions sont encore ouvertes, nous n'avons pas encore de réponse satisfaisante à fournir mais nous travaillons avec nos collègues théoriciens du CEA/DAM et évaluateurs du CEA/DEN sur ces aspects. J'ai notamment évoqué ces questions lors du dernier "covarience workshop" 2017 [105]. Sur ces aspects cependant, il est intéressant de mentionner le travail de nos collègues Roumains effectué dans le cas de la mesure de la diffusion inélastique sur le ^{57}Fe [122]. La structure de ce noyau présente un premier niveau d'excitation à très basse énergie (14.41 keV) qu'il n'a pas été possible de détecter avec GAINS. Il manquait donc une transition cruciale pour la méthode de reconstruction de la section efficace inélastique totale via la structure du noyau (cf. Figure 3.17). La démarche suivante a alors été adoptée. Le code de réaction nucléaire EMPIRE a été utilisé pour

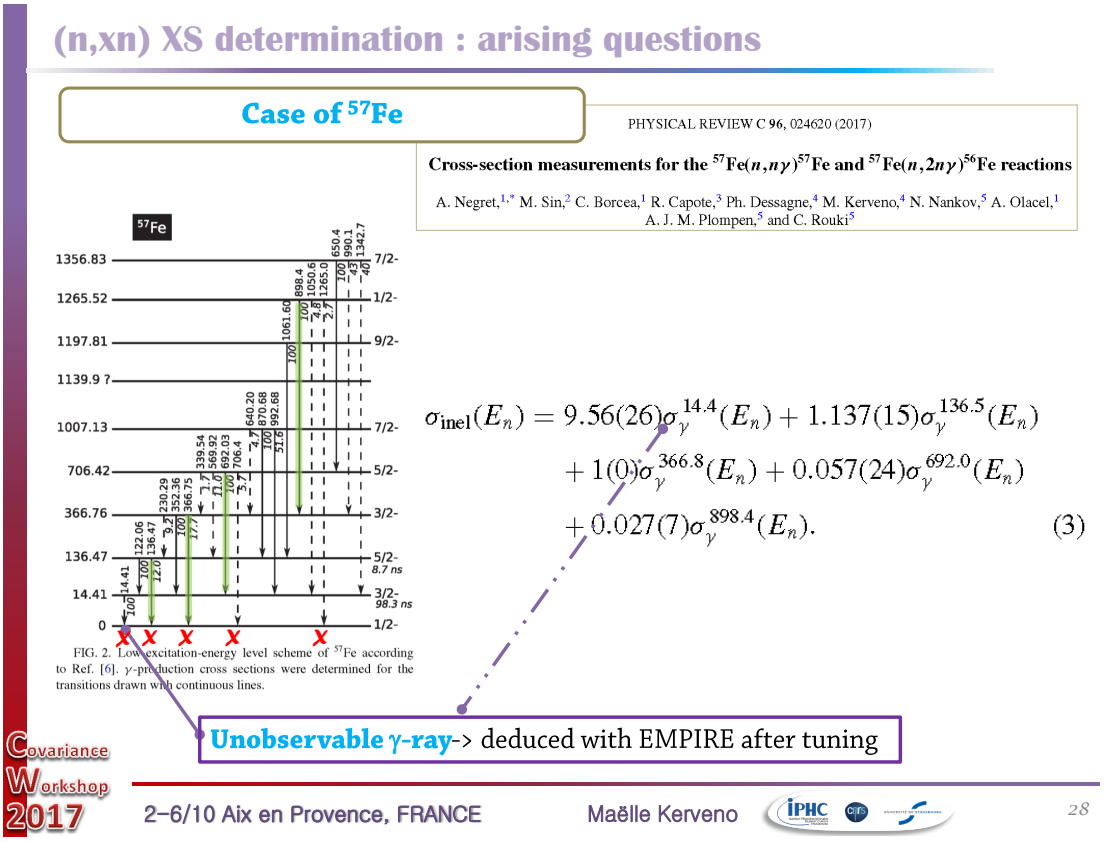


FIGURE 3.17: Portion du schéma de niveau du ^{57}Fe (gauche). Les transitions en trait plein sont celles qui ont pu être mesurées. Les croix rouges représentent les transitions qui atteignent l'état fondamental et qui doivent être utilisées pour reconstruire la section efficace inélastique totale. Les transitions surlignées en vert correspondent à celles effectivement utilisées pour ce calcul selon la formule à droite.

calculer les sections efficaces (n,xn γ) et des ajustements ont été réalisés pour reproduire au mieux les données expérimentales. L'ajustement a été effectué sur deux paramètres. Le premier concerne une correction, dépendante de l'énergie, de la section efficace non élastique. Le second concerne l'ajustement des sections efficaces des productions de niveaux pour compenser l'impossibilité d'introduire un grand nombre de transitions entre les niveaux discrets. Ces compensations ont été effectuées de telle sorte qu'il n'y ait pas d'effet délétère sur les autres voies de réaction. EMPIRE ainsi ajusté, un accord d'environ 10% entre les données mesurées et calculées est observé. La section efficace (n,xn γ) de la transition à 14.41 keV calculée par EMPIRE a donc été produite et affectée d'une incertitude de 10% avant d'être introduite dans la formule du calcul de la section efficace totale. Le résultat est présenté sur la Figure 3.18. La section efficace mesurée est exacte entre 300 keV et 1627.3 keV, au delà elle représente une limite inférieure de la section efficace inélastique. Ce travail a permis de fournir une information importante

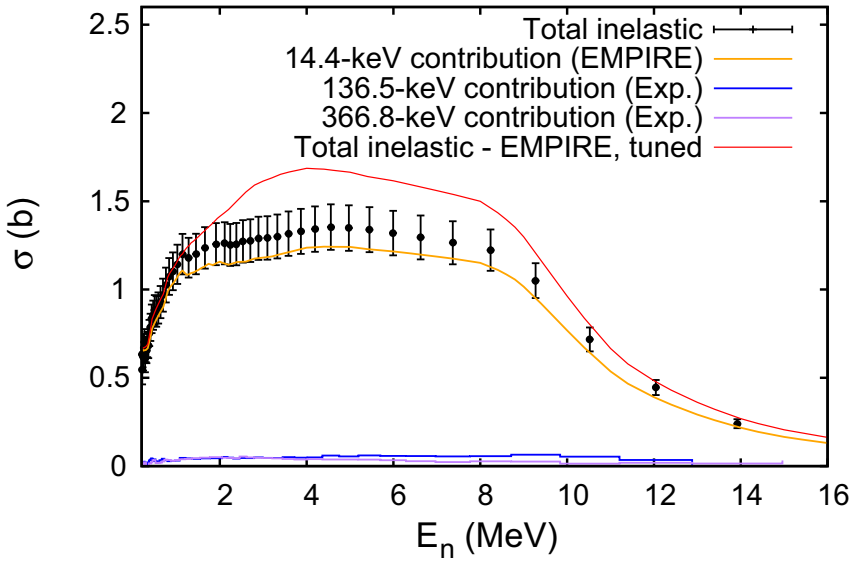


FIGURE 3.18: Section efficace inélastique totale pour le ^{57}Fe obtenue avec une combinaison de données expérimentales et modélisées par le code EMPIRE. Les contributions de deux autres niveaux sont montrées.

sur la section efficace inélastique du ^{57}Fe pour laquelle peu de données sont disponibles. Cette stratégie pourrait donc être appliquée au cas des actinides d'une part, dans le cas où comme pour le ^{57}Fe, la décroissance du premier niveau n'est pas observée ou d'autre part, quand les informations recueillies par la méthode de la spectroscopie γ ne sont que parcellaires. Deux aspects, cependant, me semblent importants à discuter. Tout d'abord, la méthode très phénoménologique employée pour l'ajustement de EMPIRE peut poser question quant à ses répercussions sur les autres voies de réactions. Cet aspect devrait être étudié de façon plus approfondie. Ensuite, l'estimation de l'incertitude associée à la prédiction de la transition manquante, sur la base du simple accord calcul/expérience, sans tenir compte des ajustements en amont, peut aussi être discutée. Cette erreur est, en plus, répercutée sur l'incertitude de la section efficace totale. Cette procédure dégrade finalement les efforts expérimentaux pour mesurer à quelques pourcents les sections efficaces (n,xn γ). Du point de vue de l'expérimentateur, il paraît alors intéressant de produire les sections efficaces avec autant d'informations que possible sur les incertitudes et les covariances/corrélations associées. Ces informations pourront être introduites lors de la comparaison aux modèles et des ajustements et permettre sans doute de mieux apprécier la quantification de l'accord. Ces réflexions nous ont alors poussés à faire évoluer nos programmes d'analyse pour qu'ils puissent produire ces données de covariance/corrélation. Une première méthode Monte Carlo a été développée par Greg Henning et est

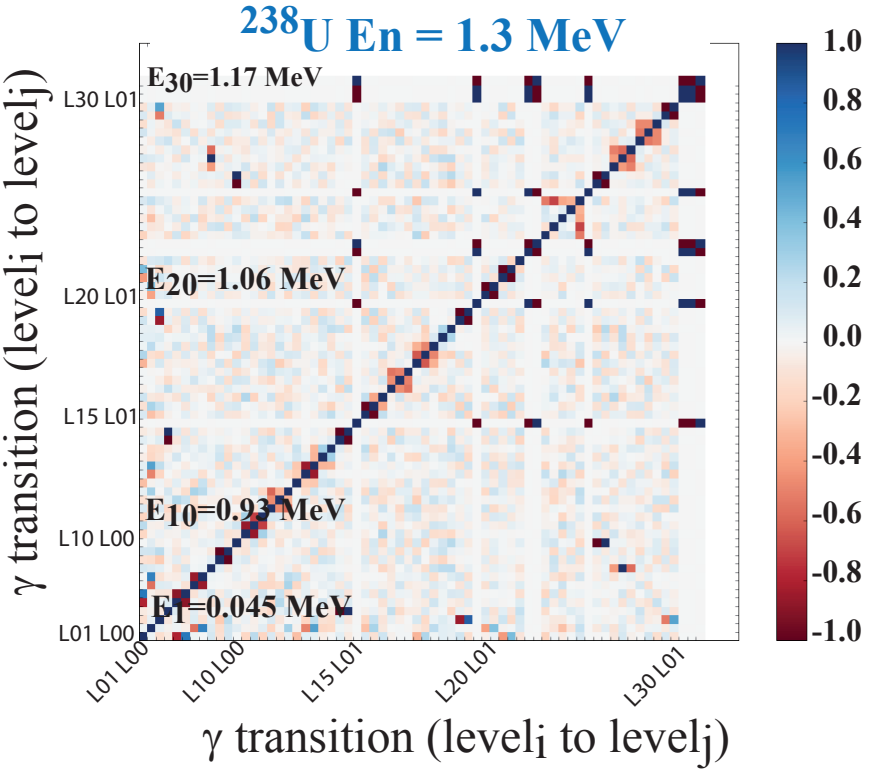


FIGURE 3.19: Matrice de corrélation des sections efficaces de transition γ lors de réactions ^{238}U(n,n') et pour une énergie incidente de 1.3 MeV. Les sections efficaces ont été obtenues via une simulation Monte Carlo avec le code TALYS en faisant varier les rapports d'embranchement dans la structure de ^{238}U aléatoirement.

en cours de test comme cela a été publié dans [105]. Une autre question émerge aussi de ces discussions et concerne le choix possible de transitions qui seraient potentiellement plus contraignantes que d'autres pour les modèles. Une étude de sensibilité des sections efficaces calculées par TALYS à la structure du noyau a été initiée par Greg Henning en 2017. La méthode Monte Carlo consiste actuellement à faire varier, aléatoirement et de quelques pourcents, les données sur les rapports d'embranchement dans la structure du noyau et compiler ensuite les sections efficaces obtenues avec TALYS. Un traitement ultérieur permet alors de produire la matrice de corrélation des transitions γ comme celle présentée sur la Figure 3.19 dans le cas de l'uranium 238 [105]. Une étude détaillée de ces résultats est en cours, mais on voit déjà apparaître des zones pour lesquelles les corrélations sont faibles et pourraient donc correspondre à des transitions intéressantes pour contraindre les modèles puisque indépendantes de la structure elle-même. Ces résultats seront discutés conjointement avec nos collègues théoriciens.

Dans les cas favorables, la méthode de la spectroscopie γ prompte peut produire des

sections efficaces inélastiques avec une incertitude de l'ordre de 5% ce qui répond aux demandes des besoins applicatifs. Pour des noyaux comme les actinides, la situation est plus délicate et le recours aux codes de réaction nucléaire est nécessaire pour remonter à la section efficace (n,xn) totale à partir des sections efficaces (n,xn γ) mesurées. L'incertitude introduite alors via cette procédure n'est pas encore bien maîtrisée. Une première approche se basant sur la valeur de l'accord entre les données expérimentales et celles prédites par le code aboutit à une incertitude de 10%. Il me semble que cette valeur pourrait être minimisée en introduisant un traitement cohérent et complet des incertitudes expérimentales dans la procédure de comparaison aux prédictions des modèles. Cet aspect fera l'objet d'études dans les prochains mois dans le cas de l'uranium 238.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, j'ai montré les enjeux théoriques, notamment dans le cas des actinides, liés à la description fondamentale des sections efficaces (n,xn γ) et le besoin des prédictions des codes de réaction nucléaire pour déduire les sections efficaces totales (n,xn) à partir des observables fournies par la méthode de la spectroscopie γ prompte. Les collaborations entre expérimentateurs, évaluateurs et théoriciens sont alors d'un grand intérêt. Depuis bientôt cinq ans, je travaille activement pour mettre en place et faire vivre ces collaborations autour des études des réactions (n,xn) (organisation des workshops WINS, projet NEEDS/EEDIN, projet NACRE, ...). Je conclus donc ce chapitre par les planches (Figure 3.20) que j'avais présentées en introduction du workshop "Workshop on experimental and theoretical problematic around actinides for future reactors" organisé, en mars 2014, dans le cadre de l'ESNT (CEA) par Marc Dupuis et moi même. Ces quelques "bulles" résumaient notre démarche d'expérimentateurs pour solliciter nos collègues théoriciens et évaluateurs afin de rendre plus performante la méthode de la spectroscopie γ prompte pour l'étude des réactions (n,xn) sur les actinides.

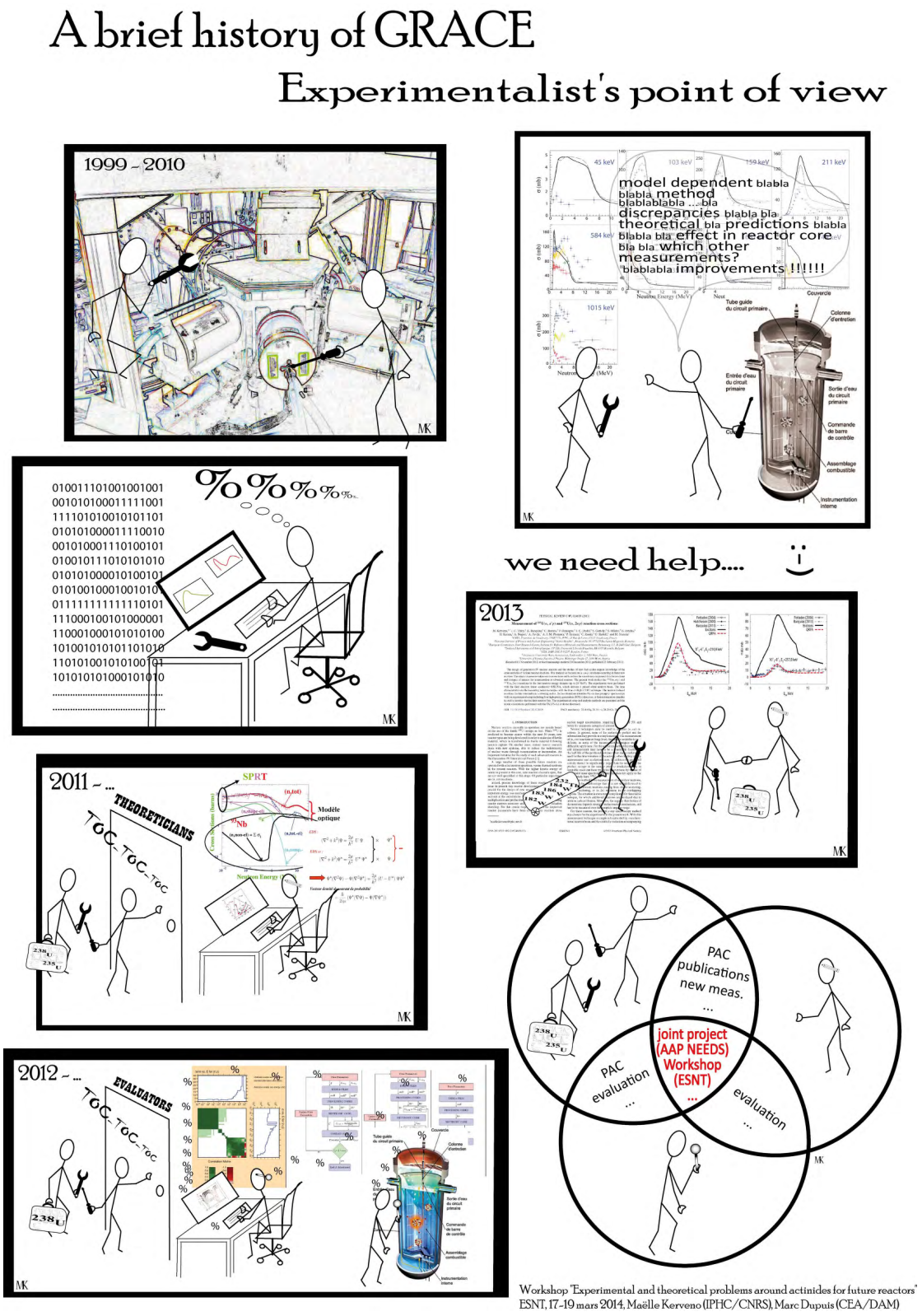


FIGURE 3.20: Planches réalisées pour introduire le workshop "Workshop on experimental and theoretical problematic around actinides for future reactors", organisé en collaboration avec Marc Dupuis et Stéphane Hilaire, dans le cadre de l'ESNT. mars 2014

Chapitre 4

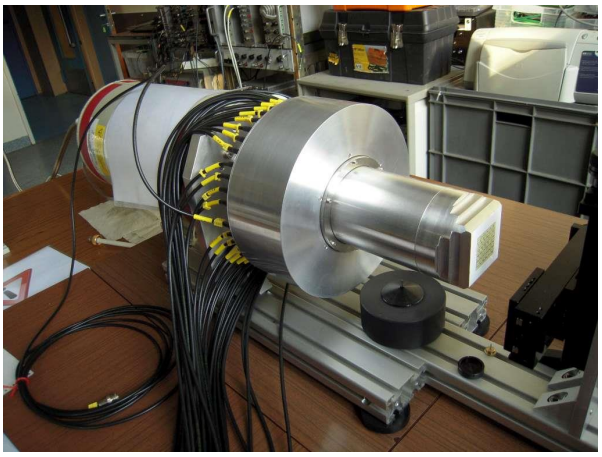
Perspectives

Ce dernier chapitre est consacré aux principaux projets qui vont m'occuper dans les 5 à 10 années à venir. Une grande partie de nos activités seront toujours attachées aux expériences menées avec GRAPhEME auprès de GELINA. Les mesures sur des noyaux à très forte activité comme l'^{233}U ou ^{239}Pu sont de vrais challenges expérimentaux mais également théoriques qu'il nous faudra essayer de relever. Des approches complémentaires, pour pallier les manques de la méthode de la spectroscopie γ prompte, sont aussi à l'étude et particulièrement, le développement d'un système de détection des électrons de conversion. La nouvelle installation française SPIRAL2/NFS ouvre des perspectives pour l'étude des réactions (n,2n) qui nous intéressent grandement. Par ailleurs, comme je l'ai décrit dans le chapitre précédent, les collaborations avec nos collègues théoriciens et évaluateurs sont de première importance et il nous faudra maintenir ce niveau de travail collaboratif en utilisant au maximum les moyens et les outils, structuraux et financiers, à notre disposition. Enfin, j'aimerais faire perdurer une collaboration très récente, avec nos collègues physiciens des réacteurs de l'IPN d'Orsay, autour des questions de calculs de sensibilité des paramètres de réacteurs aux sections efficaces (n,xn) dans le cas du cycle du thorium.

4.1 GRAPhEME et au delà

4.1.1 Les mesures sur des actinides très radioactifs

Dans le chapitre 2, j'ai exposé la mise au point du dispositif GRAPhEME pour la mesure des sections efficaces (n,xn γ) sur des actinides à moyenne activité. Pour rappel, nos activités ont débuté au laboratoire sur le projet de la mesure de la section efficace de réaction ^{233}U(n,2n) par la méthode de la spectroscopie γ prompte. Pour cela, nous avons dû démontrer d'abord la faisabilité de la méthode auprès de faisceau de neutrons blancs et obtenir le financement pour l'étude et l'achat d'un détecteur Germanium planaire segmenté spécialement adapté pour ces mesures à haut taux de comptage. En effet, pour un même volume de cristal qu'un détecteur planaire classique, la segmentation du cristal permet de libérer des voies d'analyse pour les γ d'intérêt tandis que des voies sont occupées à traiter des signaux provenant de gamma de la radioactivité ou du γ-flash. Nous avons obtenu en 2007 un financement ANR pour l'achat d'un détecteur HPGe segmenté (Projet DISPALEND). L'étude de la pixellisation (taille des pixels et leur espacement pour minimiser les charges miroirs) du cristal a été réalisée lors de la thèse de Jean Claude Thiry [99] en collaboration avec l'équipe des ingénieurs de l'entreprise Mirion technologies (à l'époque CANBERRA). Cela a abouti au choix d'une segmentation en 36 pixels (6.66 x 6.66 mm^2) pour une taille de cristal de 54 x 54 mm^2 et une épaisseur de 20 mm). De plus, le capot du cristal a été spécialement usiné de sorte que l'on puisse approcher au maximum le détecteur près de la cible sans intercepter le faisceau de neutrons. Deux photos du détecteur sont présentées sur la Figure 4.1. Après avoir caractérisé son efficacité sur notre banc de test au laboratoire, il a été installé sur GRAPhEME fin 2014. L'upgrade de l'acquisition TNT a été également réalisé pour passer de 6 voies d'analyse à plus de 40 (cf. chapitre 2, Figure 2.20). La prise de données sur l'^{233}U a débuté fin 2014 jusqu'à mars 2015 et a repris en mars 2016 après le remontage de GRAPhEME suite aux travaux de rénovation des aires expérimentales de GELINA. Les données ont été accumulées jusqu'à fin 2017. La cible d'^{233}U nous a été fournie par le laboratoire des cible du JRC-Geel qui, à partir d'un échantillon métallique rectangulaire d'épaisseur 0.64 mm, a réalisé un disque de diamètre 3 cm pesant finalement 8.3 g. L'activité de cette cible est d'environ 3 GBq [103].



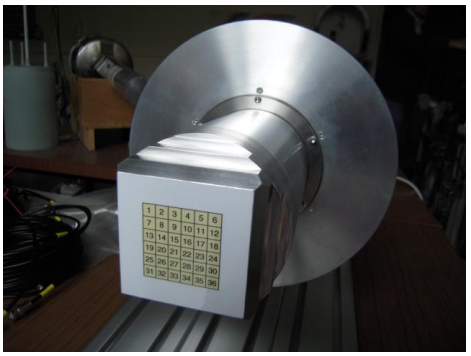


FIGURE 4.1: Photos du détecteur HPGe segmenté en 36 pixels sur son banc de test à l'IPHC (gauche) et zoom sur le capot du cristal (droite) et sa forme en escalier pour s'approcher au plus près de la cible sans intercepter le faisceau.

La Figure 4.2 illustre l'apport du détecteur segmenté pour la gestion du haut taux de comptage lié à la radioactivité de la cible. On y voit notamment le taux d'empilement pour les deux types de compteurs (HPGe Planar et Ge-segmenté). Un mono-cristal subit un taux d'empilement de près de 40% alors qu'un pixel ne voit que quelques pourcents d'événements empilés. Cela est flagrant sur les spectres en temps γ en bas à gauche de la Figure 4.2 où l'empilement creuse drastiquement le spectre avant et après le γ-flash pour un mono-cristal (spectre rouge) alors qu'il est à peine perceptible pour un pixel (spectre noir). Pour ce qui est de la résolution en énergie γ, le détecteur segmenté apporte aussi une amélioration significative. Les spectres en énergie γ, à droite de la Figure 4.2, illustrent l'excellente résolution en énergie obtenue avec les pixels (spectre supérieur) comparée pourtant au meilleur de nos détecteurs planaires mono-cristal. Cette résolution sera un atout important lors de l'identification des pics qui s'avère complexe compte tenu de la radioactivité et du niveau élevé de la section efficace de fission (production importante de γ issus de la décroissance des produits de fission). Pour illustrer la compétition entre les différentes réactions possibles sur ^{233}U et de fait, la difficulté de ce type de mesure, la Figure 4.3 présente les différentes voies de réaction pour l'^{233}U et l'^{238}U. On voit clairement que la section efficace de fission domine toute la gamme en énergie pour l'^{233}U alors que pour l'^{238}U elle est 6 fois moins importante que la section efficace de diffusion inélastique.

Aujourd'hui, l'analyse précise de données reste à faire. Cela passe tout d'abord, par le

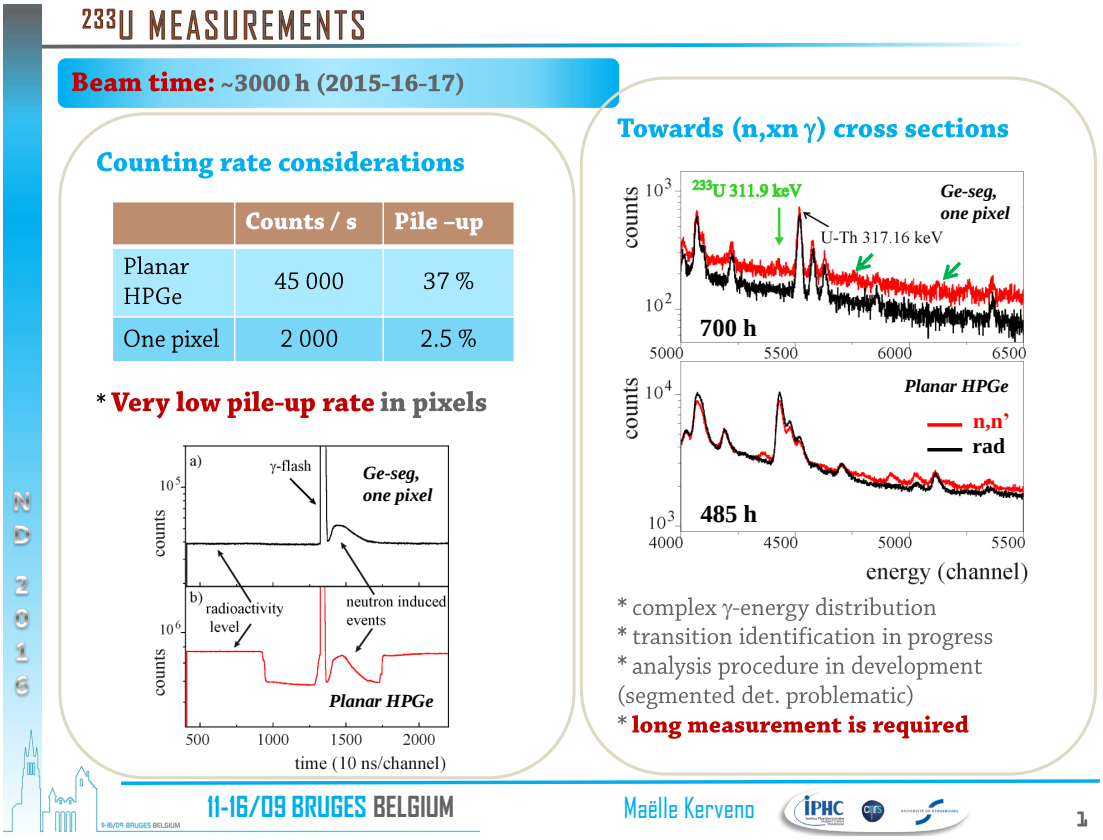


FIGURE 4.2: Illustration du gain obtenu avec le détecteur segmenté, dans le cas de l'utilisation de cibles très radioactives (ici ^{233}U), concernant le taux d'empilement et la résolution en énergie. Extrait de la présentation fait à la conférence ND2016, Bruges, Belgique.

développement des programmes d'analyse permettant la lecture de toutes les voies d'acquisition de façon la plus automatique possible pour réduire les temps de traitement. Ensuite, l'identification méticuleuse des différentes transitions observées devra être réalisée pour permettre l'extraction des sections efficaces. Compte tenu du temps d'acquisition et des lots différents (avant et après démontage/remontage de GRAPhEME), une attention particulière devra être donnée à la vérification de la stabilité des spectres et les corrections adéquates devront être apportées si nécessaire. Une première analyse préliminaire, sur 867 heures de faisceau et pour 8 pixels sommés, montre les premières transitions (n,n' γ) et (n,2n γ) qui apparaissent (cf. Figure 4.4).

La prise de données sur ^{233}U étant maintenant terminée, le prochain défi à relever est celui de la mesure des sections efficaces (n,xn γ) sur le ^{239}Pu. Dans ce cas, la situation est encore plus complexe que pour ^{233}U puisque la période du ^{239}Pu est $\sim$7 fois plus petite que celle de l'^{233}U. Au niveau de la compétition des voies de réaction, la situation

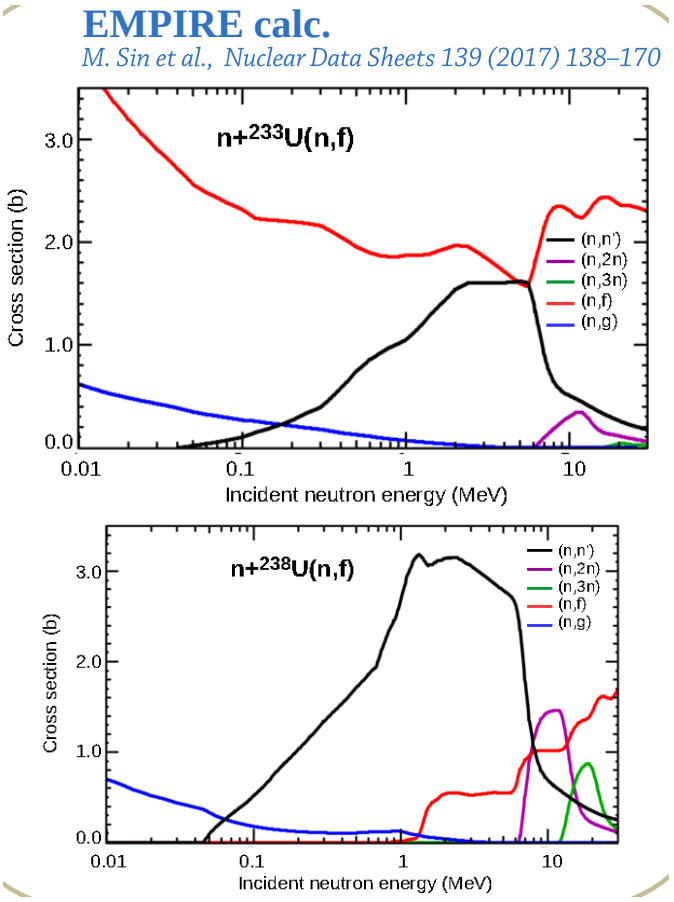


FIGURE 4.3: Sections efficaces des différentes voies de réactions possibles entre 0 et 30 MeV calculées par le code de réaction nucléaire EMPIRE pour l'uranium 233 et 238.

est sensiblement la même que pour ^{233}U comme les sections efficaces le montrent sur la Figure 4.5 à droite. La figure de gauche montre l'état des connaissances expérimentales pour les réactions inélastique et (n,2n) comparé à l'état de l'art des évaluations. Pour la réaction (n,n'), deux mesures, datant des années soixante, existent et exploitaient les méthodes utilisant des détecteurs liquides scintillants ou la mesure de la transmission à travers une sphère. Pour ce qui concerne la réaction (n,2n), une demi douzaine de mesures sont référencées dans la base de données EXFOR. Les plus anciennes ont été réalisées avec des détecteurs liquides scintillants (ex. [123]). Les deux plus récentes, réalisées au début des années 2000 utilisent deux techniques très différentes. La première [124] est une mesure d'irradiation d'une cible de ^{239}Pu qui est ensuite dissoute et subit une séparation chimique permettant de séparer l'isotope d'intérêt. Une mesure de spectroscopie γ et α "off-line" du ^{238}Pu est alors réalisée et la section efficace (n,2n) déduite. La seconde mesure [84], réalisée à LANSCE (LANL, US) utilise, quant à elle, la méthode de la spectroscopie γ prompte avec le détecteur GEANIE. Quatre transitions dans le ^{238}Pu

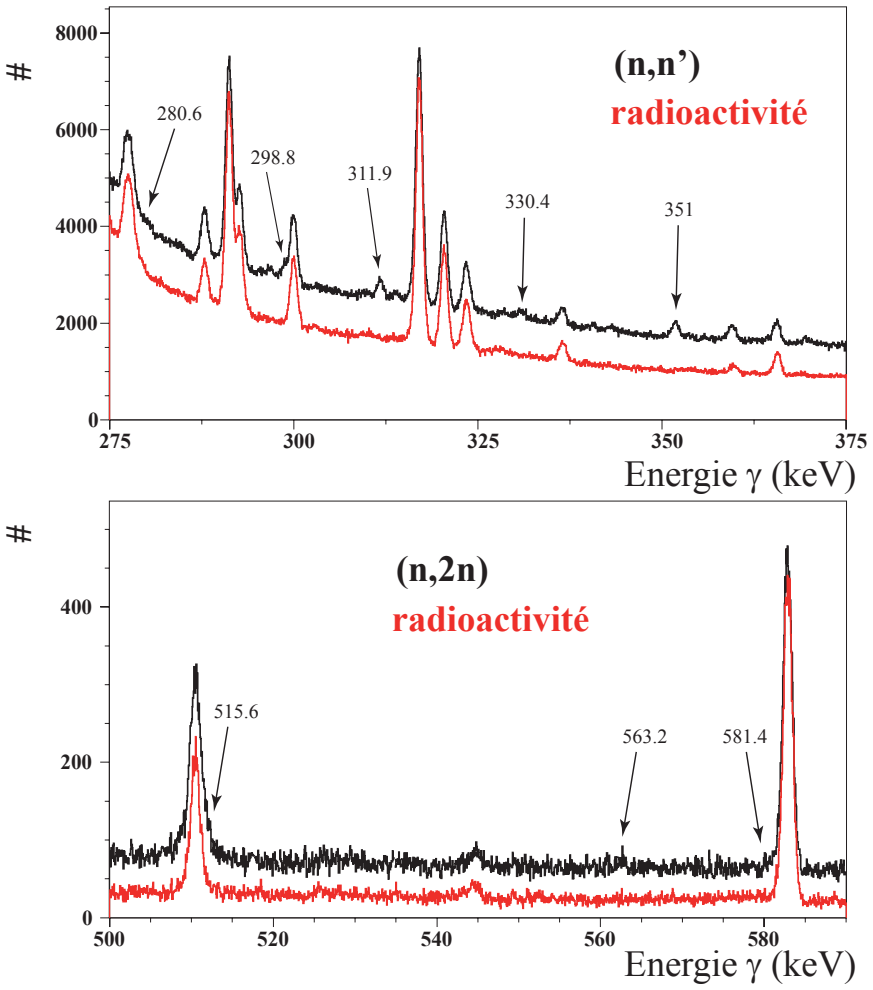


FIGURE 4.4: Portions du spectre γ enregistré avec 8 pixels du détecteur segmenté, pour une cible d'^{233}U et après 867 heures de faisceau. Les différentes distributions correspondant à des fenêtres en temps relatives aux domaines de la radioactivité (rouge), des réactions (n,n') (noir-haut) et des réactions (n,2n) (noir-bas).

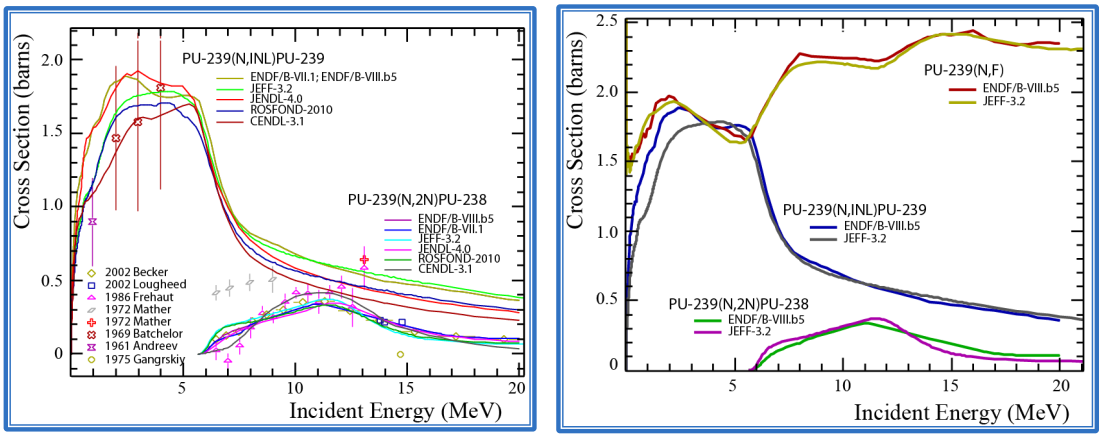


FIGURE 4.5: Droite : Sections efficaces évaluées (ENDF et HEFF) des différentes voies de réactions possibles sur ^{239}Pu, (n,f), (n,n') et (n,2n), entre 0 et 20 MeV. Gauche : Sections efficaces, évaluées et expérimentales, des réactions ^{239}Pu(n,n') et (n,2n).

sont observées et les sections efficaces partielles (n,2n γ) sont ensuite combinées au code GNASH pour déduire la section efficace totale (n,2n). Notre prochaine mesure pourra donc se comparer directement avec cette mesure de nos collègues américains. L'enjeu primordial dans cette expérience est la qualité de l'échantillon qui doit être dépourvu d'impureté et spécialement de ^{241}Pu ($T_{1/2}$=14.329 y) dont la décroissance vers l'^{241}Am ($T_{1/2}$=432.6 y) produit un gamma de 60 keV très intense. Le laboratoire des cibles de l'EC-JRC Geel, est en possession de lots de poudre de PuO2 contenant plus de 99.75% de ^{239}Pu. Un tel pourcentage nous permet d'obtenir des cibles avec une contamination en ^{241}Am très réduite. Pour exemple, la Figure 4.6, extraite de [84], montre deux distributions en énergie γ obtenues lors de la campagne GEANIE où l'on peut constater la difficulté d'extraire les pics d'intérêt (ici ceux du ^{238}Pu) de la forêt de pics provenant de la radioactivité. Après discussion avec le service des cibles de l'EC-JRC Geel, il leur est possible de nous fournir une cible de PuO2 contenant 2 g de ^{239}Pu, d'un diamètre de 30 à 40 mm et avec une épaisseur minimisant l'absorption des gamma de 40 keV (environ 0.8 mm). Une proposition d'expérience a donc été déposée auprès de EUFRAT et nous espérons pouvoir réaliser les premiers tests à l'automne 2018. Avant cela, nous prévoyons le changement du système d'acquisition TNT2, devenu obsolète, par le système FASTER [125] ce qui nécessitera de nouveau le développement des programmes de lecture de données. Ce nouveau système d'acquisition digitale est développé au LPC Caen et peut être couplé à une grande variété de détecteurs. Dans notre cas, nous utiliserons des cartes MOSAHR qui dispose d'une dynamique de 14 bits et une fréquence d'échantillonnage de 125 MHz.

Ces deux projets, mesures sur ^{233}U et ^{239}Pu, vont donc nous occuper grandement ces prochaines années car l'analyse de données s'annonce complexe et les interactions avec nos collègues théoriciens et évaluateurs seront aussi de première importance. Nous avons d'ailleurs élaboré un sujet de thèse commun CNRS, CEA/DEN et DAM pour l'analyse, la modélisation et l'évaluation de ces données nucléaires, chaque équipe apportant son expertise et ses compétences dans chacun des domaines. Ce sujet de thèse a été très bien perçu par la direction du CEA et nous avons obtenu un financement "amont-aval" du CEA/DEN. Le prochain défi sera donc de recruter un bon étudiant pour effectuer ce travail.

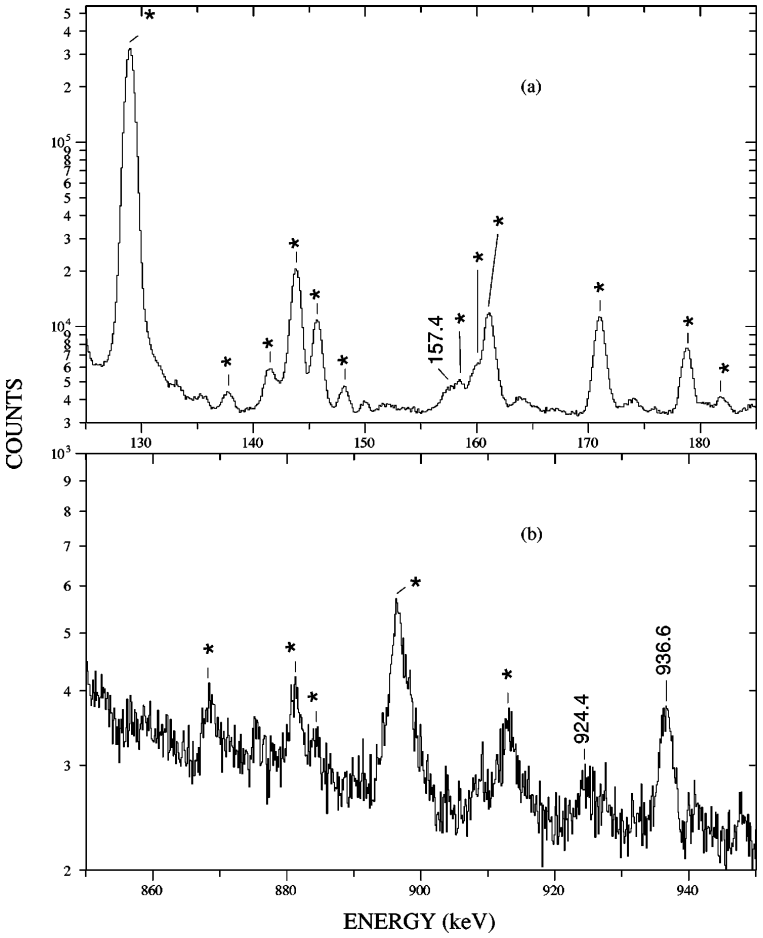


FIG. 1. LEPS spectrum for $E_n = 11.37(45)$ MeV in the γ-ray energy region near the ^{238}Pu yrast $6^+ \rightarrow 4^+$ (top) and the 4_1^- ($E_x = 1083$ keV)$\rightarrow 4^+$ (bottom) transitions. γ rays arising from target radioactivity are marked by an asterisk (*). (n,2n) reaction γ-rays are labeled with their energies.

FIGURE 4.6: Distributions en énergie γ (E_n=11.35 MeV obtenues lors de la campagne GEANIE). Les pics marqués d'une étoile correspondent à la radioactivité et ceux des transitions γ dans ^{238}Pu sont repérés par leur énergie.

4.1.2 Le cas des transitions des niveaux de basse énergie

Comme cela a été évoqué dans les deux chapitres précédents, une des faiblesses de la méthode de la spectroscopie γ prompte, telle que nous la mettons en œuvre avec GRAPhEME, concerne la détection de la décroissance des premiers niveaux à faible énergie d'excitation. Cette décroissance s'effectue principalement par émission d'électrons de conversion et la voie γ est ainsi réduite. Ce rapport est d'autant plus défavorable que le Z du noyau est élevé. Par exemple, dans le cas de l'uranium 238, le premier niveau excité se situe à 44.916 keV et le coefficient de conversion interne α est de 609.8, cela signifie que sur 100 décroissances seulement 0,16 s'effectuent via l'émission d'un gamma.

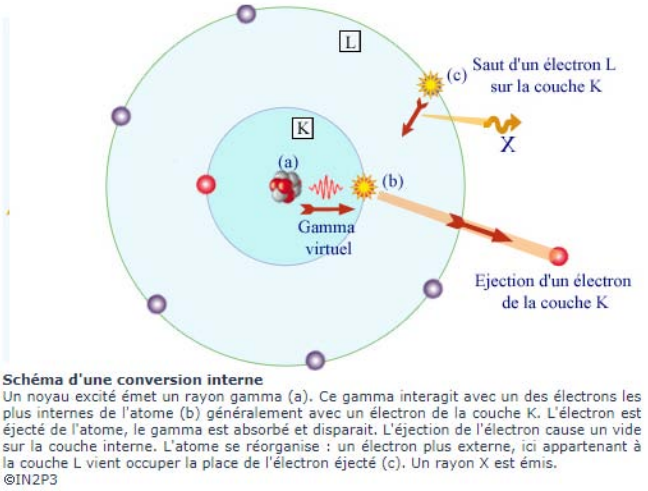


FIGURE 4.7: Principe de la conversion interne. Source http ://www.laradioactivite.com.

Compte tenu des autres contraintes expérimentales sur la détection des γ de faible énergie déjà exposées précédemment (haut bruit de fond dû aux diffusion (n,n') sur le Ge et problème de linéarité de la réponse du CFD), il paraît intéressant de se pencher sur la question de la détection des électrons de conversion. Une première étude avait montré qu'un gain d'un facteur jusqu'à 8-10, selon l'efficacité de détection considérée, par rapport à la détection γ pouvait être attendu dans l'étude de l'émission des électrons de conversion interne. Ces particules, comme leur nom l'indique, proviennent de l'interaction d'un "gamma de désexcitation" avec un électron des couches profondes du cortège électronique qui est alors éjecté de son orbite (cf. Figure 4.7). L'énergie de cet électron est bien définie et est égale à l'énergie initiale du gamma moins l'énergie de liaison de l'électron. La probabilité d'éjecter un électron est plus grande pour les couches proches du noyau (K, L, ...). La désexcitation d'un niveau par électron interne pourra donc se faire via l'émission d'électrons de différentes énergies selon la couche atomique mise en jeu. Une fois l'électron émis, il y a réarrangement du cortège électronique avec émission de rayons X et/ou émission d'électrons Auger. Bien que l'énergie de l'électron de conversion soit bien définie, il n'est pourtant pas aisé de mesurer la section efficace associée à la désexcitation du niveau car cet électron est accompagné d'un nombre important d'autres électrons provenant de différents mécanismes. En effet, de nombreux électrons sont émis via les processus de décroissance radioactive. Par exemple, la figure 4.8 montre la distribution en énergie des électrons et des photons issus de la radioactivité d'un échantillon d'uranium 238 (caractéristiques de l'échantillon considéré, voir paragraphe "le dispositif

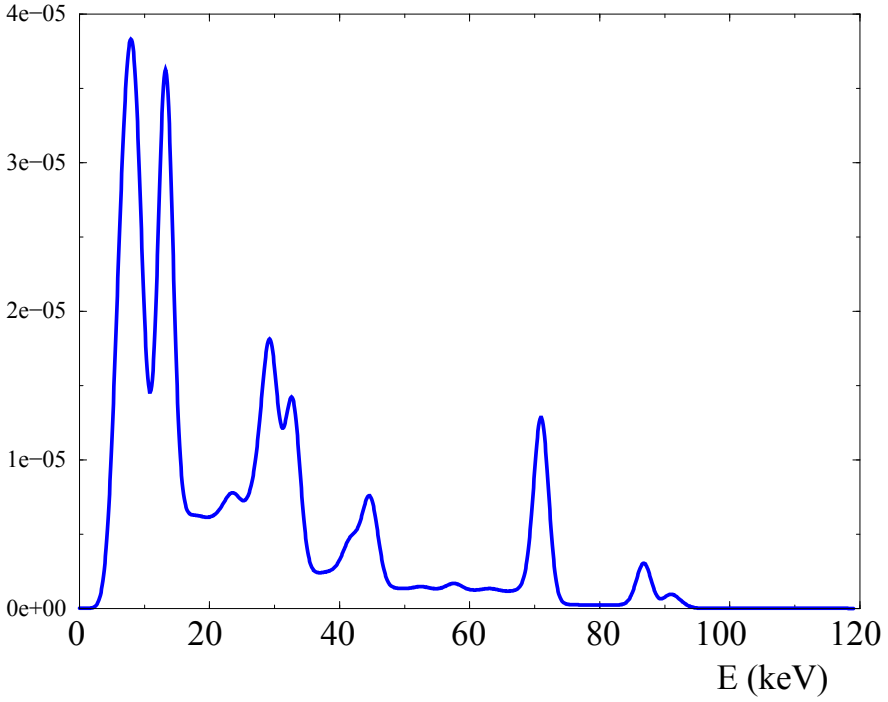


FIGURE 4.8: Distribution en énergie des principaux électrons et photons issus de la radioactivité de l'uranium 238 simulée avec MCNPX.

DELCO").

Les niveaux d'énergie d'excitation supérieure peuvent aussi contribuer, dans une moindre mesure, à l'émission d'électron de conversion interne ce qui complexifie aussi le spectre d'émission. La connaissance de la désexcitation des premiers niveaux d'excitation étant très importante pour la méthode de la spectroscopie γ prompte, il nous a paru néanmoins pertinent d'explorer cette voie des électrons de conversion même si cette mesure s'avère très difficile. Nous avons donc proposé une action dans ce sens au sein du projet Européen EURATOM-FP7 CHANDA et avons obtenu un financement pour étudier la faisabilité d'une telle mesure sur l'uranium 238. Avant de présenter le dispositif en cours de tests et les suites possibles de ce projet, je rappelle les conditions essentielles que le dispositif doit remplir pour relever le défi de la détection des électrons de conversion provenant de la désexcitation des premiers niveaux de l'uranium 238. En premier lieu, compte tenu des énergies mises en jeu (énergie d'excitation du premier niveau dans l'uranium - 44.9 keV et énergie de liaison de l'électron dans la couche L - 21.76 keV), le système devra être capable de détecter des électrons d'énergie de l'ordre d'une vingtaine de keV, ce qui implique un très faible seuil de détection et donc un faible bruit électronique à basse énergie. En second lieu comme mentionné précédemment, de nombreux électrons

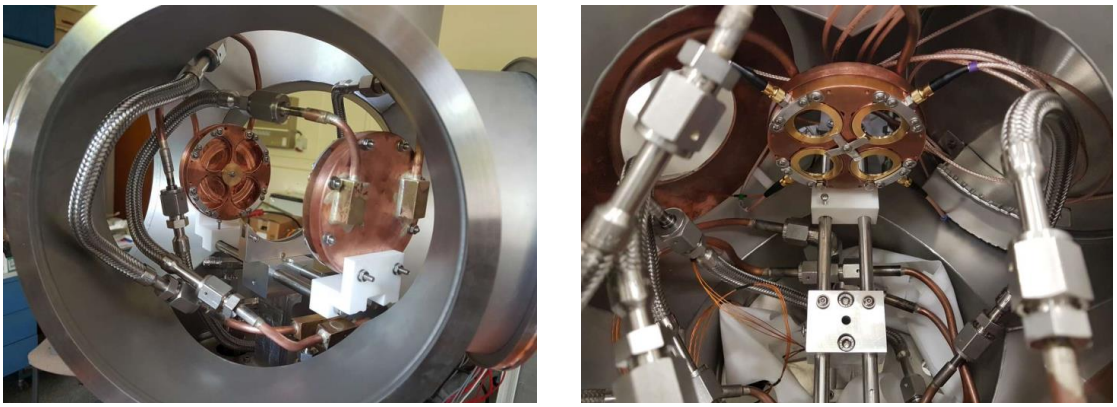


FIGURE 4.9: Photo de l'intérieur de la chambre de DELCO avec les supports des détecteurs (gauche) et les détecteurs insérés (droite).

en plus de ceux d'intérêt sont émis et donc la résolution en énergie doit être de l'ordre de quelques 100 eV pour permettre une bonne séparation. Enfin, comme les électrons émis ont une faible énergie, l'épaisseur de la cible d'uranium doit être aussi mince que possible pour limiter leur absorption.

Le dispositif DELCO

En partant des contraintes ci dessus, notre collaboration (IPHC, EC-JRC-Geel, IFIN) a commencé la mise au point du dispositif DELCO (Detector for ELectrons from internal Conversion (Eng.), Detecteur pour Electrons de COnversion (Fr.) ou Detector pentru ELectroni de COnversie (Ro.)). Ce dispositif comprend une chambre à réaction capable d'accueillir plusieurs détecteurs au silicium refroidis par un système (LAUDA) à l'éthanol (-40°C) pour limiter le bruit électronique. Des vues de l'intérieur de la chambre sont présentées sur la Figure 4.9 où l'on distingue à gauche les supports pouvant accueillir 4 détecteurs Si chacun et qui sont montés de part et d'autre de la cible. La photo de droite montre les détecteurs dans leur support. On distingue également les tubes permettant la circulation du fluide réfrigérant. La cible d'uranium 238 a été fabriquée par le laboratoire des cibles du EC-JRC-Geel. Deux films d'oxyde d'uranium 238 (99,999% de ^{238}U, diamètre 80 mm et masse 7.25 mg) ont été déposés sur chaque face d'un support en aluminium de 0.025 mm d'épaisseur. Le système est actuellement en cours de tests pour caractériser les performances des détecteurs et de l'électronique associée. Les premiers résultats obtenus avec des détecteurs silicium (ORTEC) de surface 450 mm^2 et une épaisseur de déplétion de 100 μm couplés à une électronique Mesytec, montrent

que nous ne pouvons atteindre les résolutions attendues et qu'un bruit électronique est encore présent malgré une optimisation de toute la chaine. Des tests ont été effectués avec plusieurs autres détecteurs Silicium (épaisseurs variant de 300 à 5000 μm) et différents pré-amplificateurs afin de caractériser au mieux la chaîne détecteur-amplificateur optimale. Parallèlement à ces tests, des simulations MCNPX du dispositif et des mesures en source ont également été réalisées pour pouvoir comprendre au mieux les spectres mesurés. Les derniers tests réalisés à Geel avec un détecteur Silicium (300 mm^2 et 300 μm d'épaisseur) et un pré-amplificateur refroidis ont montré les meilleurs performances. La distribution en énergie obtenue pour 20 h de temps d'acquisition est présentée sur la figure 4.10 qui doit être comparée au spectre simulé de la figure 4.8. On note que les transitions autour de 30 keV ne sont pas visibles. Par ailleurs, le comportement à basse énergie (en dessous de 20 keV) pose question. Ces deux observations n'ont pas trouvé, à ce jour, d'explication satisfaisante. Ces premiers résultats donnent finalement une idée du chemin encore à parcourir pour réaliser une mesure des électrons de conversion issus de la décroissance du niveau à 44.9 keV de l'^{238}U. Il faudra notamment assurer une résolution de l'ordre de 200 eV à 20-40 keV et un environnement expérimental (bruit électromagnétique) le plus propre possible pour limiter les parasites dans la chaine de l'électronique. Des discussions avec l'entreprise MIRION sont en cours pour définir un système cristal-pré-amplificateur optimum pour ce type de mesure.

Une autre piste ?

La mesure des électrons de conversion étant un vrai défi expérimental sans garantie de réussite aujourd'hui, une autre piste pourrait aussi être explorée avec GRAPhEME. En effet, nous avons vu que la détection des gammas de faible énergie était très pénalisée par le fort bruit de fond provenant des diffusions des neutrons dans l'air et par le recul des noyaux de Ge qui produit un signal de faible énergie. L'idée serait donc de minimiser l'interaction des neutrons dans l'air avant la cible en ajoutant un tube faisceau sous vide. Une autre piste est l'exploitation de la différence de forme des signaux provenant de l'interaction d'un gamma avec le germanium et celle du recul des noyaux de germanium. Ces pistes seront explorées à la fin de l'année lors de l'upgrade de GRAPhEME.

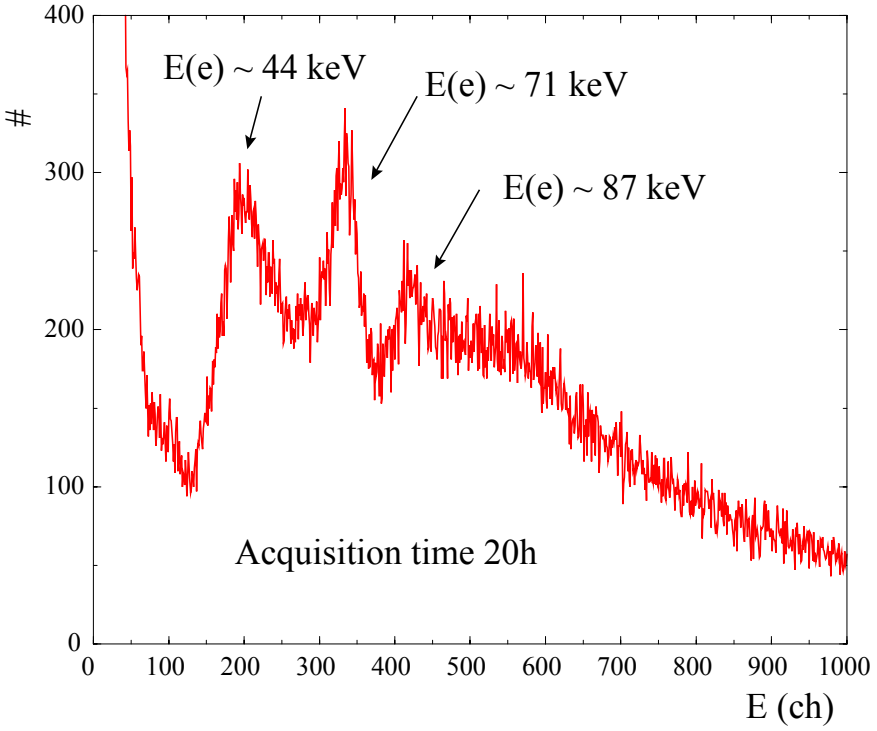


FIGURE 4.10: Distribution en énergie, issue de la radioactivité de l'échantillon d'uranium, mesurée pendant 20 h de temps d'acquisition.

4.1.3 Les mesures de structure : une question ouverte

Lors des analyses de données des mesures sur les noyaux étudiés avec GRAPhEME, il est apparu que les informations de structure étaient parfois parcellaires ou contradictoires entre différentes sources de fichiers. Les rapports d'embranchement ne sont, pour certaines transitions, pas connus ou des niveaux d'excitation ne sont pas répertoriés ou répertoriés à tord. Il apparaît donc que l'analyse de nos données nécessite un travail de bibliographie préliminaire pour qualifier la connaissance des informations de structure pour chaque noyau. Cet aspect est aussi très important, nous l'avons vu dans le chapitre précédent, pour les aspects de modélisation des réactions (n,xn). Nous avons déjà identifié quelques failles pour l'uranium 238 ou le thorium 232. La question se pose alors pour les noyaux moins bien connus comme l'uranium 233 ou 232 pour lesquels les schémas de niveaux sont bien moins fournis que pour d'autres noyaux. Je souhaiterais donc, prochainement, regarder ces aspects de plus près dans le but d'engager si nécessaire de nouvelles mesures de structure pour des noyaux importants du cycle électronucléaire. Cela pourrait être envisagé avec des équipements existants et déjà optimisés pour ce type de mesures, ce qui nécessiterait de se rapprocher des communautés de structure nucléaire. Le couplage

des spectromètres GAINS et GRAPhEME pourrait également être réalisé pour effectuer ce type de mesures.

4.2 SPIRAL2/NFS : les réactions (n,2n) sous les projecteurs

Au début des années 2000, le projet d'une nouvelle installation française, pour étendre les capacités de production de noyaux exotiques, a vu le jour. Ce projet, appelé SPIRAL2, fait suite à l'ensemble de production de noyaux radioactifs GANIL-SPIRAL1. Dans sa phase 1, SPIRAL2 délivrera des faisceaux très intenses d'ions lourds et de neutrons. Dans la phase 2, une grande variété d'ions radioactifs, pour des masses comprises entre 60 et 140, pourra être produite, à forte intensité, via la technique ISOL.

Pour l'étude des réactions (n,xn) et particulièrement les réactions (n,2n) et (n,3n), le faisceau de neutrons envisagé à SPIRAL2 semblait très adapté. G.Rudolf a donc, dès 2004, fait des propositions d'expériences possibles auprès de cette nouvelle installation NFS (Neutron For Science). Nous nous sommes ensuite engagés dans la collaboration et avons été impliqués dans les différentes discussions qui ont permis de définir les principales caractéristiques de l'installation en prenant en compte les besoins des physiciens expérimentateurs. De plus, nous avons pris des responsabilités dans la construction proprement dite de l'installation via le service de mécanique de l'IPHC et nous avons eu en charge plusieurs études. De 2010 à 2012, le bureau d'étude s'est penché sur la caractérisation de l'échauffement du convertisseur (C ou Be) au passage du faisceau de deutons afin de vérifier que le dépôt de puissance dans le convertisseur tournant ne faisait pas fusionner celui-ci. Nous avons eu aussi en charge l'étude de l'arrêt faisceau (des particules chargées) de NFS. Sur ces sujets, différents stagiaires provenant de l'IUT (spécialité mesures physiques) ou de l'INSA ont été encadrés par le bureau d'études. Ensuite, nous avons pris en charge l'étude, le design et la construction d'une part de la ligne du faisceau de neutrons et d'autre part, du second collimateur et son blindage permettant la réalisation d'expérience à long temps de vol (cf. section suivante). L'étude du second collimateur a fait l'objet de deux stages M2 que j'ai encadrés. Du point de vue de la physique, nous avons déposé une LoI (lettre d'intention) dès 2009 qui concernait la comparaison des

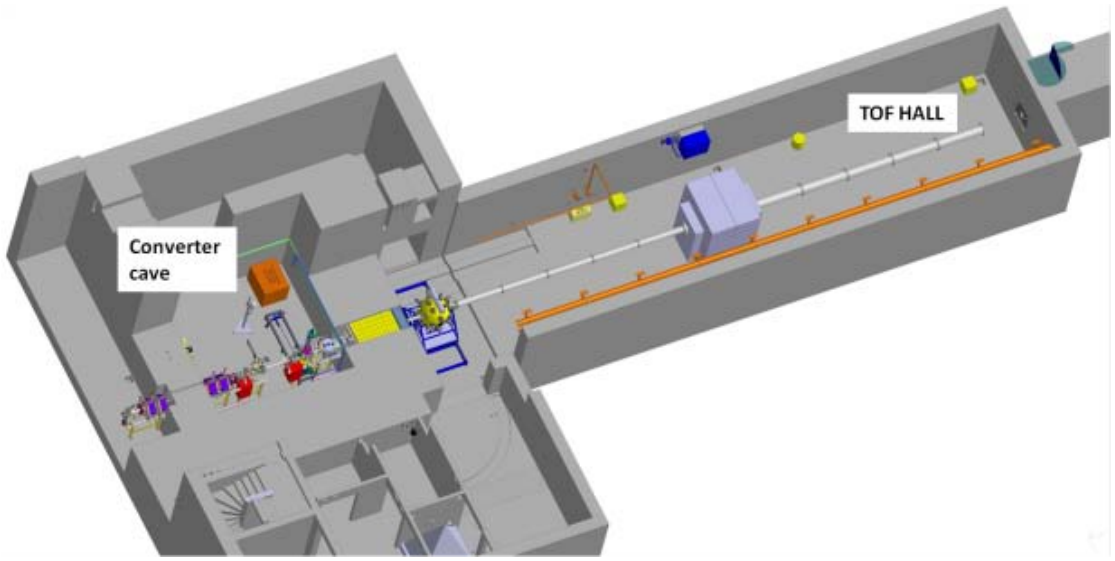


FIGURE 4.11: Schéma de l'installation NFS où les salles du convertisseur et du temps de vol sont visibles.

méthodes de l'activation et de la spectroscopie γ prompte pour mesurer les sections efficaces de réactions (n,xn) (cf. section 4.2.2). Enfin, nous envisageons un programme de mesures des réactions (n,2n γ) sur les actinides auprès de NFS (cf. section 4.2.3).

4.2.1 L'installation NFS

Le LINAC de l'installation SPIRAL2 a pour vocation d'accélérer des faisceaux à des énergies intermédiaires. En particulier, il accélèrera, à une fréquence de 88 MHz, des deutons jusqu'à 40 MeV et des protons jusqu'à 33 MeV. Ces particules sont envoyées dans l'aire expérimentale NFS de SPIRAL2 [126] qui est composée de deux parties comme le montre la Figure 4.11. La première partie est la salle dite du convertisseur, les neutrons y sont produits par l'interaction soit, de protons avec du ^{7}Li, soit de deutons avec du carbone ou du Béryllium. Dans cette salle est aussi installé un dispositif d'irradiation. La seconde salle, séparée par un mur de 3 m d'épaisseur de la salle du convertisseur, est la salle du temps de vol longue de 28 m et pouvant accueillir les expériences de mesures en neutrons induits. Le faisceau de neutrons, produit dans la salle du convertisseur, est aussitôt collimaté (par un collimateur inséré dans l'épais mur de séparation) avant d'entrer dans la salle de temps de vol. En fonction des particules chargées incidentes et du convertisseur, les flux et spectres de neutrons obtenus sont différents. Dans le cas des convertisseurs épais, comme le Béryllium ou le carbone, un faisceau blanc est

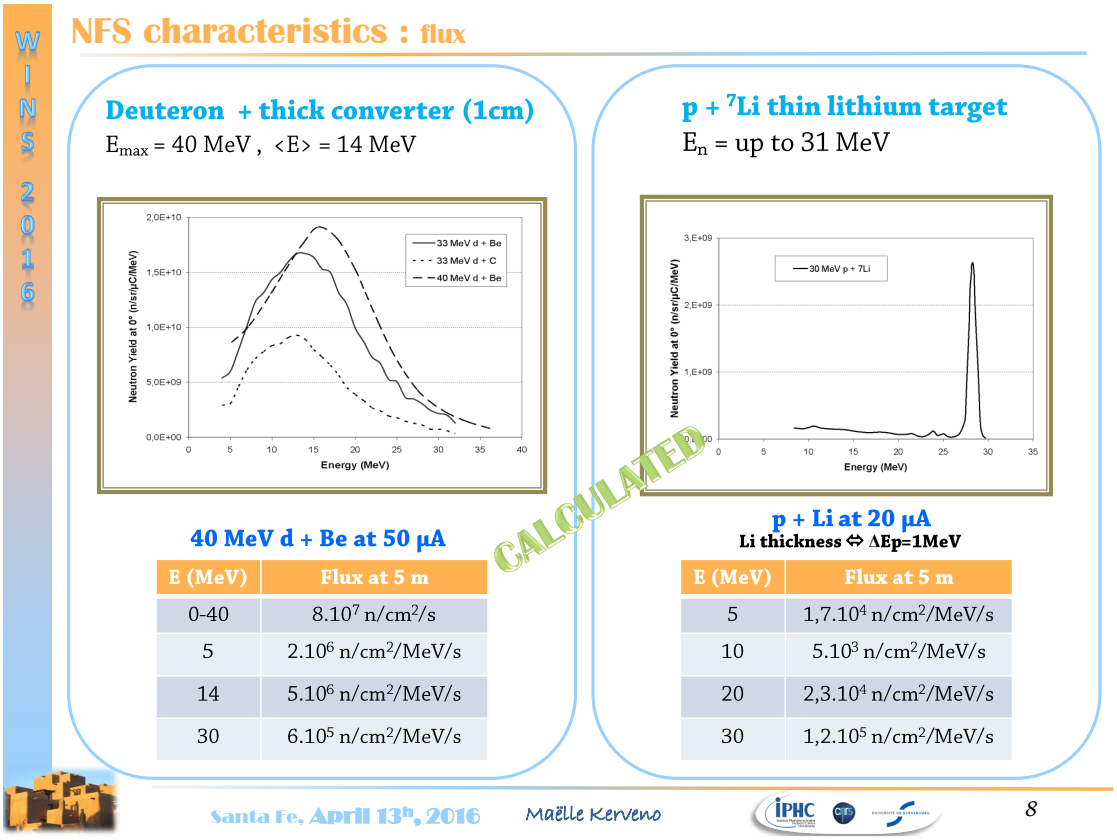


FIGURE 4.12: Caractéristiques des différents faisceaux de neutrons pouvant être produits à NFS.

produit et une énergie neutron moyenne de 14 MeV est atteinte (E_{max}=40 MeV). Avec un convertisseur fin au Lithium, le spectre de neutrons est dit "quasi-monoénergétique" et piqué autour de l'énergie des protons incidents. L'énergie neutron maximale pouvant être atteinte est de 31 MeV. La Figure 4.12 résume et illustre les différents flux et spectres de neutrons pouvant être produits à NFS. L'énergie du faisceau de neutrons que délivrera l'installation NFS est donc parfaitement adaptée à l'étude des processus (n,2n) et (n,3n). Pour pouvoir mettre en œuvre la méthode de la spectroscopie γ prompte en utilisant les spectromètres GAINS et GRAPhEME à NFS, plusieurs aménagements, conditionnés par la réalisation de mesures de temps de vol, sont nécessaires. Comme le montre la Figure 4.13, la fréquence primaire du faisceau de particules chargées (88 MHz) ne permet pas de réaliser des mesures de temps de vol sans que les bouffées de neutrons ne se chevauchent d'un burst à l'autre. Une réduction de la fréquence est donc nécessaire et un réducteur de paquet a été conçu pour réduire cette fréquence d'un facteur 100 à 10 000. Un autre aspect important concerne la définition spatiale du faisceau de neutrons, spécialement pour les mesures à longue distance. En effet, le faisceau de neutrons est une

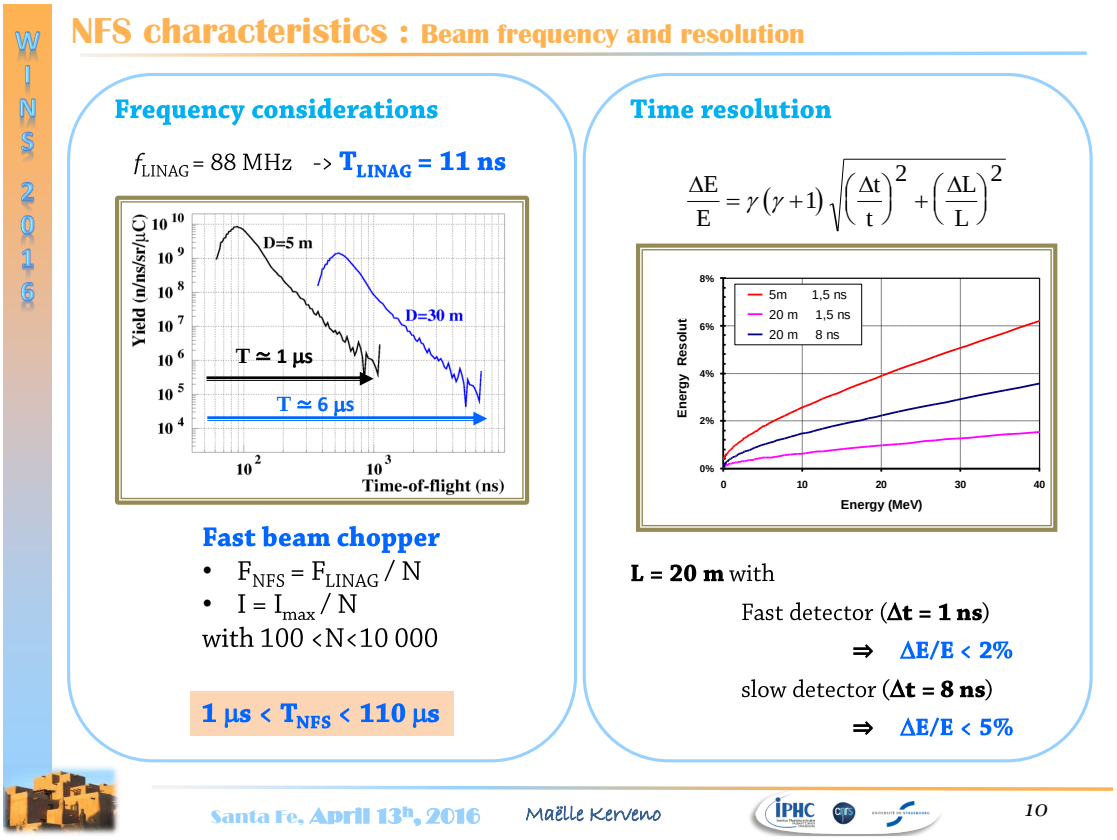


FIGURE 4.13: Fréquences du faisceau et résolutions en temps et en énergie accessibles à NFS.

première fois collimaté à la sortie du mur de séparation des 2 salles puis se disperse de nouveau tout au long de la salle de temps de vol, comme le montre la Figure 4.14. Les simulations présentées sur la figure ont été réalisées avec le logiciel MCNPX-2.6. A la sortie du premier collimateur le faisceau possède un diamètre de 3.2 cm mais 25 m plus loin, le diamètre est déjà de 20 cm. De plus, on voit sur cette figure le bruit de fond généré par l'interaction des neutrons dans l'air. Ces conditions ne sont alors pas acceptables pour réaliser des expériences à long temps de vol. L'obtention d'un hall d'expérience "propre" (bruits de fond γ et neutron minimisés) et d'un faisceau de neutrons bien défini spatialement tout au long du hall, passe par la mise en place d'une ligne faisceau sous vide et d'un second système de collimation à mi-parcours. Etant tributaires de ces aménagements pour pouvoir réaliser nos expériences à long temps de vol, nous avons pris en charge, à l'IPHC, l'étude, le design et la construction de la ligne, sous vide primaire, du faisceau de neutrons et du second collimateur et son blindage. La ligne a été installée à NFS au début de l'année 2018 (cf. Figure 4.15). L'apport de la ligne sous vide par rapport au bruit de fond généré dans le hall est montré sur la Figure 4.16

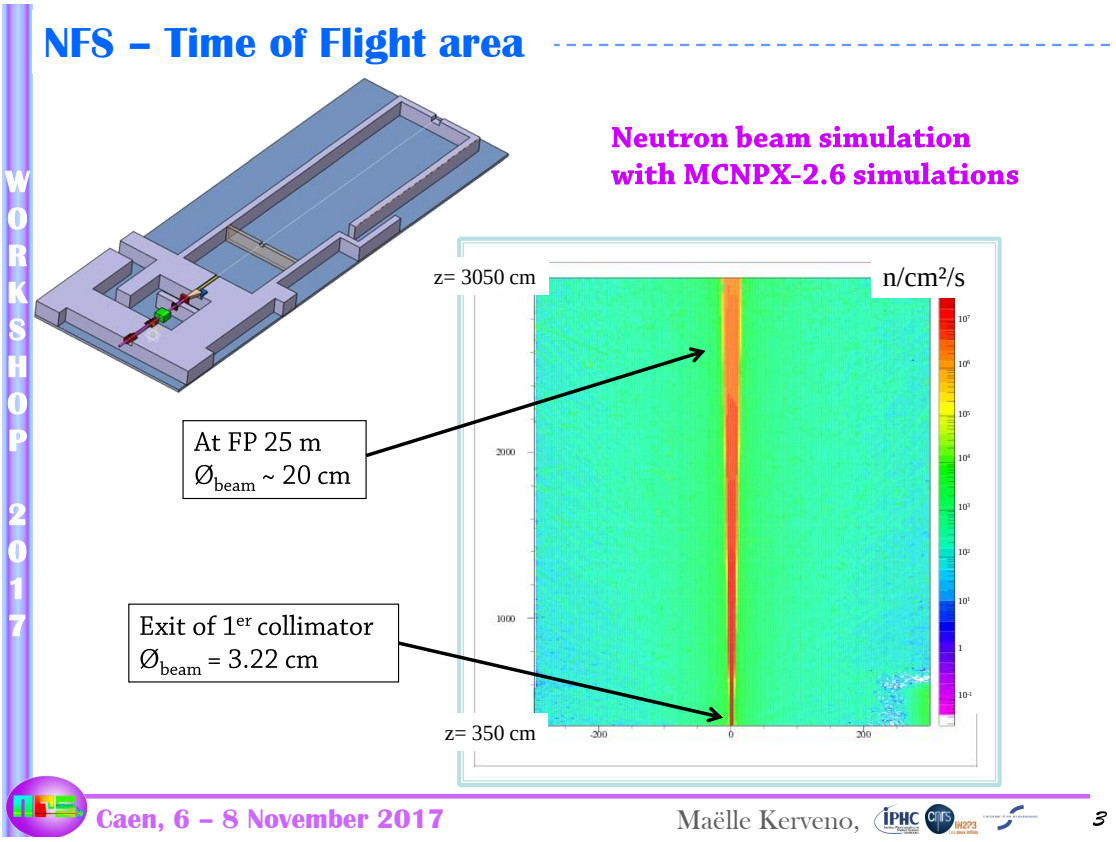


FIGURE 4.14: Simulation MCNPX-2.6 du faisceau de neutrons de l'installation NFS, de la sortie du premier collimateur (z=350 cm) et tout au long de la salle de temps de vol.

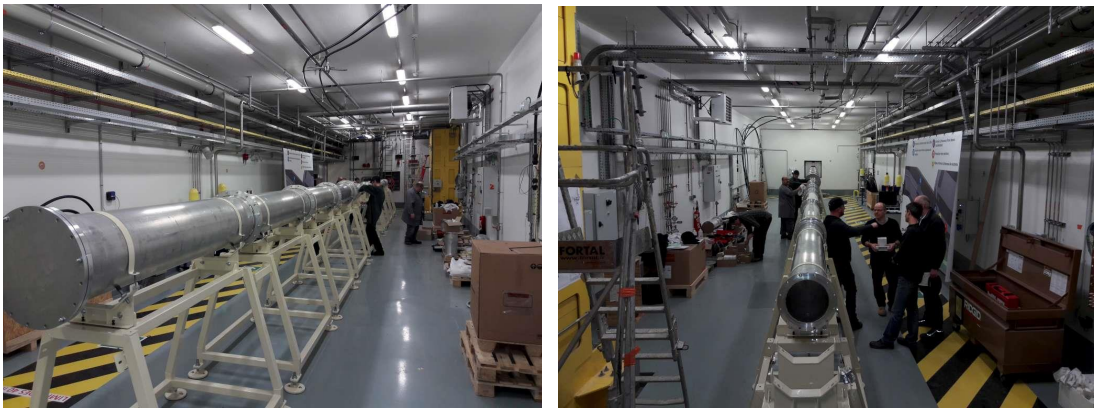


FIGURE 4.15: Photos de la ligne faisceau, conçue et construite à l'IPHC, une fois installée dans la salle temps de vol de NFS.

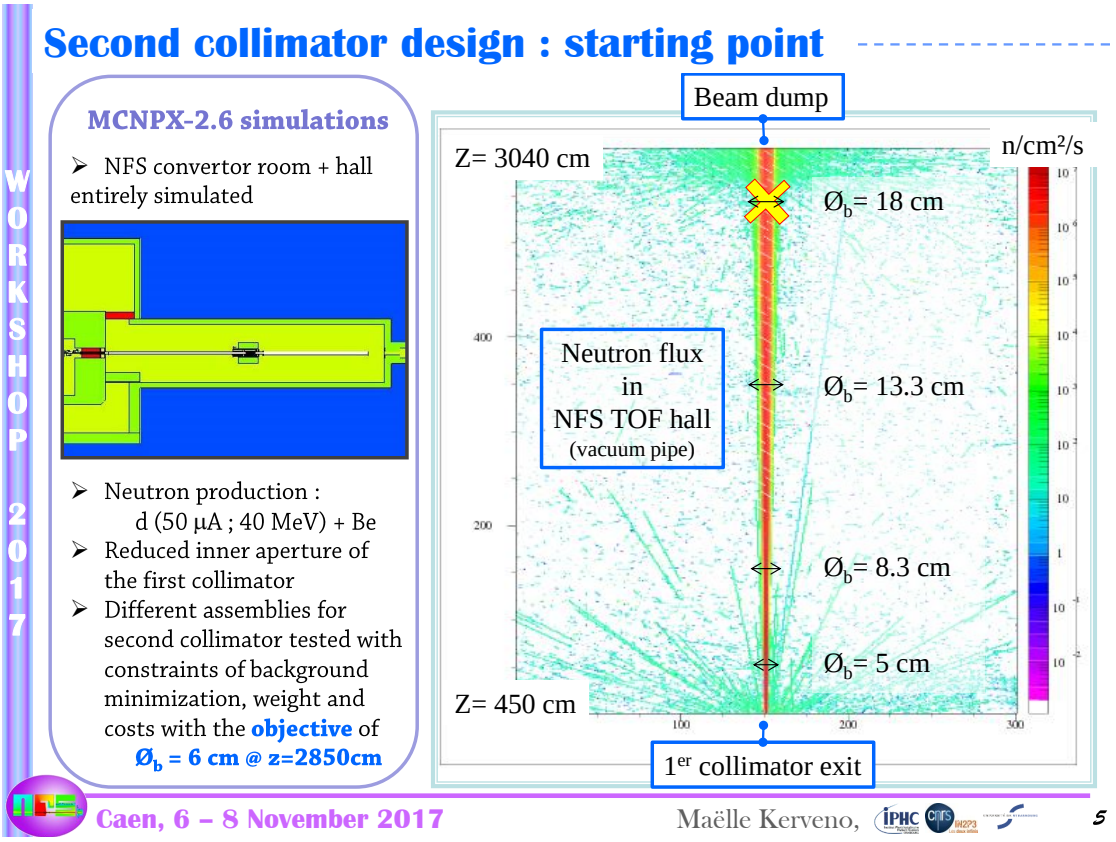


FIGURE 4.16: Simulation MCNPX-2.6 de la ligne sous vide du faisceau de neutrons (à droite). A gauche, définition des paramètres initiaux pour la simulation MCNPX-2.6 du second collimateur.

qui présente la simulation MCNPX de la ligne sous vide du faisceau de neutrons. On voit bien la réduction du bruit de fond dans le hall et autour du faisceau de neutrons. On voit également apparaitre, alors, le fond provenant du premier collimateur et de l'arrêt faisceau installé dans le mur du fond de la salle. La Figure 4.16 explicite aussi les conditions expérimentales cibles que nous nous sommes fixées pour définir la composition et la géométrie du second collimateur et son blindage ainsi que les paramètres initiaux de la simulation. Un diamètre de faisceau égal à 6 cm est compatible avec des mesures sur cibles d'actinides (comme nous le faisons à GELINA) à ∼28 m de la source.

Pour pouvoir réduire la taille du faisceau de neutrons, la seule façon de procéder est d'intercepter les neutrons périphériques. Pratiquement, les neutrons rencontrent un cylindre percé composé d'un matériau à Z plutôt élevé pour les ralentir et ils sont, dans un second temps et une fois l'énergie thermique atteinte, capturés par un matériau absorbant. La Figure 4.17 montre le schéma du second collimateur et le principe de la superposition des matériaux pour ralentir et absorber les neutrons. Dans l'encart, en bas à gauche, on voit

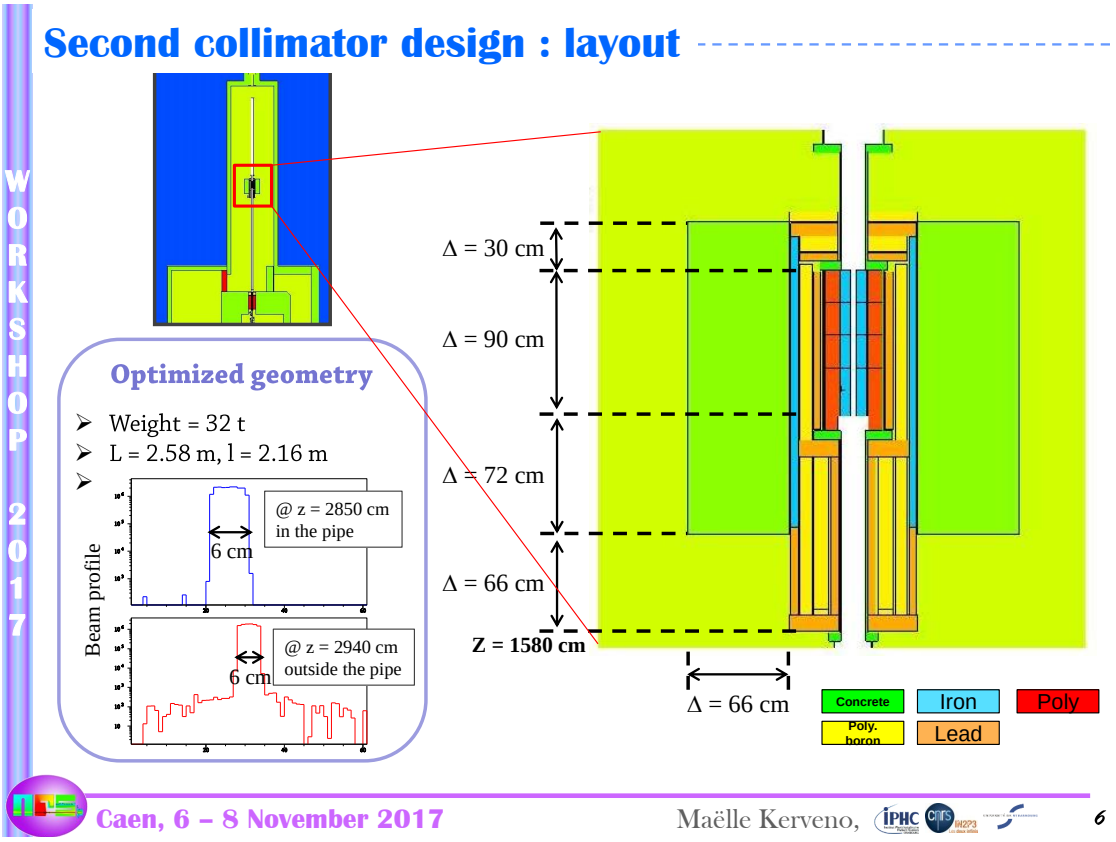


FIGURE 4.17: Schéma du second collimateur et de son blindage tels qu'ils sont simulés avec MCNPX-2.6. L'encart en bas à gauche montre le profil du faisceau obtenu alors à une distance de 28.5 m de la source de neutrons et juste après la fin de la ligne sous vide.

alors le profil du faisceau de neutrons dans le tube faisceau qui a été réduit de ∼18 cm à 6 cm à 28 m de la source de neutrons. On voit également l'effet du vide sur la définition du profil puisque 1 m plus loin, hors du vide, le faisceau s'accompagne d'un halo non négligeable dû aux diffusions des neutrons dans l'air. Malheureusement, les matériaux ralentisseurs et absorbant du collimateur ne suffisent pas à contenir toutes les particules secondaires créées. Il est alors nécessaire de blinder le système de collimation avec du béton pour minimiser le bruit de fond γ et neutron généré par le collimateur. La Figure 4.18 montre le résultat des simulations MCNPX-2.6 pour la population de neutrons et de gammas dans le collimateur, le blindage en béton et son environnement. Ce type de simulation permet de dimensionner la taille du blindage. Aujourd'hui, la définition de la géométrie du collimateur et de son blindage est quasiment terminée. Outre les aspects contraignants de physique et de mécanique, il a fallu aussi prendre en compte la contrainte budgétaire pour minimiser le coût de la matière. La prochaine étape, qui a néanmoins déjà commencé, est la production du design de l'ensemble collimateur-blindage. Là aussi,

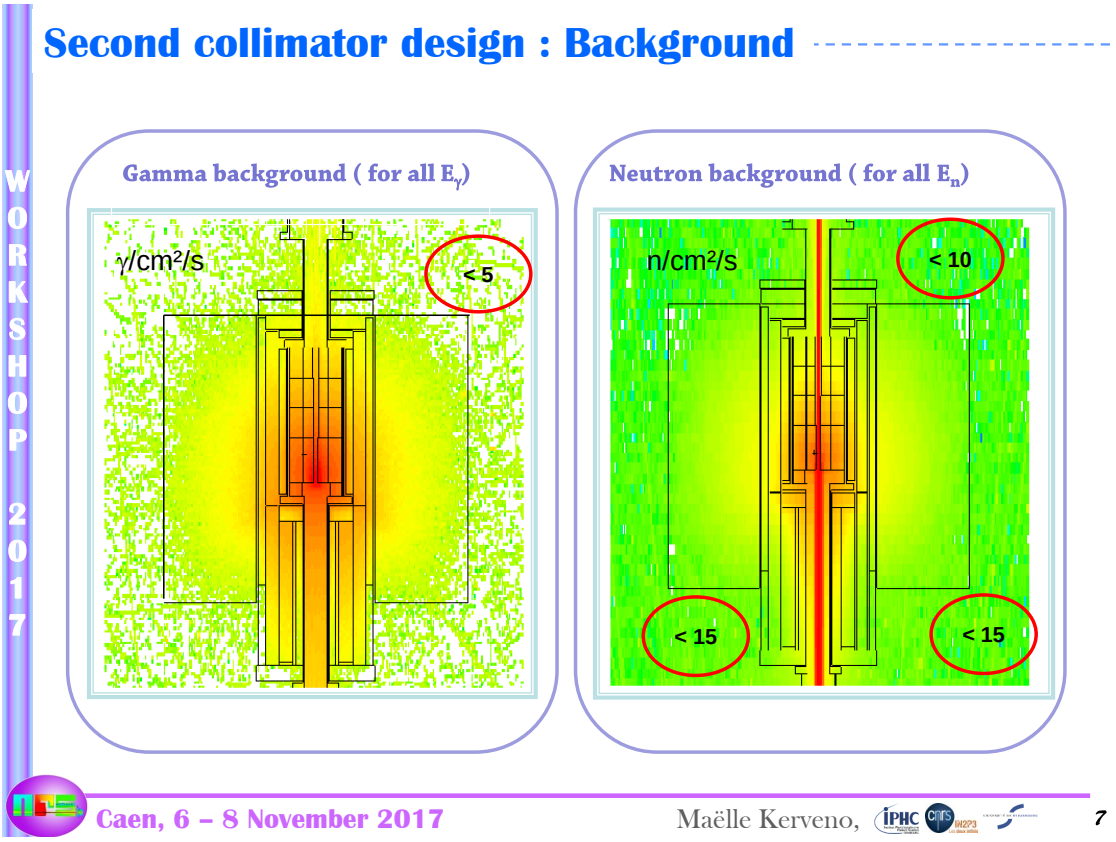


FIGURE 4.18: Simulation du bruit de fond γ (à gauche) et neutrons (à droite) dans et aux alentours du second collimateur.

de sévères contraintes comme l'alignement des cylindres intérieurs qui doit être parfait par rapport au premier collimateur ou le montage des différents éléments dans le tube à vide, doivent être prises en compte. Pour le blindage, les normes de sûreté imposent un calcul de tenue sismique de l'ensemble pour assurer qu'un élément de masse supérieure à 500 kg et positionné à une hauteur de plus de 1.5 m ne peut se désolidariser de l'ensemble et tomber sur la dalle de béton. Tous ces aspects sont des défis à relever, dans l'année qui vient, pour le bureau d'études de l'IPHC.

Une fois, l'installation temps de vol de NFS équipée de sa ligne faisceau et du second collimateur, nous pourrons envisager de proposer un programme expérimental qui est détaillé dans les deux sections suivantes.

4.2.2 LoI ^{90}Zr(n,3n)

Initialement, il y a maintenant plus de 10 ans, lors des discussions sur le développement du faisceau de neutrons de SPIRAL2, notre équipe a proposé une première expérience qui

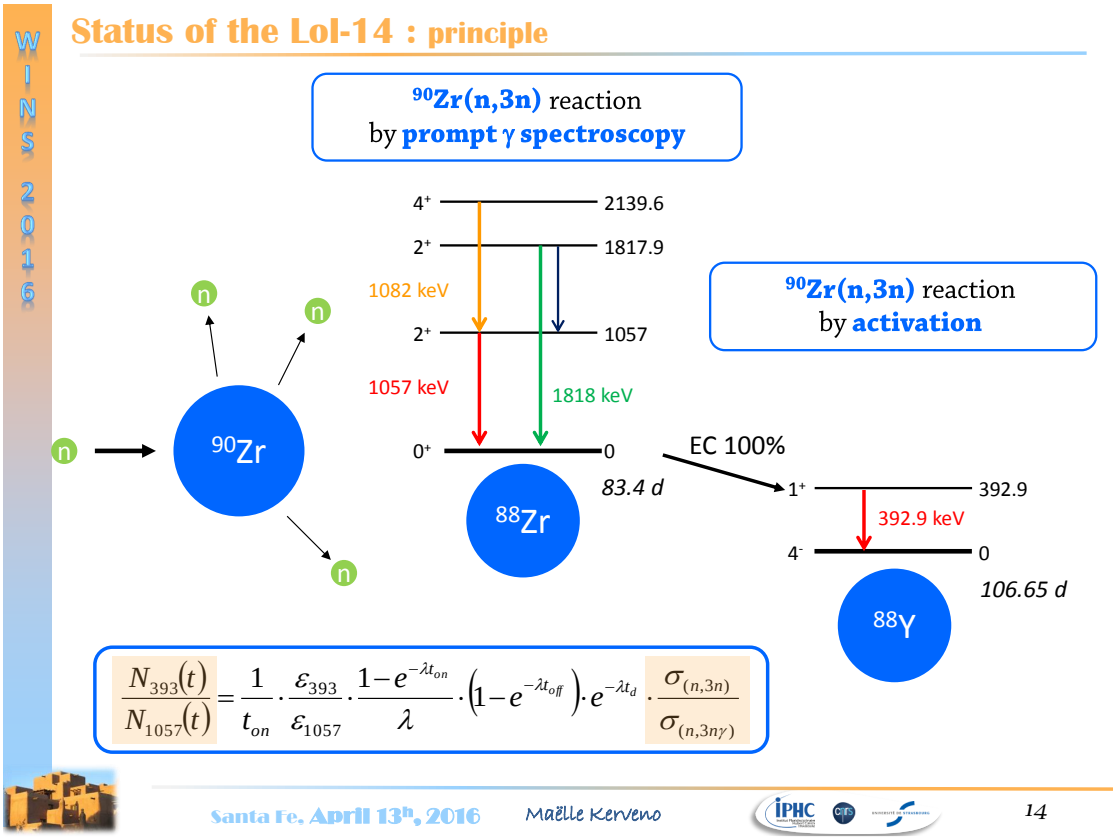


FIGURE 4.19: Schémas de niveaux partiels du ^{90}Zr et du ^{88}Zr produit par la réaction (n,3n) sur le ^{90}Zr et principe de la mesure simultanée de la section efficace ^{90}Zr(n,3n) par deux méthodes expérimentales différentes : la spectroscopie γ prompte et l'activation.

visait la mesure simultanée de la section efficace de la réaction ^{90}Zr(n,3n) par la méthode de la spectroscopie γ prompte et celle de l'activation. Cette expérience est unique car il y a peu de système qui permettent la mesure simultanée par les deux méthodes. En effet, il faut que le noyau formé par la réaction (n,xn) ait une durée de vie compatible avec une mesure d'activation. Ce qui est le cas pour le système ^{90}Zr(n,3n) (E_{th}=21.5 MeV) qui produit le ^{88}Zr ($T_{1/2}$=83.4 d). A l'époque, cette expérience devait nous permettre de valider notre méthodologie de mesure par la spectroscopie γ prompte. En effet, comme illustré sur la Figure 4.19, la mesure simultanée de la décroissance γ prompte et par conversion électronique du ^{88}Zr permet de s'affranchir des informations sur le nombre de noyaux dans la cible et de la mesure du flux de neutrons comme explicité dans l'équation de la Figure 4.19. Le rapport des sections efficaces (n,3n γ) et (n,3n) est alors directement proportionnel au nombre de gamma détectés correspondant aux transitions d'intérêt dans le ^{90}Zr et le ^{88}Zr et dépend uniquement des paramètres de structure des noyaux et des efficacités de détection qui sont bien connues. Pour réaliser l'expérience, afin de limiter

d'une part, le recouvrement des bouffées de neutrons et d'autre part, de tenir compte du temps de traitement des signaux par l'électronique d'acquisition (au moins 5 μs), une fréquence de 0.176 Mhz est nécessaire (N=500 pour le réducteur de paquets). Pour limiter les contributions d'autres réactions parasites (n,n') et (n,2n), travailler avec un faisceau quasi-monoénergétique semble préférable et donc l'utilisation d'un convertisseur Lithium sera demandé. Mais cela pénalise l'énergie maximum pouvant être atteinte (31 MeV) ainsi que l'intensité du flux de neutrons. Les temps de faisceau demandés seront donc plus importants et toute la fonction d'excitation ne pourra être décrite. Une autre difficulté doit être surmontée dans cette expérience, difficulté assez commune pour les physiciens nucléaires expérimentateurs des données nucléaires, c'est l'approvisionnement de la cible. En effet, utiliser une cible de zirconium naturel augmente la présence de transitions γ parasites, comme le montre la Figure 4.20. La composition du zirconium naturel est la suivante ^{90}Zr-51.45 %, ^{91}Zr-11.22 %, ^{92}Zr-17.15 %, ^{94}Zr-17.38 % ^{96}Zr-2.8 %. Les isotopes 92 et 94 ont une proportion non négligeable et peuvent, après réaction, (n,n') ou (n,3n) produire des gammas parasites qui contamineront les gammas d'intérêt du ^{88}Zr, notamment celui à 1057 keV. Une cible isotopiquement enrichie nous affranchirait de ce problème mais le coût associé à sa fabrication est sûrement rédhibitoire. Une solution sera donc d'utiliser une cible naturelle et de s'intéresser à d'autres transitions γ comme celles de 1082 ou 1818 keV au prix d'un temps de faisceau supplémentaire pour compenser leur plus faible section efficace (cf. Figure 4.20). En conclusion, même si cette proposition d'expérience est toujours d'actualité, elle ne relève pas moins d'un défi expérimental que nous tenterons de résoudre dans les cinq prochaines années.

4.2.3 Mesures des réactions (n,2n) sur les actinides

Nous l'avons vu précédemment, le domaine en énergie du faisceau de neutrons délivré par NFS est parfaitement adapté à l'étude des réactions (n,2n). Cette installation est donc très complémentaire de l'installation GELINA au JRC-Geel pour laquelle le flux de neutrons au delà de 2-3 MeV chute drastiquement comme le montre la Figure 4.21. Il nous parait alors naturel de compléter nos mesures des sections efficaces (n,2n) sur les actinides réalisées à GELINA par de nouvelles mesures à NFS. Ces mesures pourront concerner tous les actinides déjà étudiés et notamment l'^{235}U, l'^{233}U et le ^{239}Pu. La limite en activité imposée dans le hall NFS est de 1 GBq pour les dépôts minces et de 10 GBq pour les cibles épaisses qui devront être encapsulées. Cela correspond par

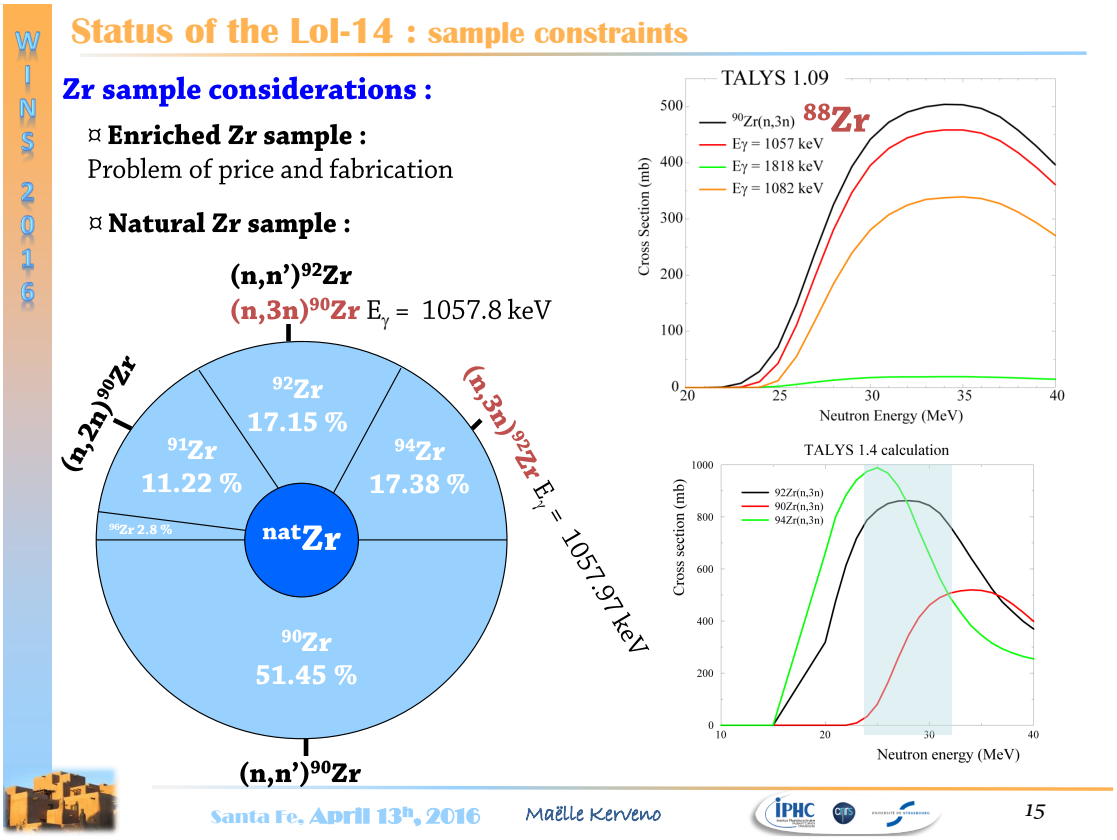


FIGURE 4.20: Contraintes de l'expérience liées à la composition d'une cible de Zr naturel (à gauche). A droite, différentes sections efficaces totales (n,xn) sur les principaux isotopes du Zr, et partielles (n,xn γ) pour le ^{90}Zr, calculées par le code TALYS.

exemple à des cibles de 50 g pour ^{235}U et 3 g pour ^{233}U et ^{239}Pu comme le montre le tableau de la Figure 4.22 où les noyaux envisagés pour les mesures à NFS ont été listés. Pour ces prochaines mesures, notre collaboration IPHC / EC-JRC-Geel / INFIN envisage de coupler les spectromètres GAINS et GRAPhEME pour augmenter la granularité des dispositifs et limiter ainsi les temps de faisceaux nécessaires. En effet, une forte pression sur les temps d'expérience est pressentie à NFS et notre méthode de mesure requiert malheureusement des temps de faisceau longs. Le haut flux de NFS et l'augmentation du nombre de détecteurs permettront donc de réduire la durée de l'expérience.

Il est aussi intéressant de noter que les collègues du CEA/DAM envisagent également de mesurer, par voie directe, les réactions (n,2n) et (n,3n), dans un premier temps, sur l'^{238}U et ensuite sur l'^{235}U et le ^{239}Pu [127]. Pour cela ils utilisent le couplage d'un détecteur de fission (utilisé en véto) avec un détecteur de neutrons (SCONE-Solid COunter for NEutron) composé d'un scintillateur plastique chargé avec 0.4% de Gd et segmenté en

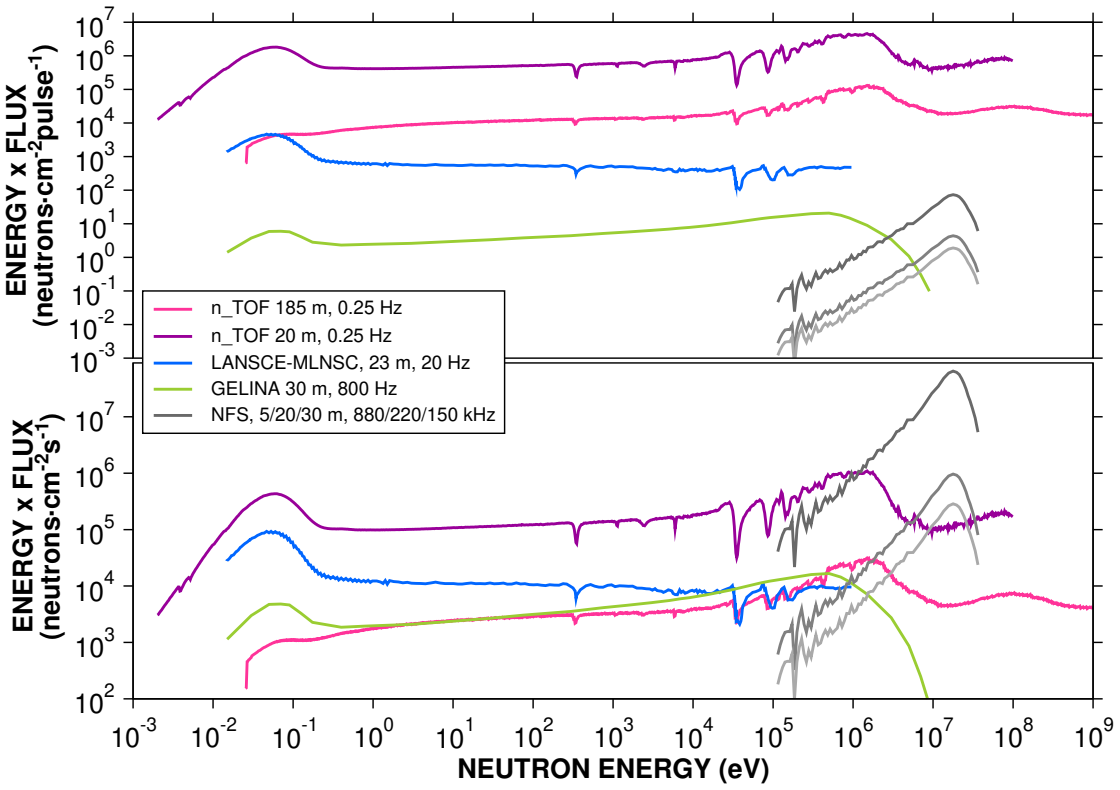


FIGURE 4.21: Comparaison des flux des différentes installations temps de vol mondiales. Figure Frank Gunsing.

		Thin samples		Thick targets	
Isotope	T1/2 (a)	M(mg)	A(Bq)	M(g)	A(Bq)
232Th	1,40E+10	5	2,04E+01	300	1,22E+06
233U	1,59E+05	5	1,78E+06	3	1,07E+09
235U	7,04E+08	5	4,00E+02	50	4,00E+06
237Np	2,14E+06	5	1,30E+05	50	1,30E+09
238U	4,47E+09	5	6,21E+01	300	3,73E+06
239Pu	2,41E+04	5	1,15E+07	3	6,89E+09
241Am	4,33E+02	5	6,34E+08		
243Am	7,37E+03	5	3,71E+07		
245Cm	8,50E+03	5	3,17E+07		
234U	2,46E+05	5	1,15E+06		
236U	2,34E+07	5	1,20E+04		
240Pu	6,56E+03	5	4,20E+07		
242Pu	3,75E+05	5	7,29E+05		
244Pu	8,00E+07	5	3,39E+03		
246Cm	4,76E+03	5	5,65E+07		
247Cm	1,56E+07	5	1,72E+04		
248Cm	3,48E+05	5	7,66E+05		
231Pa	3,28E+04	5	8,73E+06		
241Pu	1,44E+01	5	1,91E+10		
249Cf	3,51E+02	5	7,56E+08		
251Cf	9,00E+02	5	2,93E+08		

FIGURE 4.22: Listes des noyaux potentiellement étudiés à NFS.

896 barres. Le détecteur de fission est placé au centre du scintillateur. Nos programmes expérimentaux sont donc très complémentaires et des échanges pourraient être envisagés.

4.3 Maintenir les collaborations expérimentateurs / théoriciens / évaluateurs

J'espère avoir démontré tout au long de ce manuscrit la complémentarité entre les différents acteurs des données nucléaires que sont les expérimentateurs, les théoriciens et les évaluateurs (EX, TH, EV). Je suis convaincue que notre thématique de recherches ne peut progresser efficacement que si nous pouvons travailler conjointement vers des objectifs communs. Pour le théoricien, l'expérimentateur joue le rôle d'un aiguillon qui le stimule pour pousser les performances des modèles. C'est particulièrement le cas lors de l'utilisation de méthodes expérimentales indirectes, comme avec la spectroscopie γ prompte. On a vu ces dernières années, l'émulation créée par notre collaboration avec les collègues théoriciens du CEA/DAM/DIF dans le cadre du défi NEEDS et du projet NACRE/EEDIN. Cette collaboration peut aussi amener l'expérimentateur à revoir ces objectifs de mesure en fonction des besoins des théoriciens. Dans notre cas, cela s'applique aux mesures de structure que nous pourrions être amenés à mettre en œuvre. Les échanges entre expérimentateurs et évaluateurs ont aussi une grande valeur. Pour l'expérimentateur, il permet de mieux comprendre les besoins de l'évaluateur en terme de format de données par exemple. Quelles informations, quels détails dans les données nucléaires que nous produisons sont pertinents pour une évaluation optimisée ? L'évaluateur pourra aussi guider l'expérimentateur en terme de besoins en mesures. Pour l'évaluateur, la collaboration avec les expérimentateurs permet de mieux appréhender les techniques d'analyse de données et une meilleure compréhension des différentes limitations expérimentales. Nous avons développé de façon formelle, depuis plus de cinq ans maintenant, ces collaborations avec les théoriciens et les évaluateurs du CEA, mais aussi avec Roberto Capote de l'AIEA. Pour construire cette collaboration, j'ai mis à profit différents outils comme l'organisation de workshops et le montage de projets communs dans le cadre de NEEDS. Au niveau national, le projet NEEDS/NACRE s'inscrit complètement dans cette démarche en essayant de définir des objectifs communs entre les 3 protagonistes (EX, TH, EV) des organismes nationaux que sont le CNRS, le CEA et l'IRSN. Lors du prochain appel à projet 2019, notre volonté est de renforcer encore l'implication

des équipes vers cette ambition. En effet, au niveau du CNRS, l'activité des équipes du master projet OPALE se différencie des autres équipes de physique nucléaire fondamentale par cet objectif d'évaluation. Notre préoccupation ne doit donc pas être seulement "une mesure utile pour les réacteurs" mais plutôt "une mesure utile et, rapidement et efficacement, utilisable pour les réacteurs". Un autre levier pour faciliter ces échanges et ce travail commun est la mise en place de thèses en co-tutelle entre les organismes et notamment entre le CNRS et le CEA. Les financements peuvent être partagés ou à charge complète pour un organisme mais le cadre de travail se doit d'être véritablement partagé. Cela permet de former/sensibiliser les étudiants à l'ensemble de la thématique et oblige les équipes à définir des objectifs communs. Un autre avantage, plus spécifique à notre équipe, est que ce type de financement pourrait faciliter le recrutement d'étudiants de qualité. En effet, ces dernières années nous avons eu beaucoup de mal à attirer de bons étudiants vers notre thématique de recherche. La co-tutelle avec le CEA est une carte à jouer vis à vis des étudiants qui souhaitent faire une thèse "plus appliquée" avec un partenaire clairement identifié "réacteur nucléaire". Nous avons obtenu un premier financement de thèse amont-aval du CEA pour un sujet de thèse intitulé : "Mesure, modélisation et évaluation de sections efficaces à seuil (n,xn γ) d'intérêt pour le cycle électronucléaire". Nous cherchons actuellement un candidat.

Au niveau européen, jusqu'à aujourd'hui, les interactions entre théoriciens, expérimentateurs et évaluateurs n'étaient pas clairement favorisées par la structure même des projets, organisés en "workpackages" finalement assez cloisonnés. En concertation avec les collègues du CEA, il nous paraît important d'essayer de renforcer et de favoriser ces échanges au sein même des projets soutenus par EURATOM. Le projet CHANDA se terminant en mai prochain, la préparation du projet suivant est en cours et nous espérons pouvoir faire bouger un peu les lignes dès 2019. Dans le prochain projet, il est prévu qu'un groupe de travail réfléchisse à la préparation du prochain call FP9 afin de proposer un cadre encore plus durable et fédérateur pour la communauté des données nucléaires européenne. La possibilité d'obtenir des projets avec des budgets plus conséquents comme via les EJP (European Joint Program) pourrait aussi être explorée. Le CNRS et le CEA ont exprimé la volonté de participer à cette réflexion.

Dans les années à venir, je souhaite donc continuer à favoriser les échanges entre les expérimentateurs, théoriciens et évaluateurs que ce soit pour les activités de mon équipe

mais également, au niveau national et européen pour tenter d'optimiser la chaine de l'évaluation.

4.4 Un pas vers les physiciens des réacteurs

La thématique des données nucléaires joue un rôle central dans l'étude des réacteurs nucléaires et des scénarios. Nous avons vu dans la section précédente, l'importance du travail commun des différents acteurs (EX, TH, EV) de la chaine d'évaluation. Si l'IN2P3 dispose via ses équipes de recherches des compétences pour la mesure de données nucléaires, les compétences liées au développement des modèles et à l'évaluation se trouvent plutôt, en France, au CEA. En revanche, comme on l'a vu dans le chapitre 1, l'IN2P3 a développé des compétences en physique des réacteurs et neutronique. Au fil des ans, les équipes des données nucléaires et de la physique des réacteurs de l'IN2P3 ont perdu les liens qui les unissaient au départ. Pourtant un aspect important peut leur permettre de travailler sur des projets communs. Il s'agit de l'étude des sensibilités aux données nucléaires qui permet de déterminer quelles observables nucléaires impactent fortement les paramètres du cœur de réacteur. A partir de ces études, des priorités peuvent être énoncées pour l'amélioration de la connaissance de certaines sections efficaces par exemple. A l'IN2P3, ce thème a été abordé initialement par Adrien Bidaud pendant sa thèse [128], soutenue en 2005. Aujourd'hui des collègues de l'IPN Orsay (équipe de Xavier Doligez) travaillent pour développer les outils nécessaires à l'étude des sensibilités. Ces études peuvent s'appliquer sur le cycle du thorium pour lequel peu d'informations bien caractérisées sont disponibles quant à la qualité des données nucléaires. En tant qu'expérimentateurs, nous sommes donc à la recherche d'informations plus précises sur l'impact des sections efficaces (n,xn) dans les réacteurs fonctionnant au thorium. Les travaux de mes collègues parisiens m'ont toujours interpellée et j'avais avec eux régulièrement, lors d'ateliers NEEDS par exemple, des discussions où je les questionnais sur la possibilité qu'ils étudient la sensibilité des réactions (n,xn). Ils étaient tout à fait intéressés par ces études mais malheureusement le manque de temps et de personnels ne permettait pas de démarrer ce travail. L'occasion s'est finalement présentée dans le cadre de la thèse de notre étudiant Eliot Party. En effet, il travaille sur l'analyse de données du thorium et il est très à l'aise avec l'utilisation de codes de simulation comme MCNP et apprécie ce genre de travail. Je lui ai donc proposé, en accord avec Xavier Doligez, de consacrer une

partie de sa thèse à l'étude des sensibilités des réactions (n,xn). Ce travail lui permettrait en plus de pouvoir justifier l'intérêt des mesures qu'il analyse. Eliot a donc démarré cette étude en assimilant, dans un premier temps, les méthodologies d'analyse d'erreurs et de sensibilités et, dans un second temps, en prenant en main les outils MCNP et SERPENT (simulation de réacteurs) qui permettent les calculs MC des sensibilités. Cette opportunité de travail en commun nous permet donc de tisser des liens avec nos collègues physiciens des réacteurs et de renforcer nos échanges au sein de la thématique "Energie" de l'IN2P3.

Au niveau national, il nous paraît aussi important de favoriser ce type de collaboration, et c'est pourquoi dans le cadre du GDR SciNEE (Sciences Nucléaires pour l'Energie et l'Environnement), le premier atelier du pôle 1 "Systèmes nucléaires et scénarios associés" aura pour but de relancer une dynamique d'animation et d'échanges qui pourrait favoriser l'émergence de projets communs et renforcer ainsi notre communauté.

4.5 Conclusion

Dans les années à venir, plusieurs axes de travail m'occuperont. D'un point de vue expérimental, les mesures avec GRAPhEME à GELINA sur les noyaux très radioactifs occuperont une partie importante de mon activité. Le défi expérimental de la mesure des électrons de conversion sera aussi à mener à bien. Enfin, le démarrage prochain de l'installation SPIRAL2/NFS devrait générer de nouveaux projets de mesures. Au-delà des activités expérimentales, je souhaite poursuivre mes efforts pour rapprocher les différentes activités des données nucléaires (EX, TH, EV, physiciens des réacteurs) que ce soit au niveau local (pour les projets de mon équipe), au niveau national avec les outils de NEEDS et du GDR SciNEE dans lesquels j'occupe des fonctions d'animation, et enfin, au niveau européen via la participation à la construction de projets plus intégrés de la mesure à l'évaluation.

Conclusion

J'ai eu beaucoup de chance d'être affectée dans une "toute petite" équipe où un projet expérimental, basé sur une méthode originale, était naissant. J'ai pu participer, au premier rang, à toutes les étapes, des tests de faisabilité aux demandes de financement (ANR et autres), aux premières mesures, à l'analyse de données, ... GRAPhEME s'est monté petit à petit, année après année, comme je l'ai montré dans le chapitre 2. Trois doctorants ont contribué à l'élaboration de ce dispositif de mesure. Pendant ces thèses, j'ai mieux cerné le travail d'encadrement des étudiants et j'ai compris que chaque étudiant apporte sa pierre à l'édifice en fonction de sa personnalité, de ses compétences et de ses affinités. Aujourd'hui GRAPhEME est un dispositif à maturité pour produire des données nucléaires précises mais (cf. chapitre 4) il n'en reste pas moins que des défis nous attendent encore pour essayer de repousser les limites de la méthode de la spectroscopie γ prompte appliquée à la mesure des sections efficaces (n,xn γ) sur les actinides.

Une des questions importantes encore ouverte autour de ce travail est entre les mains de nos collègues théoriciens, en particulier ceux du CEA/DAM avec lesquels nous avons une collaboration forte. Dans le chapitre 3, j'ai montré que notre méthode expérimentale, dans le cas des actinides, sera toujours dépendante de la qualité prédictive des modèles théoriques. En cela, je me réjouis de poursuivre notre travail collaboratif avec nos collègues théoriciens pour participer à l'effort de compréhension des processus fondamentaux et de leur modélisation. Cet échange indispensable est une vraie richesse pour un expérimentateur d'autant qu'il s'effectue sur la base d'une relation de qualité.

L'utilisation effective de nos données dans l'évaluation est aussi et restera une de mes préoccupations majeures. La collaboration que nous avons mise en place avec les collègues du CEA Cadarache est un atout pour mieux appréhender les enjeux de précisions de nos

données dans les applications réacteurs. Leur connaissance du processus d'évaluation nous guide également pour mieux formater nos données aux besoins de l'évaluation.

D'un point de vue purement expérimental, trois grands axes principaux vont nous occuper dans les années à venir. Tout d'abord, nous devons travailler sur les mesures des actinides à forte activité qui nécessitent un développement de nouveaux outils d'analyse. Parallèlement à ce travail, l'amélioration de la méthode pour la mesure de la désexcitation des niveaux de faible énergie est aussi un défi important que nous devons relever. Enfin, la mise en service de l'installation SPIRAL2/NFS nous ouvre de nouvelles perspectives pour l'étude des réactions (n,2n) mais dans un environnement beaucoup plus contraint que celui de l'installation EC-JRC/GELINA.

Sans doute mon post-doc effectué dans l'équipe de physique des réacteurs du LPSC m'a sensibilisée à cette thématique à laquelle les données nucléaires sont évidemment très liées. En 2007, Philippe Dessagne et moi-même avions émis le souhait d'élargir nos activités de recherches dans cette direction et nous avions intégré le projet GUINEVERE (maquette de réacteur sous-critique piloté par accélérateur construite au SCK/CEN de Mol, Belqique) avec le LPSC. Notre contribution a démarré par des réalisations techniques menées par l'atelier de mécanique. Notre souhait était de nous investir par la suite dans le programme de physique des réacteurs expérimentale une fois l'installation construite. Malheureusement, le faible effectif de notre équipe ne nous a pas permis de concrétiser ce souhait. Cependant, grâce à notre dernier étudiant en thèse, j'ai pu faire renaitre un lien avec la physique des réacteurs en mettant en place une collaboration avec nos collègues de l'IPN d'Orsay qui développent des outils de calculs de sensibilité aux sections efficaces. Ces outils sont, pour nous, une réelle opportunité de pouvoir obtenir les informations manquantes concernant le besoin en nouvelles mesures pour le cycle du thorium. J'espère que cette collaboration perdurera au delà de la thèse d'Eliot Party.

Au delà de tout ce travail au niveau de mon équipe de recherches, je me suis aussi investie au niveau national pour faire reconnaitre nos activités auprès de la direction de l'IN2P3 et je continuerai à défendre nos intérêts, si besoin. J'ai assisté à la naissance de cette thématique (cf. chapitre 1) et je me souviens, alors que j'étais en DEA à l'IPN de Lyon, des premiers exposés de J.M. Loiseaux et J.P. Schapira qui "tournaient" dans les laboratoires de l'IN2P3 pour présenter les projets potentiels associés aux questions ouvertes par la loi Bataille. Effectuer ma thèse à ce moment de la mise en place de ces

activités à l'IN2P3 a sûrement contribué à développer ce sentiment d'appartenance à une "communauté" qui m'anime aujourd'hui. J'ai à cœur de promouvoir et de défendre notre thématique au niveau national et international. Si on m'en laisse l'opportunité, je continuerai ces actions et notamment celle au sein du DEFI NEEDS dans le cadre du projet NACRE. Ce projet national est une opportunité pour les collaborateurs du CNRS, du CEA et de l'IRSN de travailler conjointement autour d'un objectif commun qui est l'amélioration des bases de données évaluées. Chaque pilier (expérience, modélisation et évaluation) de l'évaluation peut y être représenté et NEEDS peut jouer pleinement son rôle de levier mais aussi de soutien pour nos projets. Ce soutien doit nous permettre d'avancer efficacement et de façon concertée pour tenter de résoudre les défis expérimentaux et théoriques que soulève l'élaboration de bases de données évaluées modernes et de qualité. Au niveau du GDR SciNEE, nouvellement créé début 2018, nous avons aussi l'opportunité de récréer un niveau d'animation entre les différents acteurs du pôle systèmes nucléaires et scénarios associés. Un enjeu plus difficile sera de renforcer, si ce n'est créer, les liens entre les physiciens et les radiochimistes impliqués dans la thématique de l'énergie. Pour cela, j'ai proposé une première action qui consiste à organiser une école Joliot-Curie sur les thématiques du GDR. Ce projet a été validé par le comité de pilotage du GDR et finalement accepté par le conseil scientifique de l'école. Elle aura lieu en 2019. Comme pour l'école Energies & Recherches, il me semble important de rassembler et de sensibiliser les jeunes acteurs de nos thématiques afin de leur donner une image la plus complète possible du paysage dans lequel ils travaillent et tenter de susciter un esprit de réseau qui pourra perdurer tout au long de leur carrière.

Annexe A

Programmes des workshops ; animation scientifique

Les programmes des quatre workshops que j'ai organisés autour des données nucléaires sont compilés dans cette annexe. Le premier a été organisé au sein de l'IN2P3 pour remobiliser notre communauté et travailler à l'écriture de la feuille de route de notre thématique. Il a été organisé en décembre 2014 à l'IPN d'Orsay. Le deuxième workshop a été organisé à l'IPHC-Strasbourg en mars 2016 et avait pour but de relancer les discussions entre les acteurs des données nucléaires de l'IN2P3 et du CEA. Il a servi d'atelier de lancement du projet NACRE. Les deux derniers workshops ont été organisés dans le cadre du projet NACRE afin de préparer la suite du projet structurant dans le cadre de NEEDS-2018. Un premier volet qui s'est tenu en novembre 2016 au LPSC-Grenoble, concernait les activités du workpackage 1 et le second, organisé en mai 2017 à l'IRFU-Saclay, concernait les activités du workspackage 2.

Workshop
« Données nucléaires à l'IN2P3 pour les réacteurs du futur »

17 et 18 décembre 2014 à l'IPN d'Orsay.

Mercredi 17 décembre

auditoire : permanents, post doc, doctorants

9h00-9h30 : "Les données nucléaires à l'in2p3 vues de la direction", S.david 15'+10'
9h30-10h00 : "Simulations des systèmes nucléaires, scénarios associés", X.Doligez 20'+10'
10h00-10h30 : "Expériences de physique et technologie des réacteurs", A.Billebaud 20'+10'

10h30-10h50 *: pause*

10h50-11h20 : "Étude de Sensibilité", A. Bidaud, 20'+10'
11h20-11h40 : "Les données nucléaires : des données évaluées aux données expérimentales en passant par la modélisation", Grégoire Kessedjian (LPSC) 15'+5'

Présentation des projets portés les équipes de l'IN2P3

11h40-12h05 : "Mesures directes de fission et de capture (à n-TOf (IPNO), à l'IRMM et AIFIRA (CENBG))", L. Audouin (IPNO) 20'+5'
12h05-12h30 : "Méthode de substitution (CENBG/IPNO/GANIL)", B.Jurado (CENBG) 20'+5'
12h30-12h55 : "Mesures des sections efficaces de production de particules légères (IPHC-LPC)", M. Kerveno (IPHC) 20'+5'

12h55-13h30 : questions

13h30-14h30*: pause déjeuner*

14h30-14h55 : "rendements de fission, (Mesures à l'ILL (LPSC), Cinématique inverse SOFIA (IPNO) et GANIL) ", F.Farget (GANIL) 20'+5'
14h55-15h20 : "désexcitation des fragments de fission, Émission de neutrons et gammas prompts (IPNO, LPSC)", J.Wilson (IPNO) 20'+5'
15h20-15h45 : "Le code GEF", B.Jurado (CENBG) 20'+5'
15h45-16h10 : "Décroissance de fragments de fission, émission retardée : mesures de Spectroscopie par Absorption Totale (TAS) pour le calcul de la puissance résiduelle et antineutrinos pour la non-prolifération, enjeux et perspectives ", A. Porta (SUBATECH) 20'+5'

16h10-16h30*: pause*

16h30-18h30: discussion

Jeudi 18 décembre

9h00-17h00 : Séance "fermée", permanents communauté données nucléaires IN2P3 pour discussion sur feuille de route.

Workshop Données nucléaires IN2P3-CEA
2 - 3 mars 2016, IPHC, Strasbourg

02-mars-16	**Les activités de données nucléaires à l'IN2P3 et au CEA**	
9h00-9h15	Introduction	Maëlle Kerveno (IPHC), Isabelle Ripp-Baudot (responsable IPHC/DRS)
9h15-9h35	Les données nucléaires à l'IN2P3	Fanny Farget (Directrice adjointe scientifique IN2P3)
9h35-10h00	Les données nucléaires au CEA	Anne Nicolas (Direction Scientifique CEA/DEN/EC/)
10h00-10h20	**pause café**	
10h20-10h45	CENBG	Ludovic Mathieu (CENBG)
10h45-11h10	IPNO	Laurent Audoin (IPNO)
11h10-11h35	IPHC	Maëlle Kerveno (IPHC)
11h35-11h55	CEA/SPhN	Héloise Goutte (SPhN)
11h55-12h15	GANIL - NFS	Xavier Ledoux (GANIL)
12h15-14h00	**pause déjeuner**	
14h00-14h25	LPC Caen	François René Lecolley (LPC Caen)
14h25-14h50	GANIL	Carme Rodriguez Tajes (GANIL)
14h50-15h30	CEA/DAM	Gilbert Belier et Eric Bauge (DAM)
15h30-15h55	SUBATECH	Muriel Fallot (SUBATECH)
15h55-16h15	**pause café**	
16h15-16h40	LPSC	Christophe Sage (LPSC)
16h40-17h20	CEA/DEN	Cyrille de Saint Jean (DEN)
17h20-18h30	**Discussion : comment renforcer les liens entre nos instituts?**	Maëlle Kerveno (IPHC) et Cyrille De Saint Jean(CEA/DEN)

03-mars-16	**Journée thématique : Expérimentateurs - évaluateurs : comment définir un espace commun de travail?**	
9h00-9h30	Les données nucléaires ; le cercle vertueux De l'expression du besoins, à l'évaluation, le rôle des expériences microscopiques et intégrales	Cyrille de Saint Jean (DEN)
9h30-10h00	Mesures intégrales comme validation des Données Nucléaires	Pierre Leconte (DEN)
10h00-10h20	**pause café**	
10h20-10h50	Comment construire un fichier évalué: le rôle de chacun	Pascal Romain (DAM)
10h50-11h20	Les données nucléaires post-fission : modélisation et évaluation	Olivier Litaize (DEN)
11h20-12h20	**Discussion : comment pouvons nous (expérimentateurs) avoir un meilleur accès aux besoins et répondre à la demande très exigeante?**	modérateur : Grégoire Kessedjian (LPSC)
12h20-14h00	**pause déjeuner**	
14h00-14h30	Pourquoi nous faut-il des covariances, quelles covariances et pour quelles applications?	Eric Bauge (DAM)
14h30-16h00	**Discussion : Pourquoi et comment travailler ensemble autour des covariances?**	modérateur : Robert Jacqmin (directeur PF Systèmes NEEDS)
	FIN workshop	

Workshop NACRE - WP1

Avenir des mesures des sections efficaces de fission et de capture

9 - 10 novembre 2016, LPSC, Grenoble

09-nov-16		
10h00-10h30	**accueil - pause café**	
10h30-11h10	section efficace capture et fission : les besoins de l'évaluation	Cyrille de Saint Jean (CEA/DEN)
11h10-11h50	les besoins de la modélisation	Eric Bauge (CEA/DAM)
11h50-12h20	HPRL : premier bilan	Emmeric Dupont (CEA/DRF)
12h20-12h40	discussion	
12h40-14h00	**pause déjeuner**	
14h00-14h40	expériences microscopiques : Les installations ; potentiels et verrous	Emmeric Dupont (CEA/DRF)
14h40-15h20	expériences intégrales : Les installations ; potentiels et verrous	Cyrille de Saint Jean ou Olivier Serot,Pierre Leconte (CEA/DEN)
15h20-16h00	les mesures de fission : la détection	Laurent Audouin (IPNO)
16h00-16h20	**pause café**	
16h20-17h00	les mesures intégrales : la détection	Adrien Gruel(CEA/DEN)
17h00-17h40	discussion	
10-nov-16		
9h00-9h40	les mesures indirectes	Ludovic Mathieu (CENBG)
9h40-10h00	les mesures intégrales du CNRS sur VENUS-F	Annick Billebaud, Jean Luc Lecouey (LPC)
10h00-10h20	mesures sur l'installation PEREN du LPSC	Annick Billebaud, Grégoire Kessedjian (LPSC)
10h20-10h40	**pause café**	
10h40-12h10	discussion : collaborations possibles sur projets communs qui intégreront le projet potentiel 2018-… NACRE 2	
12h10-14h00	**pause déjeuner**	
14h00-16h00	discussion suite	
	FIN workshop	

Workshop NACRE - WP2

Prospectives sur les activités autour des produits de la réaction de fission

11 - 12 mai 2017, CEA/DRF/Irfu, Saclay, SPhN bat 703 Orme les Merisiers

11-mai-17		
9h50-10h20	**accueil - pause café**	
10h20-11h00	les besoins de la modélisation : Rendements, de fission, spectres (n_p, γ), décroissance (β, n retardé)	Eric Bauge (CEA/DAM)
11h00-11h30	Les rendements de fission : besoin applications/évaluation	Grégoire Kessedjian (LPSC)
11h30-12h00	Les spectres (n_p, γ) : besoin applications/évaluation	Olivier Litaize (CEA/DEN)
12h00-12h30	Décroisssance des PF (n retardé, β) : besoin applications/évaluation	Muriel Fallot (SUBATECH) et Pierre Leconte (CEA/DEN)
12h30-14h00	**pause déjeuner**	
14h00-14h40	VAMOS : potentiel, verrous, prospectives	Diego Ramos (IPNO)
14h40-15h20	SOFIA : potentiel, verrous, prospectives	Julien Taïeb (CEA/DAM)
15h20-16h00	FALSTAFF : potentiel, verrous, prospectives	Andreina Chietera (CEA/DRF)
16h00-16h20	**pause café**	
16h20-17h00	ILL Lohengrin : potentiel, verrous, prospectives	Abdel Chebboubi (CEA/DEN)
17h00-17h40	ILL FIPPS : potentiel, verrous, prospectives	Thomas Materna (CEA/DRF)/Grégoire Kessedjian (LPSC)
12-mai-17		
9h00-9h40	Mesures en cinématique inverse auprès d'anneaux de sto	Laurent Audouin (IPNO) Beatriz Jurado (CENBG)
9h40-10h20	Activités autour des mesures de la décroissance (n retardé, β) des PF : panorama, verrous/Perspectives	Muriel Fallot (SUBATECH) et Pierre Leconte (CEA/DEN)
10h20-10h40	**pause café**	
10h40-11h20	Activités autour des mesures des spectres n_p, γ : panorama, verrous/Perspectives	Benoit Laurent (CEA/DAM)
11h20-11h50	Expériences intégrales?? (ou discussion)	SPEX
11h50-13h30	**pause déjeuner**	
13h30-16h00	Discussion sur les projets communs qui pourront intégrer le projet NACRE 2018	
	FIN workshop	

Annexe B

Projet NEEDS-NACRE : Réponse à l'appel à projet NEEDS2016

Projet structurant
Le Noyau Au Cœur du RéactEur (NACRE)

Contexte et ambitions du projet

CONTEXTE – simulation des réacteurs nucléaires

L'avenir de l'énergie nucléaire passe nécessairement par l'amélioration des performances des systèmes et scénarios de production. L'optimisation du fonctionnement des réacteurs de troisième génération vis à vis des cycles de combustibles actuels U-Pu et futurs Th-U ou le développement de nouveaux concepts de réacteurs font donc l'objet de nombreuses études. Pour voir le jour, les réacteurs de quatrième génération devront répondre à des exigences sévères quant à leur fonctionnement tout au long du cycle électronucléaire. Quels que soient les codes utilisés, la simulation de réacteurs et des cycles de combustibles innovants nécessite l'emploi de bases de données évaluées qui regroupent les observables et les différents paramètres de physique nucléaire indispensables à la simulation de l'interaction particule matière. Une donnée nucléaire évaluée d'une grandeur physique (section efficace, distribution angulaire, spectre de particule émise,...) est construite à partir de sa connaissance expérimentale (mesure microscopique et intégrale)

et théorique (modélisation par les codes de réactions nucléaires par exemple) et représente sa meilleure estimation. Bien que la qualité des bases de données (JEFF, ENDF, JENDL, ...) soit en constante amélioration, elle est dans de nombreux cas en deçà du niveau de précisions attendues pour l'étude à un niveau industriel des réacteurs du futur.

AMBITIONS – Amélioration des bases de données évaluées pour la simulation des réacteurs nucléaires : augmenter la connaissance et la modélisation des processus fondamentaux via les mesures microscopiques et le développement des techniques de maîtrise des incertitudes et d'évaluation.

L'amélioration de la qualité des bases de données évaluées passe nécessairement, d'une part, par un effort expérimental pour des grandeurs pour lesquelles les mesures existantes sont en contradiction, imprécises et/ou peu fiables, ou n'existent simplement pas, et d'autre part, par l'amélioration des modèles théoriques permettant de calculer ces grandeurs. Il est important de souligner que le maillon clé de l'évaluation est le développement de modèles théoriques de qualité et suffisamment prédictifs. La qualité de ces modèles ne peut être validée qu'en confrontant leurs prédictions à des mesures expérimentales dont la description met en jeu des grandeurs physiques fondamentales. La meilleure connaissance ou les progrès obtenus par l'ensemble de cette activité se concrétisent dans une évaluation des incertitudes associées ainsi que par la validation de ces données nucléaires sur des expériences intégrales relatives aux domaines d'utilisation et d'intérêt (réacteur, aval/amont du cycle, fluence cuve, échauffement nucléaire,...).

Le projet NACRE a pour objectif principal de créer les conditions d'une collaboration étroite entre les expérimentateurs, théoriciens et évaluateurs afin de fournir d'une part des réponses concrètes sur l'évaluation pour quelques « systèmes » cruciaux pour les réacteurs (réponse à la High Priority Request List de l'AEN) et d'autre part de participer à l'amélioration des méthodes et techniques employées à différents stades de la chaîne de l'évaluation des données nucléaires. Tant les aspects instrumentaux et la maîtrise des incertitudes que les développements théoriques et les méthodes d'évaluation sont donc parties intégrantes de ce projet. Il est important de souligner que les savoirs faire des équipes de l'IN2P3 et du CEA ainsi que les instruments auxquels elles ont accès, sont un atout incontestable pour relever les défis expérimentaux et théoriques de la thématique des données nucléaires. NACRE est composé de deux workpackages, l'un concerne l'étude des probabilités de réactions et l'autre les produits de la réaction de fission. L'accent est

mis, dans la plupart des actions, sur le renforcement et le développement des collaborations entre expérimentateurs, théoriciens et évaluateurs afin de nourrir la dynamique de notre communauté. Les outils de l'évaluation tels que les codes TALYS, GEF, FIFRELIN, CONRAD, SPY, CYRUS, EASY II, ..., seront au cœur des différents travaux menés au sein du projet. Enfin, des actions de NACRE affichent une vraie volonté de prise en main par la communauté des expérimentateurs des problématiques de l'évaluation.

Ce projet dans sa globalité s'inscrit dans une perspective de moyen terme, cependant des échéances intermédiaires peuvent être fixées pour certains objectifs comme l'amélioration de l'évaluation de quelques "systèmes". A plus long terme, ce projet propose également de travailler sur la mise au point des expériences innovantes de demain qui permettront de fournir des données nouvelles et précises. Finalement NACRE doit permettre de créer un espace de rencontre et de travail favorable à l'élaboration de projets futurs cohérents et concertés de notre communauté.

Collaboration, porteurs du projet Collaboration NEEDS : CNRS-IN2P3 : CENBG, IPHC Strasbourg, IPN Orsay, LPC Caen, LPSC Grenoble, SUBATECH Nantes CEA : DSM/Irfu, DEN/CAD/DER/SPRC, DAM/DIF IRSN : PSN/SNC Porteurs projets : Maëlle Kerveno (CNRS-IPHC), Cyrille de Saint Jean (CEA/DEN)

Descriptif Projet

Workpackage 1 : les sections efficaces de réaction

Les sections efficaces de réaction représentent la probabilité d'interaction des particules avec la matière. Elles sont un ingrédient essentiel des simulations de l'évolution du cœur des réacteurs et de leur environnement. Des paramètres neutroniques comme, par exemple, le facteur de multiplication, la puissance et divers coefficients de réactivité (vidange sodium, doppler,...) dépendent directement de ces grandeurs. Des études de sensibilité , menées principalement par la communauté des évaluateurs ont montré les limites actuelles de la connaissance des sections efficaces de différents processus nucléaires. En effet, les incertitudes associées, prises en compte dans les simulations de réacteurs, ne permettent pas d'optimiser précisément le fonctionnement ou le dimensionnement des systèmes nucléaires, ni d'atteindre les objectifs de précision fixés par les autorités de sûreté sur les paramètres de fonctionnement du cœur. Dans certains cas présents dans la HPRL de l'AEN, les incertitudes sur les sections efficaces devrait être réduites de

quelques dizaines de pourcent pour atteindre la précision requise sur les paramètres réacteurs. Dans le cadre du projet NACRE, il a été choisi de focaliser sur la mesure et l'évaluation de réactions présentant une ou plusieurs des particularités suivantes : un manque de données de base (cycle du thorium), des incertitudes élevées (mesures de capture d'isotopes fissiles, isotopes fissiles crées en réacteur comme les ^{240,242}Pu, réactions à seuil) ou nécessitant la résolution de challenges fort en terme de dispositifs expérimentaux et de modélisations théoriques (mesures de section inélastique, méthode de substitution).

Le WP1 du projet NACRE se concentre donc, via différentes actions, sur l'amélioration des connaissances de ces sections efficaces du point de vue de la mesure mais également sur l'amélioration des évaluations associées. Un premier volet expérimental concerne la mesure proprement dite de sections efficaces particulières d'intérêt pour les réacteurs utilisant des cycles de combustibles innovants U/Pu, Th/U (actions 1 et 2). Ces mesures sont effectuées autant que possible en collaboration avec les évaluateurs. Un second volet s'attache aux développements de méthodes de mesures indirectes dites de substitution (action 3) afin d'accéder à des réactions mettant en jeu des noyaux à durée de vie très courtes (souvent inaccessibles pour des mesures directes) mais qui jouent pourtant un rôle important dans le cadre de l'incinération de déchets ou de l'étude de nouveaux cycles de combustible. Au-delà du travail purement expérimental lié à la mesure, qu'elle soit directe ou indirecte, une approche théorique pour modéliser les sections efficaces est nécessaire en vue de l'évaluation. Elle est en particulier indispensable dans le cas des méthodes de substitution et des mesures (n,xn) par la méthode (n,xn γ). C'est pourquoi le WP1 du projet NACRE s'articule autour de collaborations fortes déjà existantes avec des théoriciens et évaluateurs, et vise à développer et renforcer ce type de collaboration pour les travaux concernant la méthode de substitution.

1.1 Mesures et évaluations de sections efficaces d'intérêt pour les combustibles actuels et futurs

1.1.1 Mesure et évaluation des sections efficaces (n,γ) et (n,xn) sur ^{233}U

1.1.2 Mesure des sections efficaces de fission ^{231}Pa

1.1.3 Mise en place d'évaluations d'intérêt pour le cycle U/Pu à partir des mesures NTOF disponibles dans EXFOR

1.2 Mesure de la section efficace de la réaction ^{16}O(n,alpha)^{13C}

1.3 Etude de la méthode de substitution

Au-delà, des choix d'activités proposées dans ce workpackage (et du choix des isotopes

associés), les avancées réalisées, les verrous méthodologiques et théoriques trouvés ou les écueils rencontrés pourront permettre la mise en place de collaborations nouvelles et fructueuses entre le CEA, l'IN2P3 et l'IRSN.

Workpackage 2 : les produits de la réaction de fission

Ce workpackage porte sur l'ensemble des observables physiques apparaissant après le processus de fission. Cela correspond notamment en termes de données nucléaires aux rendements de fission, aux spectres/multiplicités neutrons/gammas, ainsi qu'à certaines données de décroissances radioactives liées à la décroissance de produits de fission. Ces données nucléaires interviennent dans la gestion et la prévision de l'aval du cycle du combustible mais aussi dans la physique des réacteurs proprement dite. Par exemple, la connaissance des rendements de fission et des propriétés radioactives des fragments de fission est nécessaire pour estimer plusieurs types d'observables, principalement le burnup , la perte de réactivité, la puissance résiduelle et la production des relâchements gazeux. Un autre exemple majeur est la nécessaire connaissance des spectres de neutrons prompts pour des problématiques de fluence cuve (durée de vie des cuves de réacteurs) car les neutrons rapides sont les principaux contributeurs à la dégradation des matériaux de la cuve. On estime de plus la bonne tenue de ces données nucléaires (données de sections efficaces, de rendements parents et de décroissance des produits de fission) par l'utilisation de mesures intégrales ou d'analyse de combustibles irradiés en réacteur . Cette analyse nécessite à la fois des évaluations non-biaisées , une maîtrise des incertitudes et une connaissance des corrélations dans les données nucléaires comme dans les schémas de calcul. L'ambition des programmes sur les produits de la réaction de fission est d'augmenter significativement la fiabilité des modèles d'évaluation (incertitudes réduites à quelques pourcents). Cet objectif passe par l'amélioration de notre compréhension du processus de fission. Pour cela d'audacieux programmes expérimentaux ont été lancés afin d'obtenir un ensemble d'observables très complet, sur une grande systématique de noyaux et sur un grand domaine en énergie d'excitation. Plusieurs concepts fondamentaux tels que la polarisation de charge, le moment angulaire induit à la scission, le partage de l'énergie d'excitation et la compétition neutron/gamma lors de l'évaporation des fragments sont étudiés afin de décrire le processus de fission. L'ensemble de ces travaux doit permettre de valider les concepts sur lesquels sont basés les modèles. C'est une étape impérative pour la construction d'une évaluation fiable et prédictive.

Une identification des limites des hypothèses de travail tant aux niveaux des méthodes expérimentales que des modèles a été engagée ces dernières années. L'objectif est de décrire au mieux les variances-covariances expérimentales afin d'imposer les contraintes réelles sur les tests de comparaison modèles-mesures. Ces efforts conjoints des différents contributeurs à l'évaluation (théories et expériences) sont le seul moyen de lever les verrous techniques limitant la précision accessible des évaluations. En aval de la question des rendements des produits de fission, l'état actuel des bases de données concernant leur décroissance bêta ne permet pas de reproduire par les calculs, les mesures intégrales de la puissance résiduelle. Le groupe de travail WPEC 25 (AEN/AIEA) a établi une liste de noyaux (filière actuelle) engendrant des écarts de plusieurs pourcents avec les données expérimentales, avec une étude similaire pour le cycle Th/U montrant d'autres noyaux à prendre en compte. Ces noyaux devront être prioritairement remesurés. Des nouvelles données ont déjà permis d'améliorer significativement les calculs de puissance résiduelle électromagnétique émise après un burst de fission thermique du ^{239}Pu . De plus, les données de décroissance, entachées de leurs incertitudes, sont utilisées par les évaluateurs pour calculer les rendements de fission cumulés qui se trouvent alors impactés par ces incertitudes.

L'objectif du WP2 du projet NACRE est d'aborder la thématique des produits de la réaction de fission dans son ensemble, de leur création à leur décroissance, tant sur le plan de la mesure que sur celui de la description théorique afin de fournir de nouvelles évaluations basées sur les modèles de fission et les tests d'hypothèses. La première action du WP2 regroupe les différents acteurs de l'IN2P3 et du CEA travaillant sur la mesure des rendements de fragments de fission et de neutrons/gamma prompts auprès d'installations différentes et avec des instruments divers adaptés aux observables d'intérêt. La mise en commun de ces informations ainsi collectées sur des longues chaines isotopiques, constituera un jeu complet de données permettant de contraindre les modèles théoriques et produire des évaluations de qualité. La deuxième action est focalisée sur la mesure des propriétés de décroissance bêta des produits de fission. La troisième action du WP2 concerne d'une part, les développements théoriques autour de la fission qui contribuent au processus d'évaluation et d'autre part l'évaluation elle-même. Cette action a l'avantage d'ouvrir un espace commun de travail aux expérimentateurs engagés dans la première action et les évaluateurs et théoriciens du domaine. Enfin la dernière action (quatrième) aborde l'avenir instrumental à moyen terme de l'étude des produits

de la réaction de fission.

2.1 Mesures et caractérisation des fragments de fission

2.1.1 Programme à l'ILL

2.1.2 Programme à GSI : expérience SOFIA

2.1.3 Programme à GANIL : VAMOS

2.1.4 Programme à NFS/GANIL : FALSTAFF

2.2 Mesures des propriétés de décroissance des produits de fission

2.3 Des tests des modèles à l'évaluation

2.3.1 Développements et améliorations des outils d'évaluations des observables de fission

2.3.2 Validation des données évaluées des propriétés radioactives et de structure nucléaire des produits de fission

2.4 Prospectives

Annexe C

CURRICULUM VITÆ

Curriculum Vitae -04/2018 -

Maëlle KERVENO

73 Le Gazon
68910 LABAROCHE

44 ans, mariée, 1 enfant

IPHC/DRS - DNR
23 rue du Loess BP 28
F-67037 SRASBOURG cedex 2
maelle.kerveno@iphc.cnrs.fr

RECHERCHE :

2018	**Organisatrice** de **deux Workshops** nationaux dans le cadre du projet **NEEDS-NACRE**
2018	Participation au groupe de travail sur la préparation de la réponse l'appel EURATOM-WP2018, call 4 et 7
2017	**Organisatrice** de **deux Workshops** (national et international) dans le cadre du projet **NEEDS-NACRE** et des échanges **JEFF-NEEDS**
2016	**Organisatrice** de **deux Workshops** nationaux dans le cadre du projet **NEEDS-NACRE**
Depuis 2016	Nommée **Responsable** du **MASTER PROJET OPALE-IN2P3 (données nucléaires)**
2016-2018	**Porteur de projet (CNRS) NEEDS-NACRE** Défi NEEDS (M.I. CNRS) ; PF Systèmes Nucléaires et Scénarios
2015-2018	Nommée **responsable scientifique national** du projet européen **CHANDA** et de fait membre du **comité de pilotage**
2014	**Organisatrice** du **Workshop international on experimental and theoretical problematic around actinides for future reactors (ESNT/CEA)**
Depuis 2014	Nommée **Coordinatrice** de la **communauté « données nucléaires »** France (IN2P3)
2014-2018	**Membre** nommée du **Project Advisory Committee** du projet européen **CHANDA**
2013-2015	**Porteur de projet EEDIN** : Defi NEEDS (M.I. CNRS) ; PF Systèmes Nucléaires et Scénarios
Depuis 2013	**Membre** de **l'équipe pédagogique restreinte** du **M2 PSA** de l'Université de Strasbourg
2013	**Membre** du **comité d'organisation** de « European summer campus 2013 »
2011-2015	**Membre** nommée du **comité de suivi des thèses** de l'IPHC/DRS
2010	**Membre** du **comité de sélection** de l'Univ. de Strasbourg (poste Maître de Conférences)
Depuis 2010	**Membre** élue du **comité d'experts scientifiques (responsable adjointe)** de l'Université de Strasbourg 29ème section
Depuis 2010	**Membre fondatrice** de WINS (workshop international biennal) et membre du **comité d'organisation**
Depuis 2009	**Responsable scientifique** projet Spiral2/NFS à l'IPHC
2009	**Membre** du **comité de sélection** de l'Université de Nantes (poste Maître de Conférences) et de l'école PHELMA Grenoble, (poste Maître de Conférences)
2009	**Membre** du **comité d'organisation** de « European summer campus 2009 »
2007-2015	**Responsable scientifique** du projet GUINEVERE/FREYA à l'IPHC
2006-2010	**Direction** de l'Ecole Energies & Recherches (2006, 2008, 2010)

Depuis 2004 **Membre fondatrice** de l'Ecole Energies & Recherches (école biennale) et depuis membre du **comité d'organisation**
Depuis le 1er octobre 2002 **Chargée de recherche, CNRS,** IPHC, Strasbourg,
2000-2002 **Post-doctorat,** Institut des Sciences Nucléaires de Grenoble
1997-2000 **Doctorat de Physique Nucléaire (mention très honorable)**, Université de Nantes

PORTE PAROLE D'EXPERIENCES :

1998 « ^{208}Pb(n,lcp) » auprès de CYCLONE (Louvain-la-Neuve, Belgique)
2004 « ^{232}Th(n,5n γ) » auprès de CYCLONE (Louvain-la-Neuve, Belgique)
2009 « ^{90}Zr(n,3n) » auprès de SPIRAL2/NFS (GANIL, CAEN, France) LoI
2011 « ^{87}Sr(α,n γ) » auprès du tandem de l'IFIN-HH (Bucarest, Roumanie)
2014 « Letter of Intent for the study of the ^{239}Pu(n,xn γ) reaction cross sections » auprès de GELINA du EC-JRC (Geel, Belgique)
2017 « First tests for a ^{239}Pu(n,xn γ) cross sections measurement » auprès de GELINA du EC-JRC (Geel, Belgique)

ENSEIGNEMENT :

2009-2014 **Université de Strasbourg : M2** Sciences, Mention Physique, PSA
2000-2001 **Demi-ATER à l'université Joseph Fourier de Grenoble**
1998-2000 **Vacations à l'Ecole des Mines de Nantes**

PUBLICATIONS :

Revues à comité de lecture (PRC, EPJA, NIMA,…) : 70
Proceedings de conférence à comité de lecture : 90
Communications orales : 35

EXPERTISE:

2017 **Referee** Eur. Phys. J. web of conference, conférence ND2016 (3 articles)
2016 **Expert** nommée, Working Group 6 de **NuPECC - Long Range Plan** 2016
2015 **Referee** pour Eur. Phys. J. A
2015 participation jury de thèse de Melle Charlotte Duchemin « Étude de voies alternatives pour la production de radionucléides innovants pour les applications médicales », thèse de l'Université de Nantes

Activités de recherches

Préambule : j'évolue dans une petite équipe de l'IPHC/DRS, composée, à ce jour, de trois chercheurs permanents et un doctorant. Nous accueillons chaque année des stagiaires L3/M1/M2.

Depuis ma prise de fonctions à l'IPHC en 2002, je me suis fortement impliquée dans la mise au point de la méthode de la spectroscopie γ-prompte pour l'étude des réactions (n,xn) dans le cadre général du développement des réacteurs nucléaires du futur. Nos expériences se déroulent principalement, depuis 2005, auprès du faisceau de neutrons de l'installation GELINA du EC-JRC Geel, Belgique. Je contribue aussi activement à l'analyse des données (cf. M. Kerveno *et al.* PRC 87 24609 (2013) et M. Kerveno *et al.* Eur. Phys. J. A 50, 162 (2014)). Je travaille actuellement sur la finalisation de l'analyse des mesures réalisées sur ^{238}U et j'encadre les travaux de notre doctorant sur l'analyse des données accumulées sur ^{232}Th. Ces cinq dernières années, notre technique expérimentale et procédures d'analyse ayant atteint une certaine maturité, je me suis également attachée à développer nos liens avec les théoriciens du domaine et la communauté des évaluateurs.

Pour faciliter ces rapprochements, j'ai répondu, en 2013, à l'appel à projets du défi interdisciplinaire NEEDS du CNRS (projet fédérateur « Systèmes Nucléaires et Scénarios »). J'ai obtenu un financement sur 3 ans, me permettant de financer d'une part, les mises à niveau de notre dispositif expérimental à Geel et d'autre part, d'organiser des réunions régulières entre les collègues théoriciens du CEA/DAM (Bruyères le Châtel) et les collègues évaluateurs du CEA/DEN (Cadarache). Cette collaboration nous a déjà permis de présenter nos travaux communs à la dernière conférence internationale ND 2016 à Bruges (Belgique). Une publication de nos résultats dans le journal PRC est prévue dans les mois qui viennent.

Outre l'analyse de données dont j'ai la charge, mon activité de recherche s'orientera dans les années à venir sur l'amélioration de notre méthode expérimentale pour pallier ses insuffisances. Par exemple il est primordial de s'intéresser à la détermination précise des sections efficaces de désexcitation des niveaux de faible énergie. Des mesures de structure sont également envisagées sur ^{238}U, par exemple. Je continuerai mon implication dans le projet NFS et contribuerai à développer un programme expérimental, au-delà de l'expérience « day-one », sur l'étude des réactions (n,2n). Je travaillerai aussi à renforcer nos échanges avec les théoriciens et évaluateurs et j'espère mettre en place des collaborations plus étroites avec les physiciens des réacteurs.

Je présente régulièrement nos travaux lors de différentes occasions nationales et internationales. Notamment, je participe activement à chaque édition du workshop international biennal WINS dédié à la thématique de la diffusion élastique et inélastique du neutron. J'ai présenté également nos travaux lors des workshops communs JEFF-NEEDS et à chacun des ateliers nationaux GEDEPEON puis NEEDS. En 2016, j'ai pu présenter les dernières avancées de nos recherches à la conférence internationale ND2016 qui s'est déroulée à Bruges en Belgique et qui est la conférence majeure de notre thématique. Le travail de communication que j'ai effectué ces dernières années, ainsi que les liens que j'ai pu nouer au sein de la communauté nationale et internationale des données nucléaires m'ont permis d'être invitée à présenter les activités de recherches de notre équipe au workshop « Perspectives on nuclear data for the next decade » organisé par le CEA/DAM en 2014 qui a lieu tous les 9 ans et qui rassemble les acteurs majeurs internationaux de la thématique. J'ai également été nommée comme expert au PAC du projet européen FP7/EURATOM/CHANDA et par la suite, responsable scientifique national représentant le CNRS au comité de pilotage de ce même programme. Je dois donc m'assurer que les équipes impliquées peuvent évoluer dans le projet de façon satisfaisante (tant scientifiquement que financièrement) et je dois participer aux rapports périodiques réalisés pour les instances européennes.

Localement au sein de l'IPHC, j'ai été ou suis, responsable scientifique de deux projets :

- le projet européen FP7/EURATOM/GUINEVERE/FREYA (2007-2015) qui relève de la thématique de la physique des réacteurs et dans lequel notre équipe a été impliquée principalement pour des réalisations techniques (coordination service mécanique et électronique).
- le projet SPIRAL2/NFS (depuis 2009) pour lequel je coordonne les activités des physiciens, étudiants et techniciens/ingénieurs du service mécanique. Parmi les différents travaux dont nous avons la charge, on peut citer la conception et la réalisation de la ligne de faisceau de neutrons et du second collimateur. Pour ce projet, je suis également porte-parole d'une LoI concernant une expérience « day-one ».

En 2015, j'ai été invitée par les responsables du projet fédérateur SNS du Défi NEEDS de la MI du CNRS à proposer une réponse sous forme de projet structurant à l'appel 2016 pour la thématique des données nucléaires. Pour cela, j'ai coordonné le montage du projet NACRE regroupant 7 équipes des laboratoires de l'IN2P3, de 4 départements du CEA et une équipe de l'IRSN. Une fois le montage réalisé, un co-porteur du CEA a été désigné pour m'aider à gérer le projet. Le projet a été évalué très positivement et financé dans sa totalité. Fin 2016, j'ai présenté un premier bilan à l'atelier NEEDS du PF SNS. Nous avons été félicités par le comité scientifique du PF et NACRE a pu servir d'exemple pour le montage d'autres projets structurants en 2018 et 2019. Il a été reconduit en 2017 et 2018 et a obtenu, en 2017, l'intégralité du financement demandé. Afin de défendre ce type de structure de projet auprès des instances ministérielles, la direction de

l'IN2P3 m'a sollicitée pour présenter NACRE lors de l'audition de la commission nationale d'évaluation (CNE2) du 12 janvier 2017. Outre la défense et le suivi de la réalisation des différentes activités du projet NACRE, je me consacre aussi à l'animation scientifique de ce projet en organisant des workshops prospectifs. Enfin je travaille maintenant à la préparation de la réponse au prochain appel de 2019 où une mise à plat du projet sera effectuée pour le rendre de plus en plus efficaces vis-à-vis des ambitions annoncées.

Animation de la recherche

Durant mon parcours, évoluant dans de petites collaborations, j'ai rapidement pris conscience de l'importance pour les chercheurs de bénéficier d'espaces de discussions libres en dehors des rendez-vous officiels des grandes conférences de ma thématique de recherche. Ces moments privilégiés nous permettent de tisser des liens essentiels à tout échange afin de faire progresser nos connaissances de façon cohérente. J'ai donc eu l'idée, avec Arjan Plompen JRC-EC Geel (Belgique), de créer en 2010 un workshop (WINS : Workshop on (In)elastic Neutron Scattering) dédié aux recherches autour de la diffusion élastique et inélastique du neutron permettant de réunir les experts internationaux du domaine. J'ai alors organisé la première édition de ce workshop à Strasbourg. Depuis, tous les deux ans, ces rencontres sont reconduites (Boston-2012, Dresde-2014, Santa Fe-2016, Predeal-2018), permettant des échanges fructueux entre spécialistes.

En 2013, les avancées de mon équipe sur les mesures des sections efficaces (n,xnγ) et les contraintes de notre technique expérimentale nous ont amenés à nous rapprocher de collègues théoriciens afin d'interpréter nos résultats. J'ai donc soumis, en collaboration avec un collègue théoricien du CEA/DAM, un projet de workshop à L'Espace de Structure et de réactions Nucléaires Théorique du CEA Saclay. Cet atelier se proposait de réunir des théoriciens et expérimentateurs du domaine afin de discuter précisément des dernières avancées théoriques et expérimentales sur la diffusion inélastique du neutron sur les actinides. Ce projet bien qu'un peu éloigné du champ de sujets habituellement financés par l'ESNT, a été très favorablement accueilli par le comité scientifique et nous avons obtenu, en mars 2014, le financement de 3 jours de workshop (http://esnt.cea.fr/Phocea/Page/index.php?id=37).

En 2014, sur proposition de la communauté des « données nucléaires » de l'IN2P3, j'ai été nommée par la direction de l'IN2P3 coordinatrice nationale de la thématique pour notre institut. Mon rôle est de réaliser l'interface entre la direction et les physiciens et d'animer notre communauté. Les échanges et les synergies entre équipes s'en trouvent favorisés ainsi que notre visibilité. Un des objectifs est également de nous rendre plus compétitifs lors des différents appels à projets auxquels nous pouvons prétendre. J'organise donc des réunions régulières et un workshop annuel qui réunit notre communauté et durant lequel nous invitons nos collègues des thématiques « physique des réacteurs » et « systèmes et scénarios ». Finalement en 2016, j'ai été nommée responsable du Master Projet OPALE (données Nucléaires pour les réacteurs) à l'IN2P3.

Enseignement / Formation doctorale

Je suis engagée dans la formation doctorale via plusieurs de mes activités. J'ai enseigné pendant 5 ans (2009-2014) au sein du master PSA de l'Université de Strasbourg et je fais, aujourd'hui encore, partie de l'équipe pédagogique restreinte qui aide le directeur du master à piloter sa formation.

Notre équipe propose, chaque année, des sujets de stage (L3-M1-M2) et j'encadre ou co-encadre chacun de nos stagiaires ainsi que nos doctorants. Je m'occupe notamment particulièrement du dernier étudiant en thèse que nous avons recruté en 2016.

En 2011, j'ai été sollicitée par la direction pour mettre en place et faire partie du comité de suivi des thèses du DRS de l'IPHC. Ce comité assure le suivi (via des entretiens annuels et la

présidence du jury de la soutenance à mi-parcours) de tous les doctorants du département afin de vérifier que la thèse se déroule dans de bonnes conditions et qu'elle aboutira à une soutenance dans le temps imparti par le contrat doctoral. Nous pouvons jouer le rôle de médiateur si un étudiant rencontre des difficultés au cours de sa thèse. Nous donnons également un séminaire sur « l'après thèse » et nous effectuons un bilan annuel auprès de la direction de l'IPHC et de l'Ecole Doctorale avant les périodes de réinscription.

Enfin, je suis engagée dans l'organisation d'écoles et notamment l'école Energies & Recherches dont je suis à l'origine avec deux autres collègues de l'IN2P3 et l'Université Joseph Fourier de Grenoble. Cette école a lieu tous les deux ans (première édition en 2004) et a pour but de donner à des doctorants travaillant dans la problématique de l'énergie un aperçu le plus complet possible du panorama énergétique (http://eer.in2p3.fr). Elle aborde les grands thèmes liés à l'énergie au travers des différentes sources, vecteurs et contraintes. Plusieurs organismes que sont l'ADEME, le CEA, le CNRS, l'IFPEN, l'IN2P3, le Ministère de la Recherche, financent ce projet dont le budget global est de l'ordre de 50 k€. J'ai assuré la direction de l'école de 2006 à 2010.

Participation montage de projet / recherche de financement

Porteur du projet EEDIN 2013-2015, PF SNS, Défi NEEDS (10 k€, 10 k€, 8 k€)
Porteur du projet structurant NACRE 2016-2017-2018, PF SNS, Défi NEEDS (125 k€, 129 k€, 114 k€)

6

LISTE DES PUBLICATIONS exhaustive

- Revues à comité de lecture - 70 (13/03/2018)

Données nucléaires

Neutron inelastic scattering measurements on the stable isotopes of titanium
A. Olacel, F. Belloni, C. Borcea, M. Boromiza, P. Dessagne, G. Henning,
M. Kerveno, A. Negret, M. Nyman, E. Pirovano, and A.J.M. Plompen
Physical Review C **96**, 014621 (2017) 16

Cross-section measurements for the ^{57}Fe(n, n γ)^{57}Fe and ^{57}Fe(n, 2n γ)^{56}Fe reactions
A. Negret, M. Sin, C. Borcea, R. Capote, Ph. Dessagne, M. Kerveno, N. Nankov, A. Olacel, A.J.M. Plompen, and C. Rouki
Physical Review C **96**, 024620 (2017) 15

From γ emissions to (n,xn) cross sections of interest: the role of GAINS and GRAPhEME in nuclear reaction modeling
M. Kerveno, A. Bacquias, C. Borcea, Ph. Dessagne, G. Henning, L.C. Mihailescu, A. Negret,
M. Nyman, A. Olacel, A. J. M. Plompen, C. Rouki, G. Rudolf, and J.C. Thiry
European Physical Journal A **51**, 167 (2015) 14

Cross section measurements for the neutron inelastic scattering and the (n, 2n) reaction on 206Pb
A. Negret, L.C. Mihailescu, C. Borcea, Ph. Dessagne, K.H. Guber, M. Kerveno, A.J. Koning, A. Olacel, A.J.M. Plompen, C. Rouki, and G. Rudolf
Physical Review C **91**, 064618 (2015) 13

Measurement of 232Th(n,5n γ) cross sections from 29 MeV to 42 MeV
M. Kerveno, R. Nolte, P. Baumann, Ph. Dessagne, E. Jericha, S. Jokic, A.J. Koning, S. Lukic, J. P. Meulders, A. Nachab, A. Pavlik, M. Reginatto, and G. Rudolf
European Physical Journal A **50,** 162 (2014) 12

Cross-section measurements for the 56Fe(n, xnγ) reactions
A. Negret, C. Borcea, P. Dessagne, M. Kerveno, A.Olacel, A.J.M. Plompen, M. Stanoiu
Physical Review C **90**, 034602 (2014) 11

Neutron inelastic cross section measurements for 24Mg
A. Olacel, C. Borcea, P. Dessagne, M. Kerveno, A. Negret, A. J. M. Plompen
Physical Review C **90**, 034603 (2014) 10

Cross sections for inelastic scattering of neutrons on ^{28}Si and comparison with the ^{25}Mg(α, n)^{28}Si reaction
A. Negret, C. Borcea, D. Bucurescu, D. Deleanu, Ph. Dessagne, D. Filipescu, D. Ghita, T. Glodariu, M. Kerveno, N. Marginean, R. Marginean, C. Mihai, S. Pascu, A. J. M. Plompen, T. Sava, and L. Stroe
Physical Review C **88**, 034604 (2013) 9

7

Measurement of 235U(n,n' γ) and 235U(n,2n γ) reaction cross sections
M.Kerveno, J.C.Thiry, A.Bacquias, C.Borcea, P.Dessagne, J.C.Drohé, S.Goriely, S.Hilaire, E.Jericha, H.Karam, A.Negret, A.Pavlik, A.J.M.Plompen, P.Romain, C.Rouki, G.Rudolf, M.Stanoiu
Physical Review C **87**, 24609 (2013) 8

The gamma efficiency of the GAINS spectrometer
D. Deleanu, C. Borcea, Ph. Dessagne, M. Kerveno, A. Negret, A.J.M. Plompen, J.C. Thiry
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A **624**, 130-136 (2010) 7

A measurement of (n,xn γ) cross sections for ^{208}Pb from threshold up to 20 MeV
L.C. Mihailescu, C. Borcea, P. Baumann, Ph. Dessagne, E. Jericha, H. karam, M. Kerveno, A.J. Koning, A. Pavlik, A.J.M. Plompen, C. Quétel, G. Rudolf
Nuclear Physics A **811**, Issues 1-2, 1-27 (2008) 6

Nucleon-induced reactions at intermediate energies: new data at 96 MeV and theoretical status
V.Blideanu, F.R.Lecolley, J.F.Lecolley, T.Lefort, N.Marie, A.Atac, G.Ban, B.Bergenwall, J.Blomgren, S.Dangtip, K.Elmgren, Ph.Eudes, Y.Foucher, A.Guertin, F.Haddad, A.Hildebrand, C.Johansson, O.Jonsson, M.Kerveno, T.Kirchner, J.Klug, Ch.Le Brun, C.Lebrun, M.Louvel, P.Nadel-Turonski, L.Nilsson, N.Olsson, S.Pomp, A.V.Prokofiev, P.-U.Renberg, G.Rivière, I.Slypen, L.Stuttgé, U.Tippawan, M.Österlund
Physical Review C **70**, 014607 (2004) 5

Measurement of (n,xn γ) reaction cross-sections on natural lead using in-beam gamma-ray spectroscopy
S. Lukic, P.Baumann, S.Hilaire, J.Jeknic, E.Jericha, S.Jokic, M.Kerveno, C.L.Mihailescu, M.Pandurovic, A.Pavlik, A.Plompen, G.Rudolf.
Nuclear Technology & Radiation Protection, Vol. **XVIII**, N°1 (2003) 4

Hydrogen Isotope Double Differential Production Cross Sections Induced by 62.7 MeV Neutrons on a Lead Target
M.Kerveno, F.Haddad, C.Lebrun, Ph.Eudes, T.Kirchner, I.Slypen, J.P.Meulders, J.F.Lecolley, F.R.Lecolley, C.Le Brun, M.Louvel, F.Lefèbvres, S.Hilaire, A.Koning
Physical Review C **66**, 014601 (2002) 3

Scandal- A Facility for Elastic Neutron Scattering Studies in the 50-130 MeV Range
J.Klug, J.Blomgren, A.Ataç, B.Bergenwall, S.Dangtip, K.Elmgren, C.Johansson, N.Olsson, S.Pomp, A.V.Prokofiev, J.Rahm, U.Tippawan, O.Jonsson, L.Nilsson, P.-U.Renberg, P.Nadel-Turonski, A.Ringbom, A.Oberstedt, F.Tovesson, V.Blideanu, C.Le Brun, J.F.Lecolley, F.R.Lecolley, M.Louvel, N.Marie, C.Schweitzer, C.Varignon, Ph.Eudes, F.Haddad, M.Kerveno, T.Kirchner, C.Lebrun, L.Stuttgé, I.Slypen, A.N.Smirnov, R.Michel, S.Neumann, U.Herpers.
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A **489**, Issues 1-3, 282-303 (2001) 2

A facility for measurements of nuclear cross sections for fast neutron cancer therapy
S.Dangtip, A.Ataç, B.Bergenwall, J.Blomgren, K.Elmgren, C.Johansson, J.Klug, N.Olsson, G.Alm Carlsson, J.Söderberg, O.Jonsson, L.Nilsson, P.-U.Renberg, P.Nadel-Turonski, C.Le Brun, F.R.Lecolley, J.F.Lecolley, C.Varignon, Ph.Eudes, F.Haddad, M.Kerveno, T.Kirchner, C.Lebrun
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A **452**, Issue 3, 484-504 (2000) 1

8

Collaboration n_TOF

Neutron-induced fission cross section of Np-237 in the keV to MeV range at the CERN n_TOF facility
Diakaki, M.; Karadimos, D.; Vlastou, R.; et al. (n_TOF Collaboration)
Physical Review C **93**, 034614 (2016) 52

High-accuracy determination of the U-238/U-235 fission cross section ratio up to approximate to 1 GeV at n_TOF at CERN
Paradela, C.; Calviani, M.; Tarrio, D.; et al. (n_TOF Collaboration)
Physical Review C **91**, 024602 (2015) 51

Measurement and analysis of the Am-243 neutron capture cross section at the n_TOF facility at CERN
Mendoza, E.; Cano-Ott, D.; Guerrero, C.; et al. (n_TOF Collaboration)
Physical Review C **90**, 034608 (2014) 50

Neutron-induced fission cross section of U-234 measured at the CERN n_TOF facility
Karadimos, D.; Vlastou, R.; Ioannidis, K.; et al. (n_TOF Collaboration)
Physical Review C **89**, 044606 (2014) 49

The Zr-93(n, gamma) reaction up to 8 keV neutron energy
Tagliente, G.; Milazzo, P. M.; Fujii, K.; et al. (n_TOF Collaboration)
Physical Review C **87**, 014622 (2013) 48

Measurement of the neutron-induced fission cross-section of Am-241 at the time-of-flight facility n_TOF
Belloni, F.; Calviani, M.; Colonna, N.; et al. (n_TOF Collaboration)
European Physical Journal A **49**, 2 (2013) 47

Neutron-induced fission cross section measurement of U-233, Am-241 and Am-243 in the energy range 0.5 MeV <= E-n <= 20 MeV at n_TOF at CERN
Belloni, F.; Milazzo, P. M.; Calviani, M.; et al. (n_TOF Collaboration)
Physica Scripta **T150**, 014005 (2012) 46

Measurement of resolved resonances of Th-232(n, gamma) at the n_TOF facility at CERN
Gunsing, F.; Berthoumieux, E.; Aerts, G.; et al. (n_TOF Collaboration)
Physical Review C **86**, 019902 (2012) 45

Measurement of resolved resonances of Th-232(n, gamma) at the n_TOF facility at CERN
Gunsing, F.; Berthoumieux, E.; Aerts, G.; et al. (n_TOF Collaboration) 44
Physical Review C **85**, 064601 (2012)

Measurement and resonance analysis of the Np-237 neutron capture cross section
Guerrero, C.; Cano-Ott, D.; Mendoza, E.; et al. (n_TOF Collaboration)
Physical Review C **85**, 044616 (2012) 43

9

Resonance neutron-capture cross sections of stable magnesium isotopes and their astrophysical implications
Massimi, C.; Koehler, P.; Bisterzo, S.; et al. (n_TOF Collaboration)
Physical Review C **85**, 044615 (2012) 42

Neutron-induced fission cross section of Cm-245: New results from data taken at the time-of-flight facility n_TOF
Calviani, M.; Meaze, M. H.; Colonna, N.; et al. (n_TOF Collaboration)
Physical Review C **85**, 034616 (2012) 41

Measurement of the neutron-induced fission cross-section of Am-243 relative to U-235 from 0.5 to 20 MeV
Belloni, F.; Calviani, M.; Colonna, N.; et al. (n_TOF Collaboration)
European Physical Journal A **47**, 160 (2011) 40

Zr-96(n,gamma) measurement at the n_TOF facility at CERN
Tagliente, G.; Milazzo, P. M.; Fujii, K.; et al. (n_TOF Collaboration)
Physical Review C **84**, 055802 (2011) 39

Measurement of the U-236(n, f) cross section from 170 meV to 2 MeV at the CERN n_TOF facility
Sarmento, R.; Calviani, M.; Praena, J.; et al. (n_TOF Collaboration)
Physical Review C **84** , 044618 (2011) 38

Neutron capture on (94)Zr: Resonance parameters and Maxwellian-averaged cross sections
Tagliente G.; Milazzo P. M.; Fujii K.; et al. (n_TOF Collaboration)
Physical Review C **84**, 015801 (2011) 37

Neutron-induced fission cross section of (nat)Pb and (209)Bi from threshold to 1 GeV: An improved parametrization
Tarrio D.; Tassan-Got L.; Audouin L.; et al. (n_TOF Collaboration)
Physical Review C **83**, 044620 (2011) 36

(197)Au(n,gamma) cross section in the unresolved resonance region
Lederer C.; Colonna N.; Domingo-Pardo C.; et al. (n_TOF Collaboration)
Physical Review C **83**, 034608 (2011) 35

Neutron-induced fission cross-section of (233)U in the energy range 0.5 < E(n) < 20 MeV
Belloni F.; Calviani M.; Colonna N.; et al. (n_TOF Collaboration)
European Physical Journal A **47**, 2 (2011) 34

Neutron-induced fission cross section of U-234 and Np-237 measured at the CERN Neutron Time-of-Flight (n_TOF) facility
Paradela, C; Tassan-Got, L; Audouin, L, et al. (n_TOF Collaboration)
Physical Review C **82**, 034601 (2010) 33

Neutron physics of the Re/Os clock. I. Measurement of the (n, gamma) cross sections of Os-186,Os-187,Os-188 at the CERN n_TOF facility
Mosconi, M; Fujii, K; Mengoni, A, et al. (n_TOF Collaboration)
Physical Review C **82**, 015802 (2010) 32

10

Neutron physics of the Re/Os clock. III. Resonance analyses and stellar (n, gamma) cross sections of Os-186,Os-187,Os-188
Fujii, K; Mosconi, M; Mengoni, A, et al. (n_TOF Collaboration)
Physical Review C 82, 015804 (2010) 31

The Zr-92(n,gamma) reaction and its implications for stellar nucleosynthesis
Tagliente, G; Milazzo, PM; Fujii, K, et al. (n_TOF Collaboration)
Physical Review C **81**, 055801 (2010) 30

Au-197(n,gamma) cross section in the resonance region
Massimi, C; Domingo-Pardo, C; Vannini, G, et al. (n_TOF Collaboration)
Physical Review C **81**, 044616 (2010) 29

High-accuracy U-233(n, f) cross-section measurement at the white-neutron source n_TOF from near-thermal to 1 MeV neutron energy
Calviani, M; Praena, J; Abbondanno, U, et al. (n_TOF Collaboration)
Physical review C **80**, 044604 (2009) 28

The n_TOF Total Absorption Calorimeter for neutron capture measurements at CERN. C
Guerrero et al. (n_TOF Collaboration)
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A **608**, 424-433 (2009) 27

Experimental study of the ^{91}Zr(n gamma) reaction up to 26 keV.
G Tagliente et al. (n_TOF Collaboration)
Physical Review C **78**, 045804 (2008) 26

Nuclear physics for the Re/Os clock.
M Mosconi et al. (n_TOF Collaboration)
Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics **35**, 014015 (2008) 25

Neutron capture cross section of ^{90}Zr: Bottleneck in the s-process reaction flow
G.Tagliente et al (n_TOF Collaboration)
Physical Review C **77**, 035802 (2008) 24

Measurement of the radiative neutron capture cross section of ^{206}Pb and its astrophysical implications
C. Domingo-Pardo et al. (n_TOF Collaboration)
Physical Review C **76**, 045805 (2007) 23

Neutron reactions and nuclear cosmo-chronology
Mosconi M, Heil M, Kappeler F, et al. (n_TOF Collaboration)
Progress in Particle and Nuclear Physics **59**, 165-173 (2007) 22

Status and outlook of the neutron time-of-flight facility
Gunsing F, Abbondanno U, Aerts G, et al. (n_TOF Collaboration)
Nuclear Instruments & Methods in Physics Research section B **261**, 925-929 (2007) 21

11

The ^{139}La(n,gamma) cross section: Key for the onset of the s-process
R.Terlizzi et al. (n_TOF Collaboration)
Physical Review C **75**, 035807 (2007) 20

Measurement of the neutron capture cross section of the s-only isotope ^{204}Pb from 1 eV to 440 keV
C. Domingo-Pardo et al. (n_TOF Collaboration)
Physical Review C **75**, 015806 (2007) 19

Resonance capture cross section of Pb-207
C Domingo Pardo et al. (n_TOF Collaboration)
Physical Review C **74**, 055802 (2006) 18

New measurement of neutron capture resonances of Bi-209
C Domingo Pardo et al. (n_TOF Collaboration)
Physical Review C **74**, 025807 (2006) 17

Measurement of the Sm-151(n,γ) cross section from 0.6 eV to 1 MeV via the neutron time-of-flight technique at the CERN n_TOF facility
S Marrone et al. (n_TOF Collaboration)
Physical Review C **73**, 034604 (2006) 16

Neutron capture cross section of Th-232 measured at the n_TOF facility at CERN in the unresolved resonance region up to 1 MeV
G Aerts, et al. (n_TOF Collaboration)
Physical Review C **73**, 054610 (2006) 15

Pulse shape analysis of signals from BaF2 and CeF3 scintillators for neutron capture experiments
S. Marrone, E. Berthomieux, F. Becvar, D. Cano-Ott, N. Colonna, C. Domingo-Pardo, F. Gunsing, R.C. Haight, M. Heil, F. Käppeler, et al. (n_TOF Collaboration)
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A **568**, 904-911 (2006) 14

Measurement of the ^{151}Sm(n,γ)^{152}Sm cross section at n_TOF
S. Marrone, U. Abbondanno, G. Aerts, F. Alvarez-Velarde, H. Álvarez-Pol, S. Andriamonje, J. Andrzejewski, G. Badurek, P. Baumann, F. Bečvář *et al.* (n_TOF Collaboration)
Nuclear physics A **758**, 533-536 (2005) 13

Measurements of the ^{90,91,92,94,96}Zr(n, γ) cross-sections at n_TOF
G. Tagliente, U. Abbondanno, G. Aerts, F. Alvarez-Velarde, H. Álvarez-Pol, S. Andriamonje, J. Andrzejewski, G. Badurek, P. Baumann, F. Bečvář et al. (n_TOF Collaboration)
Nuclear physics A **758**, 573-576 (2005) 12

Neutron capture cross section measurements for nuclear astrophysics at CERN n_TOF
U. Abbondanno, G. Aerts, F. Alvarez-Velarde, H. Álvarez-Pol, S. Andriamonje, J. Andrzejewski, G. Badurek, P. Baumann, F. Bečvář, J. Benlliure et al. (n_TOF Collaboration)
Nuclear physics A **758**, 501-504 (2005) 11

12

The data acquisition system of the neutron time of flight facility n_TOF at CERN
U.Abbondanno et al. (n_TOF Collaboration)
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A **538**, 692-702 (2005) 10

Time-energy relation of the n_TOF neutron beam: energy standards revisited
G. Lorusso, et al. (n_TOF Collaboration)
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A **532**, 622-630 (2004) 9

Neutron Capture Cross section Measurement of ^{151}Sm at the CERN Neutron Time of Flight Facility
U.Abbondanno et al. (n-TOF Collaboration)
Physical Review Letters **93**, 161103 (2004) 8

Neutron capture studies on unstable Cs-135 for nucleosynthesis and transmutation
N. Patronis, S. Dababneh, P.A. Assimakopoulos, R. Gallino, M. Heil, F. Käppeler, D. Karamanis, P.E. Koehler, A. Mengoni, R. Plag, (n_TOF Collaboration)
Physical Review C **69**, 025803 (2004) 7

A low background neutron flux monitor for the n_TOF facility at CERN
S. Marrone et al. (n_TOF Collaboration)
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A **517**, 389–398 (2004) 6

Neutron cross–section measurements at the n_TOF facility at CERN
N. Colonna, (n_TOF Collaboration)
Nuclear Instruments & Methods in Physics Research section B **213**, 49–54 (2004) 5

New Experimental validation of the Pulse Height Weighting Technique for Capture cross–section measurements
U. Abbondanno, et al. (n_TOF Collaboration)
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A **521**, 454–467 (2004) 4

Measurement of the n_TOF beam profile with a micromegas detector
J. Pancin et al. (n_TOF Collaboration)
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A **524**, 102–114 (2004) 3

Neutron cross–section measurements in the Th–U cycle by the activation method
D.Karamanis, S. Andriamonje, P. A. Assimakopoulos, G. Doukellis, D. A. Karademos, A. Karydas, M. Kokkoris, S.Kossionides, N. G. Nicolis, C. Papachristodoulou, C.T. Papadopoulos, N. Patronis, P. Pavlopoulos, G.Perdikakis, R. Vlastou, (n_TOF Collaboration)
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A **505**, 381–384 (2003) 2

An optimized C6D6 detector for studies of resonance–dominated (n,g) cross–section
R. Plag, M. Heil, F. Käppeler, P. Pavlopoulos, R. Reifarth, and K. Wisshak, (n_TOF Collaboration)
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A **496**, 425–436 (2003) 1

13

Physique des réacteurs

Experimental Results from the VENUS-F Critical Reference State for the GUINEVERE Accelerator Driven System Project (TPS5799)
Wim Uyttenhove, *et al.*
IEEE Transactions on Nuclear Science **59**, 3194-3200 (2012) 2

Neutronic studies in support of ADS: the MUSE experiments in the MASURCA facility
R.Soule, W.Assal, P.Chaussonnet, C.Destouches, C.Domergue, C.Jammes, J.M.Laurens, J.F.Lebrat, F.Mellier, G.Perret, G.Rimpault, H.Servière, G.Imel, G.M.Thomas, D.Villamarin, E.Gonzalez-Romero, M.Plaschy, R.Chawla, J.L.Kloosterman, Y.Rugana, A.Billebaud, R.Brissot, D.Heuer, M.Kerveno, C.Le Brun, E.Liatard, J.M.Loiseaux, O.Méplan, E.Merle-Lucotte, F.Perdu, J.Vollaire, P.Baeten.
Nuclear Science and engineering **148**, 124-152 (2004) 1

- Proceedings de conférence à comité de lecture - 90

Données nucléaires

How to produce accurate inelastic cross sections from an indirect measurement method?
M. Kerveno, G.Henning, C. Borcea, Ph. Dessagne, M.Dupuis, S.Hilaire, A. Negret, M. Nyman, A. Olacel, E. Party, A. Plompen
4th International
Covariance Workshop (CW2017) in Aix en Provence from October 2 to October 6 2017
- conférence invité - 39
Eur. Phys. J N. soumis **(**2018)

The neutrons for science facility at SPIRAL-2
Ledoux X., Aïche M., Avrigeanu M., Avrigeanu., Balanzat E., Ban-d'Etat B. ;Ban G., Bauge E., Bélier G., Bém P., Borcea C., Caillaud T., Chatillon A., Czajkowski S., Dessagne P., Doré D., Fischer U., Frégeau MO., Grinyer J., Guillous S., Gunsing F., Gustavsson C., Henning G. , Jacquot B., Jansson K., Jurado B., Kerveno M., Klix A., Landoas O., Lecolley F.R., Lecouey J.L., Majerle M., Marie N., Materna T., Mrázek J., Negoita F., Novák J., Oberstedt S., Oberstedt A., Panebianco S., Perrot L., Plompen A.J.M., Pomp S., Prokofiev A.V., Ramillon J.M., Farget F., Ridikas D., Rossé B., Serot O., Simakov S.P., Šimečková E., Štefánik M., Sublet J.C., Taïeb J., Tarrío D., Tassan-Got L., Thfoin I., Varignon C.
Radiation Protection Dosimetry pp. 1-5 (2017) 38

Dissemination of data measured at the CERN n_TOF facility
Dupont E. and the N-TOF collaboration
International Conference on Nuclear Data for Science and Technology 2016, 11-16 September 2016, Bruges, Belgique
Eur. Phys. J Web of Conferences **146**, 07002 (2017) 37

The neutrons for science facility at SPIRAL-2
Ledoux X., Aïche M., Avrigeanu M., Avrigeanu., Balanzat E., Ban-d'Etat B. ;Ban G., Bauge E., Bélier G., Bém P., Borcea C., Caillaud T., Chatillon A., Czajkowski S., Dessagne P., Doré D., Fischer U., Frégeau MO., Grinyer J., Guillous S., Gunsing F., Gustavsson C., Henning G. , Jacquot B., Jansson K., Jurado B., Kerveno M., Klix A., Landoas O., Lecolley F.R., Lecouey J.L., Majerle M., Marie N., Materna T., Mrázek J., Negoita F., Novák J., Oberstedt S., Oberstedt A., Panebianco S., Perrot L., Plompen A.J.M., Pomp S., Prokofiev A.V., Ramillon J.M., Farget F., Ridikas D., Rossé B., Serot O., Simakov S.P., Šimečková E., Štefánik M., Sublet J.C., Taïeb J., Tarrío D., Tassan-Got L., Thfoin I., Varignon C.
International Conference on Nuclear Data for Science and Technology 2016, 11-16 September 2016, Bruges, Belgique
Eur. Phys. J Web of Conferences **146**, 03003 (2017) 36

15

(n,xn g) cross sections on actinides versus reaction code calculations
Maëlle Kerveno, Antoine Bacquias, Francesca Belloni, Catalin Borcea, Roberto Capote, Philippe Dessagne, Marc Dupuis, Greg Henning, Stéphane Hilaire, Toshihiko Kawano, Nicolas Nankov, Alexandru Negret, Markus, Nyman, Eliot Party, Arjan Plompen, Pascal Romain, Charoula Rouki, Gérard Rudolf and Mihai Stanoiu
International Conference on Nuclear Data for Science and Technology 2016, 11-16 September 2016, Bruges, Belgique
Eur. Phys. J Web of Conferences **146**, 11012 (2017) 35

Microscopic description of direct nucleon emission for neutron scattering off even and odd actinides
Dupuis M., Péru S., Lechaftois F, Kerveno M., Dessagne P., Henning G., Bauge E., Hilaire S.
International Conference on Nuclear Data for Science and Technology 2016, 11-16 September 2016, Bruges, Belgique
Eur. Phys. J Web of Conferences **146**, 12002 (2017) 34

Measurement of (N, XN gamma) reaction cross section in W isotopes
Henning G., Bacquias A., Borcea C., Dessagne Ph., Drohé JC., Kerveno M., Plompen AJM. , Negret A., Nyman M., Olacel A., Rudolf G.
International Conference on Nuclear Data for Science and Technology 2016, 11-16 September 2016, Bruges, Belgique
Eur. Phys. J Web of Conferences **146**, 11016 (2017) 33

Inelastic neutron scattering with GAINS@GELINA: an overview of the last decade
Olah L., Plompen A.J.M., Borcea C., Mihailescu C., Negret A., Dessagne Ph., Kerveno M., Rudolf G., Rouki C., Nankov N., Nyman M., Olacel A.
International Conference on Nuclear Data for Science and Technology 2016, 11-16 September 2016, Bruges, Belgique
Eur. Phys. J Web of Conferences **146**, 11004 (2017) 32

(n,xn) cross sections on 56,57Fe
Negret A., Borcea C., Dessagne Ph., Kerveno M., Nankov N., Olacel A., Plompen AJM., Rouki C., Sin M. 4, Stanoiu M.
International Conference on Nuclear Data for Science and Technology 2016, 11-16 September 2016, Bruges, Belgique
Eur. Phys. J Web of Conferences **146**, 11009 (2017) 31

Proton inelastic cross-sections on 16O and 28Si
Boromiza M., Borcea C., Dessagne P., Henning G., Kerveno M., Negret A., Olacel A., Plompen AJM.
International Conference on Nuclear Data for Science and Technology 2016, 11-16 September 2016, Bruges, Belgique
Eur. Phys. J Web of Conferences **146**, 11015 (2017) 30

16

Neutron inelastic cross-sections measurements for ^{nat}Ti
.Olacel A.,Belloni F., Borcea C., Boromiza M., Dessagne P., Henning G., Kerveno M., Negret A., Nyman M., Pirovano E., Plompen AJM.
International Conference on Nuclear Data for Science and Technology 2016, 11-16 September 2016, Bruges, Belgique
Eur. Phys. J Web of Conferences **146**, 11014 (2017) 30

From γ emissions to (n,xn) cross sections of interest: the role of GAINS and GRAPhEME in nuclear reaction modelling
- conférence invité -
M. Kerveno, A. Bacquias, C. Borcea, Ph. Dessagne, G. Henning, L.C. Mihailescu, A. Negret, M. Nyman, A. Olacel, A. J. M. Plompen, C. Rouki, G. Rudolf, and J.C. Thiry
Workshop on Perspectives on Nuclear Data for the Next Decade -2nd edition, October, 14-17, 2014, Bruyères le Châtel, FRANCE
Procceding in Eur. Phys. J. A **51**, 167 (2015) 29

The Limits of the GAINS Spectrometer
A. Negret, C. Borcea, Ph. Dessagne, M. Kerveno, N. Nankov, M. Nyman, A. Olacel, A.J.M. Plompen, C. Rouki
Proceedings of the ND2013 conference, March 4-8, 2013, New York, NY USA
Nuclear Data Sheets **119**, 179-182 (2014) 28

Neutron Inelastic Scattering Measurements for Na, Ge, Zr, Mo and U
A. Bacquias, Ph. Dessagne, M. Kerveno, G. Rudolf, A.J.M. Plompen, J.C. Drohé, C. Rouki, N. Nankov, M. Nyman, C. Borcea, A. Negret, P. Archier, C. De Saint Jean, G. Noguère, C. Vaglio-Gaudard, A. Koning, A. Domula, K. Zuber, L.C. Leal
Proceedings of the ND2013 conference, March 4-8, 2013, New York, NY USA
Nuclear Data Sheets **119**, 186-189 (2014) 27

ANDES Measurements for Advanced Reactor Systems
A.J.M. Plompen, F.-J. Hambsch, S. Kopecky, M. Nyman, C. Rouki, P. Salvador Castiñeira, P. Schillebeeckx, F. Belloni, E. Berthoumieux, F. Gunsing, C. Lampoudis, M. Calviani, C. Guerrero, D. Cano-Ott, E. Gonzalez Romero, M. Aïche, B. Jurado, L. Mathieu, X. Derckx, F. Farget, C. Rodrigues Tajes, et al.
Proceedings of the ND2013 conference, March 4-8, 2013, New York, NY USA
Nuclear Data Sheets **119**, 201-204 (2014) 26

The Neutrons for Science Facility at SPIRAL-2
X. Ledoux, M. Aïche, M. Avrigeanu, V. Avrigeanu, L. Audouin, E. Balanzat, B. Ban-détat, 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, et al.
Proceedings of the ND2013 conference, March 4-8, 2013, New York, NY USA
Nuclear Data Sheets **119**, 353-356 (2014) 25

17

235U and 238U (n,xn gamma) cross-sections
A. Bacquias, Ph. Dessagne, H. Karam, M. Kerveno, G. Rudolf, J.C. Thiry, J.C. Drohé, N. Nankov, M. Nyman, A. Plompen, C. Rouki, C. Borcea, A. Negret, M. Stanoiu, S. Hilaire, P. Romain, S. Goriely, A. Pavlik, E. Jericha
NEMEA-7: Collaborative International Evaluated Library Organisation (CIELO), Geel, Belgium, 5-8 October, 2013
https://www.oecd-nea.org/science/docs/2014/nsc-doc2014-13.pdf (2013) 24

(n,xn g) reaction cross section measurements for (n,xn) reaction studies
M. Kerveno, A. Bacquias, C. Borcea, Ph. Dessagne, J.C. Drohé, H. Karam, N. Nankov, A. L. Negret, A. Plompen, C. Rouki, G. Rudolf, M. Stanoiu, J.C. Thiry
WONDER 2012, 3rd International Workshop on Nuclear Data Evaluation for Reactor Applications, September 25-28,2012 Aix en Provence, France (2012)
Eur. Phys. J. web of Conference **42**, 01005 (2013) 23

The neutrons for sciences Facility at SPIRAL2
X.Ledoux et al.
Applications of Nuclear Techniques: Eleventh International Conference, 12–18 June (2011), Crete, (Greece)
AIP Conference Proceedings **1412**, 55 (2011) 22

Measurement of (n,xn gamma) Reactions of Interest for the New Nuclear Reactors
Thiry J. C.; Borcea C.; Dessagne P.; et al.
International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, Korea, 26 - 30 April (2010), Jeju Island
Journal of the Korean Physical Society **59**, 1880-1883 (2011) 21

Method Developing and Testing for Inelastic Scattering Measurements at the GELINA Facility
Plompen A.; Nankov N.; Rouki C.; et al.
International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, Korea, 26 - 30 April (2010), Jeju Island
Journal of the Korean Physical Society **59**, 1581-1584 (2011) 20

Measurement of (n,xnγ) reactions of interest for the new nuclear reactors
M. Kerveno, et al.
NEMEA-6: Exploring the frontiers of nuclear data and measurements, their uncertainties and covariances, Workshop Krakow, Poland 25-28 October, (2010)
online proceedings : http://www.oecd-nea.org/science/wpec/nemea6/ (2010) 19

Measurement of (n,xnγ) reactions of at high precision
J.C. Thiry, et al.
NEMEA-6: Exploring the frontiers of nuclear data and measurements, their uncertainties and covariances, Workshop Krakow, Poland 25-28 October, (2010)
online proceedings : http://www.oecd-nea.org/science/wpec/nemea6/ (2010) 18

18

Precise Neutron Inelastic Cross Section Measurements at GAINS
A. Negret et al.
7th International Balkan School on Nuclear Physics "Nuclear Structure Challenges with Radioactive Beams" Adrasan-Antalya, Turkey, 15th - 22nd September 2010 (2010) 17

Neutrons For Science - A neutron facility @ SPIRAL-2
X. Ledoux et al.
Final scientific EFNUDAT workshop, CERN, Geneva, Switzerland, 30 August to 2 September 2010 (2010) 16

A neutron beam facility at SPIRAL-2
Ledoux, X; Aiche, M; Ban, G, et al.
WONDER 2009 2nd International Workshop On Nuclear Data Evaluation for Reactor applications, 29th September – 2nd October, 2009 CEA Cadarache Château, France (2009) 15

Measurement of the (n,xn γ) reactions of interest for the new nuclear reactors
J.C. Thiry, C. Borcea, Ph.Dessagne, J.C. Drohé, E. Jericha, H. Karam, M. Kerveno, A. Negret, A. Pavlik, A.J.M. Plompen, C. Rouki, G. Rudolf, M. Staniou
EFNUDAT Scientific Workshop on Neutron Measurements, Theory and Applications, Nuclear data sustainable nuclear energy, 28-30 april 2009, Geel (Belgique) (2009) 14

A neutron beam facility at SPIRAL-2
Ledoux, X; Aiche, M; Ban, G, et al.
International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, APRIL 22-27, 2007 Nice FRANCE
Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, VOL **1**, 459-462 (2008) 13

High resolution neutron (n,xn) cross-section measurements for Pb-206,Pb-207,Pb-208 and Bi-209 from threshold up to 20 MeV
Mihailescu, LC; Baumann, P; Borcea, C, et al.
International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, APRIL 22-27, 2007 Nice FRANCE
Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, VOL **1**, 567-570 (2008) 12

Measurement of Th-232(n,5n gamma) cross sections from 29 to 42 MeV
Kerveno, M; Nolte, R; Baumann, P, et al.
International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, APRIL 22-27, 2007 Nice FRANCE
Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, VOL **2**, 1019-1022 (2008) 11

19

Pb-207(n,2n gamma)Pb-206 cross-section measurements by in-beam gamma-ray spectroscopy
Baumann, P; Borcea, C; Jericha, E, et al.
12th International Symposium on Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics, SEP 04-09, 2005 Univ Notre Dame Notre Dame IN
Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics **819** 561-562 (2006) 10

Measurements of (n,xn) cross sections for hybrid systems
M.Kerveno, P.Baumann, S.Hilaire, E.Jericha, S.Jokic, A.J.koning, S.Lukic, J.P.Meulders, C.L.Mihailescu, R.Nolte, A.Pavlik, A.Plompen, M.Reginatto, G.Rudolf and the n-TOF collaboration
Proceedings of the *8th OECD/NEA Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, Las Vegas – Nevada, (United States) 09-11 November 2004* (2004) 9

Cross-section measurements for (n,xn) reactions by in-beam gamma-ray spectroscopy
Pavlik, A; Baumann, P; Borcea, C, et al.
International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, SEP 26-OCT 01, 2004 Santa Fe NM
Proceedings of International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, Pts 1 and 2, **769** 876-879 (2005) 8

In Beam γ-ray Spectroscopy as a Means for (n, *x*n) Cross-Section Measurements
S.Lukic, P.Baumann, C.Borcea, S.Hilaire, E.Jericha, S.Jokic, M.Kerveno, A.J.koning , J.P.Meulders, L.C.Mihailescu, L.Olah, M.Pandurovic, A.Pavlik, A.Plompen, G.Rudolf and the N_TOF collaboration
Proceedings of the *International Workshop on Nuclear Data for the Transmutation of Nuclear Waste* GSI-Darmstadt, Germany September 1-5, ISBN 3-00-012276-1s (2003) 7

(n,xn) cross section measurements by in beam gamma-ray spectroscopy
M.Kerveno, P.Baumann, S.Hilaire, E.Jericha, S.Jokic, A.J.koning, S.Lukic, J.P.Meulders, C.L.Mihailescu, A.Pavlik, A.Plompen, G.Rudolf and the n-TOF collaboration
International Workshop on P&T and ADS Development, Mol (Belgique) 6-8 octobre 2003 (2003) 6

Measurement of (n,n' gamma) and (n,2n gamma) cross sections on lead
S.Lukic, M.Panurovic, P.Baumann, S.Hilaire, J.Jeknic, E.Jericha, S.Jokic, M.Kerveno, C.L.Mihailescu, A.Pavlik, A.Plompen, G.Rudolf.
Fifth General Conference of the Balkan Physical Union BPU-5, Vrnjacka Banja (Serbia and Montenegro) 25-29 âout 2003 (2003) 5

Scandal- A Facility for Elastic Neutron Scattering Studies in the 50-130 MeV Range
J.Klug, J.Blomgren, A.Ataç... Ph.Eudes, M.Kerveno, F.Haddad, T.Kirchner, C.Lebrun ... I.Slypen
International Conference on Nuclear Data for Sciences and Technologies, Tsukuba (Japan) 7-12 Octobre 2001 (2001)

Cross section data and kerma coefficients at 95 MeV neutrons for medical applications
B.Bergenwall, S.Dangtip, A.Ataç... F.Haddad, M.Kerveno, T.Kirchner, C.Lebrun... I.Slypen.
International Conference on Nuclear Data for Sciences and Technologies, Tsukuba (Japan) 7-12 October 2001 (2001) 4

20

Neutrons for Sciences and Industry- The Uppsala Neutron Beam Facility
C. Johansson, J.Blomgren... M.Kerveno, F.Haddad... I.Slypen.
International Conference on Accelerator Applications/Accelerator Driven Transmutation Technology and Applications, Reno (Nevada-USA) 12-15 Novembre 2001 (2001) 3

Scandal- A Facility for Elastic Neutron Scattering Studies in the 50-130 MeV Range
J.Klug, J.Blomgren, A.Ataç... Ph.Eudes, M. Kerveno, F.Haddad, T.Kirchner, C.Lebrun... I. Slypen.
International Conference on Accelerator Applications/Accelerator Driven Transmutation Technology and Applications, Reno (Nevada-USA) 12-15 Novembre 2001 (2001) 2

Measurement of double differential cross sections for light charged particles production in neutron induced reactions at 62.7 MeV on lead target
M.Kerveno, F.Haddad, C.Lebrun, Ph.Eudes, T.Kirchner, I.Slypen, J.P.Meulders, V.Corcalciuc, J.F.Lecolley, F.R.Lecolley, C. Le Brun, M.Louvel, F.Lefèbvres
6th OECD/NEA Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, Madrid, (Espagne) 11-13 Décembre 2000, (759-770) (2000) 1

Collaboration n_TOF

Towards the high-accuracy determination of the U-238 fission cross section at the threshold region at CERN - n_TOF
Diakaki, M.; Audouin, L.; Berthoumieux, E.; et al. (n_TOF Collaboration)
4th International Workshop On Nuclear Data Evaluation for Reactor Applications (WONDER), Aix en Provence, FRANCE, OCT 05-08, 2015
Eur. Phys. J. Web of Conferences **111**, 02002 (2016) 43

High accuracy U-235(n,f) data in the resonance energy region
Paradela, C.; Duran, I.; Tassan-Got, L.; et al. (n_TOF Collaboration)
4th International Workshop On Nuclear Data Evaluation for Reactor Applications (WONDER), Aix en Provence, FRANCE, OCT 05-08, 2015
Eur. Phys. J. Web of Conferences **111**, 02003 (2016) 42

Study of 234U(n,f) Resonances Measured at the CERN n_TOF Facility
E. Leal-Cidoncha, I. Durán, C. Paradela, D. Tarrío, L.S. Leong, L. Audouin, L. Tassan-Got, J. Praena, B. Berthier, L. Ferrant, S. Isaev, C. Le Naour, C. Stephan, D. Trubert, U. Abbondanno, G. Aerts, H. Álvarez, F. Álvarez-Velarde, S. Andriamonje, J. Andrzejewski, G. Badurek, et al. (n_TOF Collaboration)
Proceedings of the ND2013 conference, March 4-8, 2013, New York, NY USA
Nuclear Data Sheets **119**, 42-44 (2014) 41

Nuclear Astrophysics at n_TOF, CERN
G. Tagliente, and the n-TOF collaboration
13th International Conference on Nuclear Reaction Mechanisms, Varenna,
CERN-Proceedings-2012-002, 475 (2012) 40

21

Fission Cross-section Measurements of (233)U, (245)Cm and (241,243)Am at CERN n_TOF Facility
Calviani M.; Andriamonje S.; Chiaveri E.; et al. (n_TOF Collaboration)
International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, Korea, 26 - 30 April (2010), Jeju Island
Journal of the Korean Physical Society **59**, 1912-1915 (2011) 39

(237)Np(n,f) Cross Section: New Data and Present Status
Paradela C.; Tassan-Got L.; Audouin L.; et al. (n_TOF Collaboration)
International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, Korea, 26 - 30 April (2010), Jeju Island
Journal of the Korean Physical Society **59**, 1908-1911 (2011) 38

High-energy Neutron-induced Fission Cross Sections of Natural Lead and Bismuth-209
Tarrio D.; Tassan-Got L.; Audouin L.; et al. (n_TOF Collaboration)
International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, Korea, 26 - 30 April (2010), Jeju Island
Journal of the Korean Physical Society **59**, 1904-1907 (2011) 37

Neutron Capture Measuremetns on Minor Actinides at the n_TOF Facility at CERN: Past, Present and Future
Cano-Ott D.; Alvarez-Velarde F.; Gonzalez-Romero E.; et al. (n_TOF Collaboration)
International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, Korea, 26 - 30 April (2010), Jeju Island
Journal of the Korean Physical Society **59**, 1809-1812 (2011) 36

Study of Photon Strength Function of Actinides: the Case of (235)U, (238)Np and (241)Pu
Guerrero C.; Alvarez-Velarde F.; Cano-Ott D.; et al. (n_TOF Collaboration)
International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, Korea, 26 - 30 April (2010), Jeju Island
Journal of the Korean Physical Society **59**, 1510-1513 (2011) 35

Neutron cross-sections for next generation reactors: New data from n_TOF
Colonna, N; Abbondanno, U; Aerts, G, et al. (n_TOF Collaboration)
7th International Topical Meeting on Industrial Radiation and Radioisotope Measurement Application, JUN 22-27, 2008 Czech Tech univ Prague CZECH REPUBLIC
Applied Radiation and isotopes **68**, 643-646 (2010) 34

Fission Cross-Section Measurements On U-233 And Minor Actinides At The CERN n_TOF Facility
Calviani, M; Colonna, N; Abbondanno, U, et al. (n_TOF Collaboration)
4th International Workshop on Nuclear Fission and Fission-Product Spectroscopy, MAY 13-16, 2009 Cadarache FRANCE
4th International Workshop on Nuclear Fission and Fission-Product Spectroscopy **1175**,211-218 (2009) 33

Neutron Capture Measurements at the n_TOF Facility
Milazzo, PM; Abbondanno, U; Aerts, G, et al. (n_TOF Collaboration)
1st International Ulaanbaatar Conference on Nuclear Physics and Applications, SEP 08-11, 2008 Ulaanbaatar MONGOL PEO REP
Nuclear Physics and Applications **1109**, 84-89 (2009) 32

22

n_TOF Experiment: Past, Present And Future
Marrone, S; Abbondanno, U; Aerts, G, et al. (n_TOF Collaboration)
1st International Ulaanbaatar Conference on Nuclear Physics and Applications, SEP 08-11, 2008 Ulaanbaatar MONGOL PEO REP
Nuclear Physics and Applications **1109**, 78-83 (2009) 31

Measurement of neutron induced fission of U-235, U-233 and Cm-245 with the FIC detector at the CERN n_TOF facility
Calviani, M; Karadimos, D; Abbondanno, U, et al. (n_TOF Collaboration)
International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, APRIL 22-27, 2007 Nice FRANCE
Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, VOL **1**, 335-338 (2008) 30

Neutron resonance spectroscopy at n_TOF at CERN
Gunsing, F; Abbondanno, U; Aerts, G, et al. (n_TOF Collaboration)
International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, APRIL 22-27, 2007 Nice FRANCE
Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, VOL **1**, 537-542 (2008) 29

Simultaneous measurement of the neutron capture and fission yields of U-233
Berthoumieux, E; Abbondanno, U; Aerts, G, et al. (n_TOF Collaboration)
International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, APRIL 22-27, 2007 Nice FRANCE
Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, VOL **1**, 571-574 (2008) 28

The U-234 neutron capture cross section measurement at the n_TOF facility
Lampoudis, C; Abbondanno, U; Aerts, G, et al. (n_TOF Collaboration)
International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, APRIL 22-27, 2007 Nice FRANCE
Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, VOL **1**, 595-598 (2008) 27

Capture cross section measurements of Os-186,Os-187,Os-188 at n_TOF: the resolved resonance region
Fujii, K; Mosconi, M; Milazzo, PM, et al. (n_TOF Collaboration)
International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, APRIL 22-27, 2007 Nice FRANCE
Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, VOL **1**, 599-602 (2008) 26

23

The neutron capture cross sections of Np-237(n,gamma) and Pu-240(n,gamma) and its relevance in the transmutation of nuclear waste
Guerrero, C; Abbondanno, U; Aerts, G, et al. (n_TOF Collaboration)
International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, APRIL 22-27, 2007 Nice FRANCE
Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, VOL **1**, 627-630 (2008) 25

Measurement of the Au-197(n,gamma) cross section at n_TOF: towards a new standard
Massimi, C; Abbondanno, U; Aerts, G, et al. (n_TOF Collaboration)
International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, APRIL 22-27, 2007 Nice FRANCE
Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, VOL **2**, 1265-1268 (2008) 24

Measurement of the Zr-90,Zr-91,Zr-92,Zr-93,Zr-94,Zr-96(n,gamma) and La-139(n,gamma) cross sections at n_TOF
Tagliente, G; Abbondanno, U; Aerts, G, et al. (n_TOF Collaboration)
International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, APRIL 22-27, 2007 Nice FRANCE
Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, VOL **2**, 1303-1306 (2008) 23

Improved lead and bismuth (n,gamma) cross sections and their astrophysical impact
Domingo-Pardo, C; Abbondanno, U; Aerts, G, et al. (n_TOF Collaboration)
International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, APRIL 22-27, 2007 Nice FRANCE
Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, VOL **2**, 1311-1314 (2008) 22

Recent results at n_TOF and future perspectives
Marrone, S; Abbondanno, U; Aerts, G, et al. (n_TOF Collaboration)
9th Torino Workshop on Evolution and Nucleosynthesis in AGB Stars/2nd Perugia Workshop on Nuclear Astrophysics, OCT 21-27, 2007 Perugia ITALY
Ninth *Torino* Workshop on Evolution and Nucleosynthesis in AGB Stars/2nd Perugia Workshop on Nuclear Astrophysics, 90-97 (2008) 21

The measurement of the Pb-206(n,gamma) cross section and stellar implications
Domingo-Pardo, C; Abbondanno, U; Aerts, G, et al. (n_TOF Collaboration)
3rd Europhysics Conference on Nuclear Physics in Astrophysics (NPA3), MAR 26-31, 2007 Dresden GERMANY
Journal of Physics **35**, 014020 (2008) 20

Nuclear physics for the Re/Os clock
Mosconi, M; Heil, M; Kappeler, F, et al. (n_TOF Collaboration)
3rd Europhysics Conference on Nuclear Physics in Astrophysics (NPA3), MAR 26-31, 2007 Dresden GERMANY
Journal of Physics **35**, 014015 (2008) 19

24

Measurement of the neutron induced fission cross section on transuranic (TRU) elements at the n_TOF facility at CERN
Mastinu, PF; Abbondanno, U; Aerts, G, et al. (n_TOF Collaboration)
7th Latin American Symposium on Nuclear Physics and Applications, JUN 11-16, 2007 Cusco PERU
VII Latin American Symposium on Nuclear Physics and Applications **947**, 43-48 (2007) 18

Measurements of neutron capture cross-sections at n_TOF
Tagliente, G; Abbondanno, U; Aerts, G, et al. (n_TOF Collaboration)
6th Latin American Symposium on Nuclear Physics and Applications, OCT 03-07, 2005 Iguazu ARGENTINA
VI Latin American Symposium on Nuclear Physics and Applications **884**, 265-271 (2007) 17

Neutron reactions and nuclear cosmo-chronology
Mosconi, M; Heil, M; Kappeler, F, et al. (n_TOF Collaboration)
International Workshop on Nuclear Physics/28th Course Radioactive Beams, Nuclear Dynamics and Astrophysics, SEP 16-24, 2006 Erice ITALY
Progress in Particle and Nuclear Physics **59**, 165-173 (2007) 16

Status and outlook of the neutron time-of-flight facility
Gunsing, F; Abbondanno, U; Aerts, G, et al. (n_TOF Collaboration)
19th International Conference on Application of Accelerators in Research and Industry, AUG 20-25, 2006 Ft Worth TX
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B **261**, 925-929 (2007) 15

Neutron capture cross section measurements at n_TOF of Np-237, Pu-240 and Am-243 for the transmutation of nuclear waste
Cano-Ott, D; Abbondanno, U; Aerts, G, et al. (n_TOF Collaboration)
12th International Symposium on Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics, SEP 04-09, 2005 Univ Notre Dame Notre Dame IN
Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics **819** 318-322 (2006) 14

Measurement of the resonance capture cross section of Pb-204,Pb-206 and termination of the s-process
Domingo-Pardo, C; O'Brien, S; Abbondanno, U, et al. (n_TOF Collaboration)
12th International Symposium on Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics, SEP 04-09, 2005 Univ Notre Dame Notre Dame IN
Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics **819** 288-292 (2006) 13

Measurement of La-139(n, gamma) cross section
Terlizzi, R; Abbondanno, U; Acrts, G, et al. (n_TOF Collaboration)
12th International Symposium on Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics, SEP 04-09, 2005 Univ Notre Dame Notre Dame IN
Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics **819** 283-287 (2006) 12

Implications of Sm-151(n,gamma) cross section at n_TOF
Marrone, S; Abbondanno, U; Aerts, G, et al. (n_TOF Collaboration)
International Conference on Frontiers in Nuclear Structure, Astrophysics and Reactions (FINUSTAR), SEP 12-17, 2005 Kos GREECE
Frontiers in Nuclear Structure Astrophysics, and Reactions: FINUSTAR **831**, 502-504 (2006)

25

11

The n(-)TOF facility at CERN: Performances and first physics results
Abbondanno, U; Aerts, G; Alvarez, H, et al. (n_TOF Collaboration)
International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, SEP 26-OCT 01, 2004 Santa Fe NM
Proceedings of International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, Pts 1 and 2, **769**, 724-729 (2005) 10

Measurement of the Th-232 neutron capture cross section at the CERN n_TOF facility
Aerts, G; Abbondanno, U; Alvarez, H, et al. (n_TOF Collaboration)
International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, SEP 26-OCT 01, 2004 Santa Fe NM
Proceedings of International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, Pts 1 and 2, **769**, 1470-1473 (2005) 9

Measurements at n_TOF of the neutron capture cross section of minor actinides relevant to the nuclear waste transmutation
Cano-Ott, D; Abbondanno, U; Aerts, G, et al. (n_TOF Collaboration)
International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, SEP 26-OCT 01, 2004 Santa Fe NM
Proceedings of International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, Pts 1 and 2, **769**, 1442-1445 (2005) 8

New measurement of the capture cross section of bismuth and lead isotopes
Domingo-Pardo, C; Tain, JL; Abbondanno, U, et al. (n_TOF Collaboration)
International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, SEP 26-OCT 01, 2004 Santa Fe NM
Proceedings of International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, Pts 1 and 2, **769**, 1521-1524 (2005) 7

High-resolution study of Np-237 fission cross section from 5 eV to 1 MeV
Furman, W; Cennini, P; Ketlerov, V, et al. (n_TOF Collaboration)
International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, SEP 26-OCT 01, 2004 Santa Fe NM
Proceedings of International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, Pts 1 and 2, **769**, 1039-1042 (2005) 6

Measurement of capture cross sections of ^{90,91,92,94,96}Zr isotopes at n_TOF
Moreau, C; Fujii, K; Tagliente, G, et al. (n_TOF Collaboration)
International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, SEP 26-OCT 01, 2004 Santa Fe NM
Proceedings of International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, Pts 1 and 2, **769**, 880-883 (2005) 5

Neutron capture cross sections for the Re/Os clock
Mosconi, M; Mengoni, A; Heil, M, et al. (n_TOF Collaboration)
International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, SEP 26-OCT 01, 2004 Santa Fe NM
Proceedings of International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, Pts 1 and 2, **769**, 1335-1338 (2005) 4

26

Neutron capture cross section measurements for nuclear astrophysics at CERN n_TOF
Abbondanno, U; Aerts, G; Alvarez-Velarde, F, et al. (n_TOF Collaboration)
8th International Symposium on Nuclei in the Cosmos (NIC8), JUL 19-23, 2004 Vancouver CANADA
Nuclear Physics A **758**, 501C-504C (2005) 3

Measurement of the Sm-151(n,gamma)Sm-152 cross section at n_TOF
Marrone, S; Abbondanno, U; Aerts, G, et al. (n_TOF Collaboration)
8th International Symposium on Nuclei in the Cosmos (NIC8), JUL 19-23, 2004 Vancouver CANADA
Nuclear Physics A **758**, 533C-536C (2005) 2

Measurements of the ^{90,91,92,94,96}Zr(n, gamma) cross-sections at n_TOF
Tagliente, C; Abbondanno, U; Aerts, G, et al. (n_TOF Collaboration)
8th International Symposium on Nuclei in the Cosmos (NIC8), JUL 19-23, 2004 Vancouver CANADA
Nuclear Physics A **758**, 573C-576C (2005) 1

Physique des réacteurs

Current Progress and Future plans of the FREYA Project
A. Kochetkov, P. Baeten, A. Billebaud, S. Chabod, F.R. Lecolley, J.L. Lecouey, G. Lehaut, N. Marie, F. Mellier, H.E. Thyébault, W. Uyttenhove, G. Vittiglio, J. Wagemans, G. Ban,
P. Dessagne, M. Kerveno, and J.C. Steckmeyer
Second International Workshop of Technology and Components of Accelerator-Driven Systems, 21-23 May 2013, Nantes, France
Nuclear Science NEA/NSC/DOC(2015)7, P.70 (2015) 8

The GUINEVERE Experiment: First PNS Measurements in a Lead Moderated Sub-Critical Fast Core
H.E. Thyébault, P. Baeten, A. Billebaud, S. Chabod, A. Kochetkov, F.R. Lecolley, J.L. Lecouey, G. Lehaut, N. Marie, F. Mellier, W. Uyttenhove, G. Vittiglio, J. Wagemans, G. Ban, P. Dessagne, M. Kerveno, and J.C. Steckmeyer
ICAPP'12 Conference, Chicago, USA, June 24-28, 2012
Proceedings paper 12144, (2012) 7

The Guinevere project at the VENUS-F Facility
P.Baeten, H.Aït Abderrahim, G.Ban, M.Baylac, G.Bergmans, A.Billebaud, D.Bondoux, J.Bouvier, S.Chabod, JM.De Conto, P.Dessagne, G.Gaudiot, JM.Gautier, G.Granget, G.Heitz, M.Kerveno, A.Kochetkov, B.Laune, F.R.Lecolley, J.L.Lecouey, N.Marie, F.Mellier, Y.Merrer, A.Nuttin, D.Reynet, J.C.Steckmeyer, W.Uyttenhove, D. Vandeplassche, F.Vermeersch, G.Vittiglio.
European Nuclear Conference (ENC 2010), Barcelona, Espagne (2010) 6

Monitoring fast Neutron Sources For Accelerator Driven Subcritical reactor Experiments
G.Ban, A.Billebaud, R.Brissot, S.Chabod, P.Dessagne, J.M.Fontbonne, M.Kerveno, C.Lebrun, F.R.Lecolley, J.F.Lecolley, J.L.Lecouey, E.Liatard, N.Marie, A.Nuttin, J.C.Steckmeyer
Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their Applications (ANIMMA 2009), 7-10 juin 2009, Marseille France (2009) 5

27

The GUINEVERE project for Accelerator Driven System physics
A.Billebaud, P.Baeten, H.Aït Abderrahim, G.Ban, M.Baylac, G.Bergmans, D.Bondoux, J.Bouvier, S.Chabod, A.Chetnitkov, JM.De Conto, P.Dessagne, G.Gaudiot, JM.Gautier, G.Granget, G.Heitz, M.Kerveno, A.Kochetkov, B.Laune, F.R.Lecolley, J.L.Lecouey, N.Marie, F.Mellier, Y.Merrer, A.Nuttin, D.Reynet, J.C.Steckmeyer, D.vandeplassche, F.Vermeersch, G.Vittiglio
Conférence GLOBAL 2009 6-11 septembre, Paris France (2009) 4

GUINEVERE: Construction of a Zero-Power Pb ADS at Mol
Billebaud A., Baeten P., Aït Abderrahim H., Ban G., Baylac M. et al
International Topical Meeting on Nuclear Research Applications and Utilization of Accelerators (AccApp'09) - Satellite Meeting European Fast Neutron Transmutation Reactor Projects (MYRRHA/Xt-ADS), Autriche (2009) (2009) 3

The GUINEVERE project at the VENUS facility
P.Baeten, H.Aït Abderrahim, T.Aoust, G.Bergmans, J.Heyse, D.Maes, B.Verboomen, F.Vermeersch, G.Vittiglio, G.Ban, M.Baylac, A.Billebaud, D.Bondoux, J.Bouvier, JM.De Conto, P.Dessagne, G.Gaudiot, JM.Gautier, D.Grondin, G.Heitz, M.Kerveno, B.Laune, F.R.Lecolley, J.L.Lecouey, D.Marchand, N.Marie, Y.Merrer, R.Micoud, M.Planet, D.Reynet, C.Ruescas, J.C.Steckmeyer, G.Granget, F.Mellier, G.Rimpault
International Conference on the Physics of Reactors, 2008, Interlaken, Switzerland, September 14–19, 2008 (2008) 2

The MUSE-4 experiment: prompt reactivity and neutron spectrum measurements
A.Billebaud, R.Brissot, D.Heuer, M.Kerveno, C.Le Brun, E.Liatard, J.M.Loiseaux, O.Méplan, E.Merle, F.Perdu, J.Vollaire, C.Destouches, P.Chaussonnet, J.M.Laurens.
International Conference on the New Frontiers of Nuclear Technology: Reactor Physics, Safety and High-Performance Computing, (PHYSOR 2002), Séoul (Corée) 7-10 octobre 2002, Proceedings sur CD-Rom (ANS, 2002) 13C-01 (2002) 1

28

- Publication dans des revues sans comité - 6

Measurement of (n, xn γ) reaction cross sections in W isotopes
Henning, G., Bacquias, A., Borcea, C., Dessagne, P., Drohé, J.C., Kerveno, M., Negret, A., Nyman, M., Olacel, A., Plompen, A.J.M., Rudolf, G., and Scholtes, P., (2015).
14th International Conference on Nuclear Reaction Mechanisms, Varenna (Italie), 15-19 juin 2015. (2015) 6

GRAPhEME : a setup to measure (n, xn γ) reaction cross sections.
Henning, G., Bacquias, A., Borcea, C., Dessagne, P., Drohé, J.C., Kerveno, M., Negret, A., Nyman, M., Olacel, A., Plompen, A.J.M., Rudolf, G., (2015),
Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications, 20-24 April 2015, Lisbon Congress Center. (2015) 5

Neutron inelastic scattering, recent experiments and their interpretation
A.J.M. Plompen et al.
13th International Conference on Nuclear Reaction Mechanisms, Varenna, 2012
CERN-Proceedings-2012-002, 303 (2012) 4

Study of (n,xn γ) reactions on 235,238U
A. Bacquias, C. Borcea, Ph. Dessagne, M. Kerveno et al.,
13th International Conference on Nuclear Reaction Mechanisms, Varenna, 2012
CERN-Proceedings-2012-002, 117 (2012) 3

Study of (n,xn g) reactions on 238U
A.Bacquias, C.Borcea, Ph.Dessagne, M.Kerveno, J.C.Drohé, N.Nankov, A.L.Negret, N.Nyman, A.J.M.Plompen, C.Rouki, G.Rudolf, M.Stanoiu, J.C.Thiry.
JRC scientific and policy report, EUR – Scientific and Technical Research series – ISSN 1831-9424 (online), ISBN 978-92-79-28076-4 (pdf), (2012) 2

Physical aspects of lead as a neutron producing target for accelerator transmutation devices
Ph.Eudes**,** F.Haddad**,** M.Kerveno, C.Lebrun, T.Kirchner, I.Slypen, J.P.Meulders, V.Corcalciuc, J.F.Lecolley, F.R.Lecolley, C. Le Brun, M.Louvel, F.Lefèbvres
European Commission project report, EURATOM**,** EUR 19794 EN, 16-27 (2001) 1

- Communications à des congrès, symposium - 5

Présentation orale

(n,xn g) cross sections on actinides versus reaction code calculations
Kerveno M., Bacquias A., Borcea C., Capote R., Dupuis M., Negret A., Kawano T., Nyman M., Plompen A., Romain P., on behalf of the collaboration.
International Conference on Nuclear Data for Science and Technology 2016, 11-16 September 2016, Bruges, Belgique 5

29

Measurements of ^{232}Th(n,5n γ) cross section from 29 MeV to 42 MeV
M.Kerveno et al.
International Conference on Nuclear Data for Science and Technology 2007, 22-27 April 2007, Nice, France. 4

Posters

Measurements of (n,xn) cross sections for hybrid systems
8th OECD/NEA Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, 09-11 November 2004, Las-Vegas, Nevada, United-States (2004) 3

Measurement of double differential cross sections for light charged particles production in neutron induced reactions at 62.7 MeV on lead target
6th OECD/NEA Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, 11-13 December 2000, Madrid, Espagne (2000) 2

Congrès général de la Société Française de Physique, Clermont Ferrand, juillet 1999
Poster dans le cadre du colloque no 11 : *Les données nucléaires : pourquoi et comment ? Besoins actuels et développement des méthodes d'évaluation* (1999) 1

- Séminaires, workshops - 35

Workshops

Projet structurant : le Noyau Au Cœur du RéactEur - bilan 2016-2017
M.Kerveno (2018)
NEEDS Workshop « Atelier bilan 2017», Grenoble, France, 9-10 avril 2018 26

Pôle 1 : Activités microscopiques données nucléaires et expériences sur réacteur
M.Kerveno (2018)
GDR SciNEE, atelier de lancement, Lyon, 1-2 février 2018 25

Foreseen experimental activities at CNRS-IN2P3 related to nuclear energy researches (2018-2021 and beyond)
Kerveno, M. (2017)
first Technical Meeting on "Long-term international collaboration to improve nuclear data evaluation and evaluated data files"
IAEA, Vienna, Austria, 18-21 December 2017 24

Neutron inelastic scattering studies with GRAPhEME at GELINA
M. Kerveno (2017)
EUFRAT User Meeting "Progress of Nuclear Data Measurements using JRC's unique Facilities" JRC-Geel, Geel, Belgium, 4-7 December 2017
- conférence invité - 23

Les données nucléaires pour les réacteurs
M.Kerveno
Journées scientifiques du pôle radiobiologie : Données expérimentales pour les modèles et simulations, UCBL Lyon 1, 12-13 Octobre 2017 22

30

The NEEDS/NACRE project
le Noyau Au Cœur du RéactEur
M.Kerveno (2017)
JEFF-NEEDS Workshop
Addressing the JEFF-4 Experimental Nuclear Data Needs
Paris, France, 24 – 25 April 2017 21

Projet structurant : le Noyau Au Cœur du RéactEur
Et
Le Noyau Au Cœur du RéactEur: Bilan scientifique WP1- les sections efficaces de réaction
M.Kerveno (2016)
NEEDS Workshop « Atelier bilan », Paris, France, 15-16 décembre 2016 20

(n,xn g) measurements at the future NFS@GANIL facility
M.Kerveno (2016)
WINS 2016, International Workshop on Inelastic and Elastic Neutron Scattering, 2016, 13-15th April, Santa Fe, NM, USA 19

Les données nucléaires pour les réacteurs à l'IPHC / IN2P3 / CNRS
M.Kerveno (2016)
WORKSHOP Données Nucléaires IN2P3-CEA, Strasbourg, 02-03 mars 2016 18

Etude Expérimentale de la Diffusion Inélastique du Neutron pour les réacteurs du futur: cas de l'uranium 238; de la mesure à la description théorique pour enrichir l'évaluation
M.Kerveno (2016)
NEEDS Workshop « Atelier bilan »
Paris, France, 7-8 Janvier 2016 17

Mesures des sections efficaces de production de particules légères
M.Kerveno (2014)
WORKSHOP Données Nucléaires à l'IN2P3, Orsay, 17 décembre 2014 16

(n,xn g) reaction cross section measurements for (n,xn) reaction studies
M.Kerveno (2014)
WINS 2014, International Workshop on Inelastic and Elastic Neutron Scattering, December 3-4, 2014 Dresden, Germany 15

Etude Expérimentale de la Diffusion Inélastique du Neutron pour les réacteurs du futur : cas de l'uranium 238 ; de la mesure à la description théorique pour enrichir l'évaluation.
M.Kerveno (2014)
NEEDS-JEFF Workshop « NUCLEAR DATA EVALUATION »
Issy-les-Moulineaux, France, 24 – 25 Novembre 2014 14

31

Mesure de données nucléaires liées aux recherches sur les réacteurs de génération IV
M.Kerveno (2012)
Atelier GEDEPEON – Journées GEDEPEON de bilan des actions soutenues, Paris (France) 17-18 Décembre 2012 13

(n,xn g) reaction cross section measurements for (n,xn) reaction studies
M.Kerveno
WINS 2012, International Workshop on Inelastic and Elastic Neutron Scattering, September 17-19, 2012 Boston, M, USA 12

Mesure des sections efficaces de réactions (n,xn γ) sur les actinides
M.Kerveno (2011)
Atelier GEDEPEON – Journées GEDEPEON de bilan des actions soutenues, Paris (France) 12-13 Janvier 2011 11

Measurement of actinides (n,xn g) cross sections : Towards the evaluation
M.Kerveno (2010)
GEDEPEON Workshop « NUCLEAR DATA EVALUATION »
Issy-les-Moulineaux, France, 29 – 30 Novembre 2010 10

Mesure des sections efficaces de réactions (n,xn γ) sur les actinides
M.Kerveno (2009)
Atelier GEDEPEON – Journées GEDEPEON de bilan des actions soutenues, Paris (France) 18-19 Novembre 2009 9

Mesure des sections efficaces de réactions (n,xn γ) sur les actinides
M.Kerveno (2009)
Atelier GEDEPEON – Données nucléaires, Paris (France) 16-17 Novembre 2009 8

Mesure des sections efficaces de réactions (n,xn γ) sur les actinides
M.Kerveno (2008)
Atelier GEDEPEON – Journées GEDEPEON de bilan des actions soutenues, Paris (France) 10 Décembre 2008 7

Mesure des sections efficaces de réactions (n,xn γ) sur les actinides
M.Kerveno (2007)
Atelier GEDEPEON – Journées GEDEPEON de bilan des actions soutenues, Fontenay sous bois (France) 5-6 Décembre 2007 6

Mesure des sections efficaces de réactions (n,xn γ) sur les actinides
M.Kerveno (2006) 5
Atelier GEDEPEON – Journées GEDEPEON de bilan des actions soutenues, Paris (France) 11-12 Décembre 2006 4

32

Mesure des sections efficaces de réactions (n,xn)
M.Kerveno (2004)
Atelier GEDEPEON – Journées GEDEPEON de bilan des actions soutenues, Grenoble (France) 7-9 Décembre 2004 3

Etude des réactions (n,xn) grâce à la spectroscopie gamma en prompte
M.Kerveno (2003)
Atelier GEDEPEON – Journées GEDEPEON de bilan des actions soutenues, Grenoble (France) 8-10 Décembre 2003 2

(n,xn) cross section measurements by in beam gamma-ray spectroscopy *(Poster)*
M.Kerveno, P.Baumann, S.Hilaire, E.Jericha, S.Jokic, A.J.koning, S.Lukic, J.P.Meulders, C.L.Mihailescu, A.Pavlik, A.Plompen, G.Rudolf and the n-TOF collaboration
International Workshop on P&T and ADS Development, Mol (Belgique) 6-8 octobre 2003 1

Séminaires

Nucléaire, Energie, Environnement, Déchets, Société : un outil collaboratif
CEA/DAM Bruyères-le-Châtel, novembre 2015 7

Les réacteurs du futur : le second souffle des réactions (n,xn)
CEA/DAM Bruyères-le-Châtel, juin 2004 6

(n,xn) measurements by the GRACE group
PTB Braunschweig, mars 2003 5

Mesures de sections efficaces lors de réactions induites par neutrons (dans le cadre de GEDEON)
LPC Caen, avril 2001 4
IReS Strasbourg, avril 2001 3
CENBG Bordeaux, mai 2001 2

Mesures de production de particules chargées légères induite par neutrons entre 30 et 65 MeV sur cible de plomb
Louvain-la-Neuve, mai 1999 1

Audition

Les données nucléaires pour les réacteurs : le projet structurant NACRE
Audition CNE, 12 janvier 2017, Maison de la Chimie Paris VII 1

Bibliographie

[1] Inventaire national des matières et déchets radioactifs, bilan à fin 2015. Andra-587-DICOD/16-0207-ISSN : 2105-3065 -Décembre 2016, 2016.

[2] Le cycle Électronucléaire : De la fission aux nouvelles filières. ECOLE INTERNATIONALE JOLIOT-CURIE DE PHYSIQUE NUCLEAIRE, 2006.

[3] La gestion des déchets nucléaires ; la contribution du cnrs et de ses partenaires à travers le programme sur l'aval du cycle électronucléaire pace. Centre National de la Recherche Scientifique, 2005.

[4] Loi n^o 91-1381 du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs. online : https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000356548&categorieLien=id, .

[5] Rapport d'activité 1992-1993. Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules, 1994.

[6] C.Rubia et al. Conceptual design of a fast neutron operated high power energy amplifier. CERN/AT/95-44(ET), 1995.

[7] Rapport d'activité 1992-1993. Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules, 1998.

[8] Production d'énergie nucléaire et traitement des déchets : des filières d'aujourd'hui aux solutions innovantes. ECOLE INTERNATIONALE JOLIOT-CURIE DE PHYSIQUE NUCLEAIRE, 1996.

[9] Forum génération iv. online : https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9260/public.

[10] J.P. Schapira. A joint venture between research (cea and cnrs) and industry (edf and framatome). *Nucl. Phys. A*, 654 :458c–466c, 1999.

[11] Gedeon orientation 2003. online : http://www.gedeon.prd.fr/ATELIERS/atelier%20mars%202003/orientation/orientation%20et%20operation%202003%20GDR%20GEDEPEON%20.htm, 2003.

[12] C.D. Bowman, E.D. Arthur, P.W. Lisowski, G.P. Lawrence, R.J. Jensen, J .L. Anderson, B. Blind, M. Cappiello, J.W. Davidson, T.R. England, L.N. Engel, R.C. Haight, H.G. Hughes III, J.R. Ireland, R.A. Krakowski, R.J . LaBauve, B.C. Letellier, R.T. Perry, K.P. Staudhammer G.J. Russell, G. Versamis, and W.B. Wilson. Nuclear energy generation and waste transmutation using an accelerator-driven intense thermal neutron source. *Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. A*, 320 : 336–367, 1992.

[13] S. David. *Capacités de réacteurs hybrides au plomb pour la production d'énergie et l'incinération avec multirecyclage des combustibles, Evolution des paramètres physiques, Radiotoxicités induites.* PhD thesis, Université Joseph Fourier - Grenoble 1, 1999.

[14] F. Borne, S. Crespin, S. Leray, Y. Patin, M. Beau, A. Boudard, F. Bou, P. Bouyer, Boyard, F. Brochard, D. Drake, J.C. Duchazeaubeneix, J.M. Durand, J. Fréhaut, L. Kowalskif, R. Legrain, J.P. Lochard, E. Martineza, S. MCnardd, G. Milleretb, E. Petibon, F. Plouin, Y. Terrien, J. Thun, M. Uematsu, S. Vuillier, and D.M. Whittal. Spallation neutron spectra measurements part i : Time-of-flight technique. *Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. A*, 385 :339–344, 1997.

[15] S. Ménard, J.P. Schapira, D Vautherin, and P. Bonche. Interaction of a high-energy proton beam with a thick target : A model description. *Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. A*, 400 :255–266, 1997.

[16] F. Rejmund, B. Mustapha, P. Armbruster, J. Benlliure, M. Bernas, A. Boudard, J.P. Dufour, T. Enqvist, R. Legrain, S. Leray, K.-H. Schmidt, C. Stéphan, J. Taieb, L. Tassan-Got, and C. Volant. Measurement of isotopic cross sections of spallation residues in 800 A.MeV ^{197}Au+p collisions. *Nucl. Phys. A*, 683 :540–565, 2001.

[17] G.S. Bauer, M. Salvatores, G. Heusener, and P.G. Hansen. MEGAPIE, a 1 MW pilot experiment for a liquid metal spallation target. *J. Nuc. Mater.*, 296 :17–33, 2001.

[18] L. Zanini, S. Dementjev, F. Gröschel, W. Leung, R. Milenkovic, K. Thomsen, W. Wagner, M. Wohlmuther, Xu Cheng, A. Class, A. Konobeyev, P. Agostini, P. Meloni, J.-C. David, A. Letourneau, S. Leray, S. Panebianco, L. Cachon, C. Latgé, P. Roubin, A. Guertin, N. Thiolliere, and M. Dierckx. Experience from the post-test analysis of MEGAPIE. *J. Nuc. Mater.*, 415 :367–377, 2011.

[19] Y. Dai, M. Wohlmuther, V. Boutellier, S. Hahl, A. Lagotzki, H. Leu, H.P. Linder, R. Schwarz, A. Spahr, L. Zanini, D. Kuster, D. Gavillet, and W. Wagner. Non-destructive testing of the MEGAPIE target. *J. Nuc. Mater.*, 486 :221–227, 2016.

[20] V. Blideanu, F.R. Lecolley, J.F. Lecolley, T. Lefort, N. Marie, A. Atac, G. Ban, B. Bergenwall, J. Blomgren, S. Dangtip, K. Elmgren, Ph. Eudes, Y. Foucher, A. Guertin, F. Haddad, A. Hildebrand, C. Johansson, O. Jonsson, M. Kerveno, T. Kirchner, J. Klug, Ch. Le Brun, C. Lebrun, M. Louvel, P. Nadel-Turonski, L. Nilsson, N. Olsson, S. Pomp, A.V. Prokofiev, P.-U. Renberg, G. Riviere, I. Slypen, L. Stuttge, U. Tippawan, and M. Osterlund. Nucleon-induced reactions at intermediate energies : New data at 96 MeV and theoretical status. *Phys. Rev. C*, 70 :14607, 2004.

[21] M.Kerveno, F.Haddad, C.Lebrun, Ph.Eudes, T.Kirchner, I.Slypen, J.P.Meulders, J.F.Lecolley, F.R.Lecolley, C.Le Brun, M.Louvel, F.Lefèbvres, S.Hilaire, and A.Koning. Hydrogen isotope double differential production cross sections induced by 62.7 MeV neutrons on a lead target. *Phys. Rev. C*, 66 :14601, 2002.

[22] A. Guertin, N. Marie, S. Auduc, V. Blideanu, Th. Delbar, P. Eudes, Y. Foucher, F. Haddad, T. Kirchner, Ch. Le Brun, C. Lebrun, F.R. Lecolley, J.F. Lecolley, X. Ledoux, F. Lefèbvres, T. Lefort, M. Louvel, A. Ninane, Y. Patin, Ph. Pras, G. Rivière, and C. Varignon. Neutron and light-charged-particle productions in proton-induced reactions on ^{208}Pb at 62.9 MeV. *Eur. Phys. J. A*, 23 :49–60, 2005.

[23] D. Karamanis, M. Petit, S. Andriamonje, G. Barreau, M. Bercion, A. Billebaud, B. Blank, S. Czajkowski, V. Lacoste, C. Marchand, R. Del Moral, J. Giovinazzo, L. Perrot, M. Pravikoff, and J.C. Thomas. Neutron radiative capture cross section of ^{232}Th in the energy range from 0.06 to 2 MeV. *Nucl. Scien. Eng.*, 139 :282, 2001.

[24] L. Perrot, A. Billebaud, R. Brissot, A. Giorni, D. Heuer, J.-M. Loiseaux, O. Méplan, and J.-B. Viano. Precise validation of database (n,g) cross sections using a lead-slowing-down spectrometer and simulation from 0.1 eV to 30 keV : Methodology and data for a few elements. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 144 :1–15, 2003.

[25] A. Abanades, J. Aleixandre, S. Andriamonje, A. Angelopoulos, A. Apostolakis, H. Arnould, E. Belle, C.A. Bompas, D. Brozzi, J. Bueno, S. Buono, F. Carminati, F. Casagrande, P. Cennini, J.I. Collar, E. Cerro, R. Del Moral, S. Diez, L. Dumps, C. Eleftheriadis, M. Embid, R. Fernandez, J. Galvez, J. Garcia, C. Gelès, A. Giorni, E. Gonzalez, O. Gonzalez, I. Goulas, D. Heuer, M. Hussonnois, Y. Kadi, P. Karaiskos, G. Kitis, R. Klapisch, P. Kokkas, V. Lacoste, C. Le Naour, C. Lopez, J.M. Loiseaux, J.M. Martinez-Val, O. Méplan, H. Nifenecker, J. Oropesa, I. Papadopoulos, P. Pavlopoulos, E. Pérez-Enciso, A. Pérez-Navarro, M. Perlado, A. Placci, M. Poza, J.-P. Revol, C. Rubbia, J.A. Rubio, L. Sakelliou, F. Saldana, E. Savvidis, F. Schussler, C. Sirvent, J. Tamarit, D. Trubert, A. Tzima, J.B. Viano, S. Vieira, V. Vlachoudis, and K. Zioutas. Results from the tarc experiment : spallation neutron phenomenology in lead and neutron-driven nuclear transmutation by adiabatic resonance crossing. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 478 :577–730, 2002.

[26] Experimental nuclear reaction data (EXFOR). online : https://www-nds.iaea.org/exfor/exfor.htm.

[27] Rapport d'activité GEDEPEON 2001 - 2004. online : http://www.gedeon.prd.fr/, 2005.

[28] J.C. Hardy, L.C. Carraz, B. Jonson, and P.G. Hansen. The essential decay of pandemonium : A demonstration of errors in complex beta-decay schemes. *Phys. Lett. B*, 71 :307, 1977.

[29] n-TOF, the neutron time-of-flight facility at CERN. online : https://ntof-exp.web.cern.ch/ntof-exp/index.php?page=main.

[30] NFS : Letters of Intent. online : http://pro.ganil-spiral2.eu/spiral2/instrumentation/nfs/lois, .

[31] NFS : Neutrons For Science. online : http://pro.ganil-spiral2.eu/laboratory/experimental-areas/nfs/what-is-nfs, .

[32] GEDEON compte rendu d'activité 2001. online : http://www.gedeon.prd.fr/, 2001.

[33] CORDIS. online : http://cordis.europa.eu/home_fr.html.

[34] W. Gudowski. Accelerator-driven transmutation projects. the importance of nuclear physics research for waste transmutation. *Nucl. Phys. A*, 654 :436c–457c, 1999.

[35] Enrique M. Gonzalez, A. Koning, S. Leray, A. Plompen, and J. Sanz. NUDATRA : Nuclear data for transmutation in ip-eurotrans. online : https://www.researchgate.net/profile/Arjan_Koning/publication/299348038_Nudatra_nuclear_data_for_transmutation_in_IP-Eurotrans/links/56f6a6b308ae38d710a1bce4/Nudatra-nuclear-data-for-transmutation-in-IP-Eurotrans.pdf?origin=publication_detail.

[36] A.J.M. Plompen, F.-J. Hambsch, Kopecky, M. Nyman, C. Rouki, P. Salvador Casti neira, P. Schillebeeckx, F. Belloni, E. Berthoumieux, F. Gunsing, C. Lampoudis, M. Calviani, C. Guerrero, D. Cano-Ott, E. Gonzalez Romero, M. Aïche, B. Jurado, L. Mathieu, X. Derckx, F. Farget, C. Rodrigues Tajes, A. Bacquias, Ph. Dessagne, M. Kerveno, C. Borcea, A. Negret, N. Colonna, I. Goncalves, H. Penttilä, S. Rinta-Antila, V.S. Kolhinen, and A. Jokinen. ANDES measurements for advanced reactor systems. *Nuclear Data Sheet*, 119 :201–204, 2014.

[37] Comission National d'Evaluation. Rapport global d'évaluation des recherches conduites dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991. online : https://www.cne2.fr/index.php/fr/cne-1-1995-a-2006, 2006.

[38] Loi n^o 2006-739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs. online : https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000240700, .

[39] Mission Interdisciplinaire du CNRS. online : http://www.cnrs.fr/mi/spip.php?article193.

[40] Nucléaire, énergie, environnement, déchets, société - NEEDS. online : http://www.celluleenergie.cnrs.fr/-Programme-NEEDS-.

[41] La cellule energie du CNRS. online : http://www.celluleenergie.cnrs.fr/.

[42] G. Lehaut, S. Salvador, J.-M. Fontbonne, F.-R. Lecolley, J. Perronnel, and Ch. Vandamme. Scintillation properties of N2 and CF4 and performances of a scintillation ionization chamber. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 797 :57–63, 2015.

[43] D.Tario and the N-TOF collaboration. Measurement of the angular distribution of fission fragments using a PPAC assembly at CERN n-TOF. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 743 :79, 2014.

[44] G. Kessedjian, B. Jurado, G. Barreau, P. Marini, L. Mathieu, M. Aiche, G. Boutoux, S. Czajkowski, and I. Tsekhanovich. Fission probabilities of ^{242}Am, ^{243}Cm and ^{244}Cm induced by transfer reactions. *Phys. Rev. C*, 91 :044607, 2015.

[45] L. Mathieu, I. Companis, M. Aïche, P. Schillebeeckx, J.Heyse, G. Barreau, G. Boutoux, F. Gunsing S. Czajkowski, B. Jurado, G. Kessedjian, A.J.M. Plompen, and I. Tsekhanovitch. Development of ionization chambers for the simultaneous measurement of the neutron induced capture and fission cross section of ^{233}U. *Nuclear Data Sheet*, 119 :368–370, 2014.

[46] M.Kerveno, A. Bacquias, C. Borcea, Ph. Dessagne, G. Henning, L.C.Mihailescu, A.Negret, M. Nyman, A.Olacel, A.J.M.Plompen, C. Rouki, G. Rudolf, and J.C. Thiry et al. From γ emissions to (n,xn) cross sections of interest : The role of GAINS and GRAPhEME in nuclear reaction modeling. *Eur. Phys. J. A*, 51 :167, 2015.

[47] A. Chebboubi, G. Kessedjian, C. Sage, D. Bernard, A. Blanc, H. Faust, U. Köster, O. Litaize, and P. Muttiand O. Serot. ^{233}U mass yield measurements around and within the symmetry region with the ill lohengrin spectrometer. *Eur. Phys. J. web of conferences*, 111 :8002, 2016.

[48] A.Chebboubi, G.Kessedjian, H.Faust, A.Blanc, M.Jentschel, U.Köster, T.Materna, O.Méplan, C.Sage, and O.Serot. Development of a gas filled magnet spectrometer within the fipps project. *Nucl. Instrum. Meth. B*, 376 :120–124, 2016.

[49] A.-A. Zakari-Issoufou et al. Total absorption spectroscopy study of ^{92}Rb decay : A major contributor to reactor antineutrino flux. *Phys. Rev. Lett.*, 115 :102503, 2015.

[50] K.-H. Schmidt, B. Jurad, C. Amouroux, and C. Schmitt. General description of fission observables : GEF model code. *Nuclear Data Sheet*, 131 :107–221, 2016.

[51] M. Caamano, F. Farget, O. Delaune, K.-H. Schmidt, C. Schmitt, L. Audouin, C.-O. Bacri, J. Benlliure, E. Casarejos, X. Derkx, B. Fernandez-Dominguez, L. Gaudefroy, C. Golabek, B. Jurado, A. Lemasson, D. Ramos, C. Rodriguez-Tajes, T. Roger, and A.Shrivastava. Characterization of the scission point from fission-fragment velocities. *Phys. Rev. C*, 92 :034606, 2015.

[52] J.-F. Martin, J. Taieb, A. Chatillon, G. Bélier, G. Boutoux, A. Ebran, T. Gorbinet, L. Grente, B. Laurent, E. Pellereau, H. Alvarez-Polv, L. Audouin, T. Aumann, Y. Ayyad, and J. Benlliure et al. Studies on fission with ALADIN precise and simultaneous measurement of fission yields, total kinetic energy and total prompt neutron multiplicity at GSI. *Eur. Phys. J. A*, 51 :174, 2015.

[53] Paul Reuss. Précis de neutronique. EDP Sciences, collection Génie Atomique, ISBN : 2-86883-637-2, 2003.

[54] D. Bernard. Validation ^{238}U(n,n'). Présentation à la réunion annuelle EEDIN, 2014.

[55] M. Salvatores and R. Jacqmin. Uncertainty and target accuracy assessment for innovative systems using recent covariance data evaluations. Nuclear Science-NEA/WPEC-26, Vol. 26, NEA N^o 6410., 2008.

[56] D. Rochman, A. Vasiliev, H. Ferroukhi, A. Dokhane, and A. Koning. How inelastic scattering stimulates nonlinear reactor core parameter behaviour. *Ann. Nucl. Energy.*, 112 :236–244, 2018.

[57] ^{238}U capture and inelastic cross sections. Nuclear Science-NEA/WPEC–4, vol. 4, 1999.

[58] OECD/NEA, nuclear data high priority request list,. online : http://www.nea.fr/dbdata/hprl/.

[59] A. Plompen, T. Kawano, and R. Capote Noy. Summary report on inelastic scattering and capture cross-section data of major actinides in the fast neutron region. IAEA, INDC(NDS)-0597, http ://www-nds.iaea.org/reports-new/indc-reports/, 2012.

[60] A. Santamarina, D. Bernard, P. Leconte, and J.-F. Vidal. Improvement of ^{238}U inelastic scattering cross-section for an accurate calculation of large commercial reactors. *Nucl. data. Sheets*, 118 :118–121, 2014.

[61] 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. Mughabghab, 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 ^{1}H, ^{16}O, ^{56}Fe, ^{235,238}U, and ^{239}Pu. *Nuclear Data Sheet*, 118 :1–24, 2014.

[62] M.B. Chadwick, R. Capote, A. Trkov, A.C. Kahler, M.W. Herman, D.A. Brown, G.M. Hale, M. Pigni, M. Dunn, L. Leal, A. Plompen, P. Schillebeeck, F.-J. Hambsch, T. Kawano, P. Talou, M. Jandel, S. Mosby, J. Lestone, D. Neudecker, M. Rising, M. Paris, G.P.A. Nobre, R. Arcilla, S. Kopecky, G. Giorginis, O. Cabellos, I. Hill, E. Dupont, Y. Danon, Q. Jing, G. Zhigang, L. Tingjin, L. Hanlin, R. Xichao, W. Haicheng, M. Sin, E. Bauge, P. Romain, B. Morillon, G. Noguere, R. Jacqmin, O. Bouland, C. De Saint Jean, V.G. Pronyaev, A. Ignatyuk, K. Yokoyama, M. Ishikawa, T. Fukahori, N. Iwamoto, O. Iwamoto, S. Kuneada, C.R. Lubitz, G. Palmiotti, M. Salvatores, I. Kodeli, B. Kiedrowski, D. Roubtsov, I. Thompson, S. Quaglioni, H.I. Kim, Y.O. Lee, A.J. Koning, A. Carlson, U. Fischer, and I. Sirakov. The CIELO collaboration : Progress in international evaluations of neutron reactions on Oxygen, Iron, Uranium and Plutonium. *Eur. Phys. J. web of conferences*, 146 :02001, 2017.

[63] P. Romojaro, F. Alvarez-Velarde, I. Kodeli, A. Stankovskiy, C.J. Diez, O. Cabellos, N. Garcia-Herranz, J. Heyse, P. Schillebeeckx, G. Van den Eynde, and G. Zerovnik. Nuclear data sensitivity and uncertainty analysis of effective neutron multiplication factor in various MYRRHA core configurations. *Ann. Nucl. Energy.*, 101 :330–338, 2017.

[64] G. T. Seaborg, G. E. Gibson, and D. C. Grahame. Inelastic scattering of fast neutrons. *Phys. Rev.*, 52 :408–414, 1937.

[65] H. Dunlap and R. Little. The scattering of fast neutrons by lead. *Phys. Rev.*, 60 : 693, 1941.

[66] P. Stelson and W. Preston. The inelastic scattering of fast neutrons from Iron. *Phys. Rev.*, 86 :132, 1952.

[67] R. C. Allen. *Phys. Rev.*, 105 :1796, 1957.

[68] R. Garrett, F. Hereford, and B. Sloope. Inelastic neutron scattering in Al, Fe, Mg and Cu. *Phys. Rev.*, 92 :1507, 1953.

[69] J. Frehaut. Use of the large Gadolinium-loaded liquid scintillator technique for (n,2n) and (n,3n) cross section measurements. *Nucl. Instrum. Meth.*, 135 :511, 1976.

[70] M. Baba, H. Wakabayashi, N. Ito, K. Maeda, and N. Hirakawa. Measurement of double-differential neutron emission spectra from Uranium-238. *J. Nucl. Sci. Technol*, 27 :601, 1990.

[71] A.J.M. Plompen, C. Goddio, V.M. Maslov, and Yu.V. Porodzinskij. New experimental data on ^{238}U neutron inelastic scattering. EU report EUR 18711 EN, European Commission Printing Office, Luxemburg, 1999.

[72] A.B. Smith and S. Chiba. Neutron scattering from elemental Uranium and Thorium. *Ann. Nucl. En.*, 23 :459, 1996.

[73] J.H. Dave *et al.* Cross sections, transition schemes, and branching ratios for ^{232}Th from the ^{232}Th(n,n'γ) reaction. *Nucl. Sci. En.*, 91 :187, 1985.

[74] D.K. Olsen, G.L. Morgan, and J.W. Mcconnell. Conf. on Nuclear Cross Sections and Technology, Knoxville, USA, 1979.

[75] F. Voss, S. Cierjacks, D. Erbe, and G. Schmatz. Kernforschungszentrum Karlsruhe Reports, N° 2379, 1976.

[76] D. Karamanis, S. Andriamonje, P.A. Assimakopoulos, G. Doukellis, D.A. Karademos, A. Karydas, M. Kokkoris, S. Kossionides, N.G. Nicolis, C. Papachristodoulou, C.T. Papadopoulos, N. Patronis, P. Pavlopoulos, G. Perdikakis, R. Vlastou, and

The n TOF Collaboration. Neutron cross-section measurements in the Th–U cycle by the activation method. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 505 :381, 2003.

[77] F. Voss, S. Cierjacks, and L. Kropp. Conf. on Nuclear Cross Sections and Technology, vol. 1, Knoxville, USA, p.208, 1971.

[78] J.K. Dickens and G.L. Morgan. Si(n,n'γ) photon production cross sections for E_γ= 1.78 MeV, $5.0 \leq E_n \leq 9.5$ MeV. *Phys. Rev. C*, 10 :958, 1974.

[79] H. Vonach, A. Pavlik, M.B. Chadwick, R.C. Haight, R.O. Nelson, S.A. Wender, and P.G. Young. ^{207,208}Pb(n, xnp) reactions for neutron energies from 3 to 200 MeV. *Phys. Rev. C*, 50 :1952, 1994.

[80] A. Pavlik, H. hitzenberger Schauer, H. Vonach, M.B. Chadwick, R.C. Haight, R.O. Nelson, S.A. Wender, and P.G. Young. ^{27}Al(n,xγ) reactions for neutron energies from 3 to 400 MeV. *Phys. Rev. C*, 57 :2416, 1998.

[81] L. Bernstein, J. Becker, W. Younes, D. Archer, K. Hauschild, G. Johns, R. Nelson, W.S. Wilburn, and D. Drake. Probing reaction dynamics with the ^{196}Pt(n,xnγ) reactions for x$\leq$15. *Phys. Rev. C*, 57 :2799, 1998.

[82] P.E. Garrett, L.A. Bernstein, J.A. Becker, K. Hauschild, C.A. McGrath, D.P. McNabb, W. Younes, M.B. Chadwick, G.D. Johns, R.O. Nelson, W.S. Wilburn, E. Tavukcu, and S.W. Yates. ^{92}Mo(n,xn ypzα γ) reactions for neutron energies up to 250 MeV. *Phys. Rev. C*, 62 :054608, 2000.

[83] E. Tavukcu, L.A. Bernstein, K. Hauschild, J.A. Becker, P.E. Garrett, C.A. McGrath, D.P. McNabb, W. Younes, M.B. Chadwick, G.D. Johns, R.O. Nelson, and G.E. Mitchell. ^{196}Pt(n,xn yp γ) reactions using spallation neutrons from E_n=1 to 250 MeV. *Phys. Rev. C*, 64 :054614, 2001.

[84] L.A. Bernstein, J.A. Becker, P.E. Garrett, W. Younes, D.P. McNabb, D.E. Archer, C.A. McGrath, H. Chen, W.E. Ormand, M.A. Stoyer, R.O. Nelson, M.B. Chadwick, G.D. Johns, W.S. Wilburn, M. Devlin, D.M. Drake, P.G. Youngand, and G.E. Mitchell. ^{239}Pu(n,2n)^{238}Pu cross section deduced using a combination of experiment and theory. *Phys. Rev. C*, 65 :021601 (R), 2002.

[85] W. Younes, J.A. Becker, L.A. Bernstein, P.E. Garrett, C.A. McGrath, D.P. McNabb, R.O. Nelson, M. Devlin, N. Fotiades, and G.D. Johns. Lawrence Livermore National Laboratory technical Report N° UCRL-ID-140313 (2000), 2000.

[86] N. Fotiades, G.D. Johns, R.O. Nelson, M.B. Chadwick, M. Devlin, W.S. Wilburn, P.G. Young, J.A. Becker, D.E. Archer, L.A. Bernstein, P.E. Garrett, C.A. McGrath, D.P. McNabb, and W. Younes. Measurements and calculations of ^{238}U(n, xnγ) partial γ-ray cross sections. *Phys. Rev. C*, 69 :024601, 2004.

[87] D. Dashdorj, G.E. Mitchell, J.A. Becker, U. Agvaanluvsan, L.A. Bernstein, W. Younes, P.E. Garrett, M.B. Chadwick, M. Devlin, N. Fotiades, T. Kawano, and R.O. Nelson. Gamma-ray production cross sections in multiple channels for neutron-induced reaction on ^{48}Ti for E_n = 1 to 200 MeV. *Nucl. Sci. Eng.*, 65 :157, 2007.

[88] D. Dashdorj, G.E. Mitchell, T. Kawano, M. Devlin, N. Fotiades, R.O. Nelson, J.A. Becker, C.Y. Wu, P.E. Garrett, and S. Kuneida. (n,2n) and (n,3n) cross-sections of neutron-induced reactions on ^{150}Sm for E_n = 1 - 35 MeV. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, 268 :114, 2010.

[89] T. Kawano, P. Talou, and M.B. Chadwick. Production of isomers by neutron-induced inelastic scattering on ^{193}Ir and influence of spin distribution in the pre-equilibrium process. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 562 :744, 2006.

[90] D. Dashdorj, T. Kawano, P.E. Garrett, J.A. Becker, U. Agvaanluvsan, L.A. Bernstein, M.B. Chadwick, M. Devlin, N. Fotiades, G.E. Mitchell, R.O. Nelson, and W. Younes. Effect of preequilibrium spin distribution on ^{48}Ti + n cross sections. *Phys. Rev. C*, 75 :054612, 2007.

[91] M.B. Chadwick, P.G. Young, S. Chiba, S.C. Frankle, G.M. Hale, H.G. Hughes, A.J. Koning, R.C. Litller, R.E. Mac-Farlane, R.E. Prael, and L.S. Waters. Cross-section evaluations to 150 MeV for accelerator-driven systems and implementation in MCNPX. *Nucl. Sci. Eng.*, 131 :293, 1999.

[92] C.R. Brune. Gaussian quadrature applied to experimental γ-ray yields. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 493 :106, 2002.

[93] L.C. Mihailescu, L.Oláh, C. Borcea, and A.J.M. Plompen. A new HPGe setup at Gelina for measurement of gamma-ray production cross-sections from inelastic neutron scattering. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 531 :375, 2004.

[94] M. Kerveno, J.C. Thiry, A. Bacquias, C. Borcea, P. Dessagne, J.C. Drohé, S. Goriely, S. Hilaire, E. Jericha, H. Karam, A. Negret, A. Pavlik, A.J.M. Plompen, P. Romain, C .Rouki, G. Rudolf, and M. Stanoiu. Measurement of ^{235}U(n, nγ) and ^{235}U(n, 2nγ) reaction cross sections. *Phys. Rev. C*, 87 :24609, 2013.

[95] G. Rudolf and P. Assimakopoulos. 5th euratom framework programme 1998-2002 fikw-ct-2000-00107 : Final report on wp16 activities of the n-tof-nd-ads project deliverable 18. 5th EURATOM FRAMEWORK PROGRAMME 1998-2002 FIKW-CT-2000-00107, 2005.

[96] Strahinja Lukic. *Mesure de sections efficaces de réactions (n,xn) par spectroscopie gamma prompte auprès d'un faisceau à très haut flux instantané.* PhD thesis, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 2004.

[97] M. Kerveno, R. Nolte, P. Baumann, Ph. Dessagne, E. Jericha, S. Jokic, A.J. Koning, S. Lukic, J.P. Meulders, A. Nachab, A. Pavlik, M. Reginatto, and G. Rudolf. Measurement of ^{232}Th(n,5n γ) cross sections from 29 MeV to 42 MeV. *Eur. Phys. J. A*, 50 :162, 2014.

[98] Habib Karam. *Mise au point de la mesure de sections efficaces de réactions (n,xn) par spectroscopie γ prompte sur des cibles très radioactives.* PhD thesis, Université de Strasbourg, 2009.

[99] Jean Claude Thiry. *Measurement of (n,xn γ) reaction cross sections of interest for the Generation IV reactors.* PhD thesis, Université de Strasbourg, 2010.

[100] L. Arnold, R. Baumann, E. Chambit, M. Filliger, C. Fuchs, C. Kieber, D. Klein, P. Medina, C. Parisel, M. Richer, C. Santos, and C. Weber. in Proceedings of Real Time Conference, 14th IEEE-NPSS (2005) pp. 265-269, 2005.

[101] M. Kerveno, A. Bacquias, C. Borcea, Ph. Dessagne, J.C. Drohé, N. Nankov, M. Nyman, A. Negret, A. Plompen, C. Rouki, and G. Rudolf. (n,xn γ) reaction cross section measurements for (n,xn) reaction studies. *Eur. Phys. J. Web of Conference*, 42 :01005, 2013.

[102] G. Henning, A. Bacquias, C. Borcea, Ph. Dessagne, J.C. Drohé, M. Kerveno, A. Plompen, A. Negret, M. Nyman, A. Olacel, and G. Rudolf. Measurement of (n, xnγ) reaction cross sections in W isotopes. *Eur. Phys. J. Web of Conference*, 146 : 11016, 2017.

[103] M. Kerveno, A. Bacquias, F. Belloni, C. Borcea, R. Capote, Ph. Dessagne, M. Dupuis, G. Henning, S. Hilaire, T. Kawano, N. Nankov, A. Negret, M. Nyman, E. Party, A. Plompen, P. Romain, C. Rouki, G. Rudolf, and M. Stanoiu. (n,xnγ) cross sections on actinides versus reaction code calculations. *Eur. Phys. J. Web of Conference*, 146 :11012, 2017.

[104] S. Simakov B Marcinkevicius and V. Pronyaev. INDC(NDS)-0681, 2015.

[105] M. Kerveno, G. Henning, C. Borcea, Ph. Dessagne, M. Dupuis, S. Hilaire, A. Negret, M. Nyman, A. Olacel, E. Party, and A. Plompen. How to produce accurate inelastic cross sections from an indirect measurement method ? *Eur. Phys. J. N*, XX :XXX, 2018.

[106] C. Rouki, P. Archier, C. Borcea, C. De Saint Jean, J.C. Drohé, S. Kopecky, A. Moens, N. Nankov, A. Negret, G. Noguère, A.J.M. Plompen, and M. Stanoiu. High resolution measurement of neutron inelastic scattering cross-sections for ^{23}Na. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 672 :82, 2012.

[107] A. Olacel, C. Borcea, P. Dessagne, M. Kerveno, A. Negret, and A.J.M. Plompen. Neutron inelastic cross-section measurements for ^{24}Mg. *Phys. Rev. C*, 90 :34603, 2014.

[108] A. Negret, C. Borcea, D. Bucurescu, D. Deleanu, Ph. Dessagne, D. Filipescu, D. Ghita, T. Glodariu, M. Kerveno, N. Marginean, R. Marginean, C. Mihai, S. Pascu, A.J.M. Plompen, T. Sava, and L. Stroe. Cross sections for inelastic scattering of neutrons on ^{28}Si and comparison with the ^{25}Mg(α, n)^{28}Si reaction. *Phys. Rev. C*, 88 :34604, 2013.

[109] L.C. Mihailescu, C. Borcea, A.J. Koning, and A.J.M. Plompen. High resolution measurement of neutron inelastic scattering and (n, 2n) cross-sections for ^{52}Cr. *Nucl. Phys. A*, 786 :1, 2007.

[110] A. Negret, C. Borcea, Ph. Dessagne, M. Kerveno, A. Olacel, A.J.M. Plompen, and M. Stanoiu. Cross-section measurements for the ^{56}Fe(n, xnγ) reactions. *Phys. Rev. C*, 90 :034602, 2014.

[111] C. Rouki, A.R. Domula, J.C. Drohé, A.J. Koning, A.J.M. Plompen, , and K. Zuber. γ production and neutron inelastic scattering cross sections for ^{76}Ge. *Phys. Rev. C*, 88 :054613, 2013.

[112] L.C. Mihailescu, C. Borcea, P. Baumann, Ph. Dessagne, E. Jericha, H. Karam, M. Kerveno, A.J. Koning, N. Leveque, A. Pavlik, A.J.M. Plompen, C. Quétel, and G. Rudolf. A measurement of (n, xnγ) cross sections for ^{208}Pb from threshold up to 20 MeV. *Nucl. Phys. A*, 811 :1, 2008.

[113] L.C. Mihailescu, C. Borcea, A.J. Koning, A. Pavlik, and A.J.M. Plompen. High resolution measurement of neutron inelastic scattering and (n, 2n) cross-sections for ^{209}Bi. *Nucl. Phys. A*, 799 :1, 2008.

[114] P.G. Young, E.D. Arthur, and M.B. Chadwick. LANL Report, LA-12343-MS, 1992.

[115] F. Plasil. ORNL ALICE : A Statistical Model Computer Code Including Fission Competition, ORNL/TM-6054 (November 1977), 1977.

[116] M. Herman, R. Capote, V. Carlson, P. Oblozinsky, M. Sin, A. Trkov, H. Wienke, and V. Zerkin. Empire : Nuclear reaction model code system for data evaluation. *Nucl. Data. Sheets*, 108 :2655–2715, 2007.

[117] A. Koning, S. Hilaire, and M. Duijvestijn. in Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology - ND2007 (EDP Sciences, Paris, France, 2008), pp. 211-214, 2008.

[118] M. Dupuis, E. Bauge, S. Hilaire, F. Lechaftois, S. Péru, N. Pillet, and C. Robinb. Progress in microscopic direct reaction modeling of nucleon induced reactions. *Eur. Phys. J. A*, 51 :168, 2015.

[119] M. Dupuis, S. Hilaire, S. Péru, E. Bauge, M. Kerveno, Ph. Dessagne, and G. Henning. Microscopic modeling of direct pre-equilibrium emission from neutron induced reactions on even and odd actinides. *Eur. Phys. J. Web of Conference*, 146 : 12002, 2017.

[120] E. Browne and J.K. Tuli. *Nucl. Data. Sheets.*, 127 :191–332, 2015.

[121] L.I. Govor, A.M. Demidov, V.A. Kurkin, and I.V. Mikhailov. *Phys. Atom. Nucl.*, 77 :131–166, 2014.

[122] A. Negret, M. Sin, C. Borcea, R. Capote, Ph. Dessagne, M. Kerveno, N. Nankov, A. Olacel, A.J.M. Plompen, and C. Rouki. Cross-section measurements for the ^{57}Fe(n,nγ)^{57}Fe and ^{57}Fe(n,2nγ)^{56}Fe reactions. *Phys. Rev. C*, 96 :024620, 2017.

[123] J. Frehaut, A. Bertin, R. Bois, E. Gryntakis, and C.A. Philis. (n,2n) cross sections of ^{2}H and ^{239}Pu. *Radiation Effects*, 96 :219, 1986.

[124] R.W. Lougheed, W. Webster, M.N. Namboodiri, D. R. Nethaway, K. J. Moody, J. H. Landrum, R. W. Hoff, R. J. Dupzyk, J. H. McQuaid, R. Gunnink, and E. D. Watkins. ^{239}Pu and ^{241}Am (n, 2n) cross-section measurements near en = 14 mev. *Radiochimica Acta*, 90 :833, 2002.

[125] Système d'acquisition digital FASTER. online : http://faster.in2p3.fr/.

[126] X. Ledoux *et al.* The neutrons for science facility at SPIRAL-2. *Rad. Protec. Dos.*, pages 1–5, 2017.

[127] G. Bélier, A. Chatillon, B. Laurent, P. Marini, V. Méot, O. Roig, J. Taieb, and X. Ledoux. Direct measurement of the (n,xn) reaction on ^{238}U. Présentation au workshop NFS, 6-8 novembre 2017, Caen, France, 2017.

[128] Adrien Bidaud. *Analyses de sensibilité et d'incertitude de données nucléaires : contribution à la validation d'une méthodologie utilisant la théorie des perturbations : application à un concept innovant : réacteur à sels fondus thorium à spectre épithermique.* PhD thesis, Université Paris XI, 2005.


it always
seems
impossible
until its
done.
NELSON MANDELA